

Zweite Lehrstufe.

I. Abschnitt.

Von den Körpern im allgemeinen.

(I. Lehrstufe, §§ 1—6.).

A. Allgemeine Eigenschaften der Körper.

§ 51. Porosität und Teilbarkeit. Aus unseren früheren Betrachtungen über die allgemeinen Eigenschaften der Körper ergab sich, 1. daß jeder Körper einen Raum einnimmt, welcher nicht zugleich von einem anderen Körper eingenommen werden kann (**Ausdehnung** und **Undurchdringlichkeit**), 2. daß weder ruhende noch bewegte Körper ihren Zustand selbst ändern können (**Trägheit** oder **Beharrungsvermögen**), 3. daß alle Körper schwer sind (**Schwere**). Die Frage: ob der von einem Körper eingenommene Raum von dem Stoffe des Körpers ganz oder nur teilweise ausgefüllt wird, und andere derartige, die innere Beschaffenheit der Körper betreffende Fragen blieben damals unerörtert.

Sowohl die tägliche Erfahrung, wie auch geeignete Versuche lehren, daß die Körper ihren Rauminhalt ändern, wenn *äußere Kräfte* (Druck oder Zug) auf sie einwirken. Gewisse feste Körper, namentlich Metalle, lassen sich durch Hämmern, Pressen, Walzen u. dgl. so stark verdichten, daß ihr spezifisches Gewicht dadurch merklich erhöht wird (§ 17). Die Raumveränderung, welche Flüssigkeiten durch äußeren Druck erleiden, ist eine so geringe, daß man bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts glaubte, sie seien überhaupt nicht zusammenpressbar. Durch den Druck von 1 Atmosphäre, d. h. von 1 kg auf 1 qcm (§ 84a) wird Wasser z. B. nur um $\frac{1}{20000}$, Quecksilber um 3 Milliontel seines ursprünglichen Rauminhaltes zusammengedrückt. Am bedeutendsten ist die Raumveränderung, welche luftförmige Körper durch Zu- oder Abnahme des äußeren Druckes erleiden. — Welchen Einfluß übt die *Wärme* auf den Rauminhalt der Körper aus? (§ 31).

Aus der Veränderlichkeit des von einem Körper eingenommenen Raumes läßt sich schließen, daß der Stoff den Raum der Körper nicht ganz ausfüllt, daß also in allen Körpern Zwischenräume, Poren, enthalten sein müssen. Zahlreiche *Erfahrungen* bestätigen diese Annahme.

In manchen festen Körpern kann man die Poren schon mit bloßen Augen oder doch bei Anwendung eines Vergrößerungsglases erkennen (Beispiele!). Bei anderen Körpern läßt sich aus dem Eindringen von Flüssigkeiten schliessen, daß sie Poren enthalten. Thüren und Fenster quellen bei feuchter Luft, Pflaster- und Mauersteine sind nach anhaltendem Regenwetter noch längere Zeit feucht, aus Kreide steigen im Wasser Luftblasen auf u. s. w. Hohle und ganz mit Wasser gefüllte Metallkugeln überziehen sich mit feinem Tau, wenn sie einem bedeutenden Drucke ausgesetzt werden; dieselbe Erscheinung zeigen die eisernen Röhren hydraulischer Pressen (§ 79). Durch Holz läßt sich Quecksilber leicht hindurchpressen. Auch an flüssigen Körpern lassen sich, wie folgende Versuche zeigen, Erscheinungen wahrnehmen, welche das Vorhandensein von Poren beweisen.

***Versuch a.** Kehrt man eine 60—80 cm lange Glasröhre, welche man in ihrer unteren Hälfte mit Wasser, in der oberen mit Weingeist gefüllt und dann verschlossen hat, mehrmals um, sodafs die Flüssigkeiten sich mischen, so füllt die Mischung die Röhre nicht mehr ganz aus.

***Versuch b.** Schüttelt man in einem verschlossenen Gefäfse kaltes Wasser und Kohlensäure durcheinander, so dringt letztere zum Teil in das Wasser ein, was sich leicht zu erkennen giebt, wenn man das Gefäfis umgekehrt unter Wasser öffnet. (Aufsteigen des W. durch den Luftdruck.)

Daß die Substanz der luftförmigen Körper sehr locker sein muß, folgt sowohl aus der Leichtigkeit, mit welcher solche Körper sich im luftefüllten Raume verbreiten (z. B. Wasserdampf und Leuchtgas in der atm. Luft), als namentlich aus der starken Raumveränderung, welche diese Körper durch Zu- oder Abnahme eines äußeren Druckes, wie auch durch Temperaturveränderung erleiden.

Der Raum, welchen die Körper einnehmen, wird von dem Stoffe, aus dem sie bestehen, nicht vollständig ausgefüllt; im Innern aller Körper sind Zwischenräume, Poren, vorhanden. (Porosität.)

Bem. Im gewöhnlichen Sprachgebrauch pflegt man nur diejenigen Körper porös zu nennen, deren Poren leicht zu erkennen sind, z. B. Schwamm, Bimsstein, Holz u. s. w.

Eine andere Eigenschaft, welche allen Körpern zukommt, ist die **Teilbarkeit**. Feste Körper lassen sich zerschneiden, zerfeilen, zerreiben, zerschlagen u. s. w. Mit einem Flüssigkeitstropfen läßt sich eine Nadelspitze viele hundert mal benetzen. Eine sehr weitgehende Teilung zeigen riechende Stoffe beim Verflüchtigen. Ein Stück Moschus z. B. erfüllt ein ganzes Haus mit seinem Geruche, ohne daß ein Gewichtsverlust nachweisbar ist. Eine sehr große Teilbarkeit zeigen auch manche Farbstoffe beim Auflösen in einer Flüssigkeit.

Versuch c. Gießt man einen Tropfen Anilinrot oder Fuchsin in ein Glas W. und mischt die Flüssigkeiten durch Umrühren, so erscheint das ganze W. gefärbt (1 gr Fuchsin färbt 1000 kg W. noch deutlich rot).

Diese und andere Erscheinungen geben deutlich zu erkennen, daß die Körper sich in sehr kleine Teile zerlegen lassen. Wenngleich man

nun auch die Teilung der Körper sich beliebig weit fortgesetzt denken könnte, so ist man doch infolge gewisser Erscheinungen zu der Annahme gezwungen, daß man bei fortgesetzter Teilung schliesslich Teilchen erhalten würde, welche durch äufere Kräfte nicht weiter zerlegbar sind. Diese kleinsten, sinnlich nicht mehr wahrnehmbaren Teilchen, welche noch die charakteristischen Eigenschaften des geteilten Körpers besitzen, werden **Moleküle**,¹⁾ d. h. **Massenteilchen** genannt.

Der Stoff aller Körper besitzt die Eigenschaft der Teilbarkeit
Jeder Körper ist aus äußerst kleinen, durch äufere Kräfte nicht weiter zerlegbaren Teilchen (Molekülen) zusammengesetzt.

Jeder Körper stellt hiernach ein **Aggregat**, d. h. ein aus kleinsten Teilchen zusammengefügtes Ganze dar. Dies ist der Grund, warum man die drei Zustände der K., nämlich den festen, flüssigen und luftförmigen Zustand, als **Aggregatzustände** bezeichnet (§ 1).

Die Veränderlichkeit des Rauminhaltes der Körper führt zu dem Schlusse, daß die Moleküle eines Körpers sich nicht unmittelbar berühren.

Durch die Einwirkung gewisser Naturkräfte, deren Erforschung dem Gebiet der Chemie angehört, läßt sich die Teilung des Stoffes noch weiter fortsetzen. Leitet man z. B. den el. Strom durch Wasser, so entstehen aus diesem zwei luftförmige Körper, welche sich voneinander und vom Wasser wesentlich unterscheiden; der eine wird Wasserstoff, der andere Sauerstoff genannt. Beide Stoffe besitzen ganz andere Eigenschaften als das Wasser und lassen sich durch keine bekannte Naturkraft zerlegen. Derartige Erscheinungen haben zu der weiteren Annahme geführt, daß die Moleküle der Körper chemisch noch weiter zerlegbar sind und Gruppen von Teilchen der einfachen Stoffe bilden. Diese kleinsten Stoffteilchen, welche sich auch chemisch nicht weiter zerlegen lassen, heißen **Atome**.²⁾

Die **Ausdehnung** und **Undurchdringlichkeit** werden, da ohne sie kein Körper gedacht werden kann, wesentliche, die **Trägheit**, **Schwere**, **Porosität** und **Teilbarkeit** dagegen unwesentliche oder zufällige allgemeine Eigenschaften genannt.

Übungsstoff. 1. Welchen Einfluß muß die Veränderung der Temp. eines K. auf das spec. Gew. desselben ausüben, u. w.? — 2. In welchem Aggregatzustande tritt dieser Einfluß am wenigsten hervor? Grund! — 3. Wie wird sich das spec. Gew. einer geprägten Goldmünze zu dem eines gegossenen goldenen Ringes verhalten, u. w.? (Gleiche Zusammensetzung vorausgesetzt.) — 4. Bleche werden gewalzt. Einfluß auf den Rauminhalt und auf das spec. Gew.? — 5. Bei welchen K. wird bei den Angaben des spec. Gew. auf Temp. und äußeren Druck besonders Rücksicht genommen werden müssen, u. w.? — 6. Vgl. die festen und flüssigen K. miteinander hinsichtlich des Einflusses, welchen Temp. und Druck auf den Rauminhalt derselben ausüben. — 7. Auf die Schwankungen des Luftdruckes wird bei genauer Angabe des spec. Gew. der festen und flüssigen K. keine Rücksicht genommen, wohl aber auf die Temp.; w.? — 8. Welche allgemeine Eigenschaft der K. kommt beim Filtrieren zur Anwendung? — 9. Wenn in glasierte Thongefäße heiße Flüssigkeiten gegossen werden, so steigen oft aus kleinen Rissen zahlreiche Luftbläschen auf. Erkläre dies. — 10. Welche bekannte Veränderung erleiden Pfeifenköpfe von Meeresschaum oder Thon durch das Rauchen? Erkl.! — 11. Welche Schlüsse folgen aus der bekannten Ersch., daß einige Salz- oder Zuckerkörner ausreichen, den Geschmack eines ganzen Glases W. zu ändern? — 12. Unter dem Mikroskop erscheint eine Flgk., welche durch natürliche Teilung eines löslichen Stoffes gefärbt oder in ihrem Geschmacke verändert worden ist, selbst bei der stärksten Vergrößerung durchaus gleichartig. Schlüsse! — 13. Inwiefern kann uns eine stark duftende Blume über

¹⁾ molecula, kleine Masse. — ²⁾ ἄτομος (átomos), unteilbar.

die Teilbarkeit des Stoffes belehren? (Blumenduft wird durch Verflüchtigung ätherischer Öle hervorgerufen.)

B. Wirkungen der Molekularkräfte.

§ 52. **Kohäsion und Expansion.** Nach der Annahme, daß alle Körper aus kleinsten Teilchen zusammengesetzt sind, läßt sich der Unterschied zwischen den festen, flüssigen und luftförmigen Körpern auch in folgender Weise ausdrücken:

Fest heißen Körper, deren Massenteilchen so innig zusammenhängen, daß sie einer Verschiebung oder Trennung einen merklichen Widerstand entgegensetzen; flüssig solche, deren Teilchen nur einen so geringen Zusammenhang haben, daß sie sich äußerst leicht verschieben und voneinander trennen lassen; luftförmig solche, deren Teilchen einen Zusammenhang kaum erkennen lassen, vielmehr das Bestreben äußern, sich immer weiter voneinander zu entfernen.

Der Zusammenhang der Moleküle eines Körpers heißt Kohäsion,¹⁾ die Erscheinung, daß die Moleküle der luftförmigen Körper jeden ihnen dargebotenen Raum ausfüllen, Expansion.²⁾

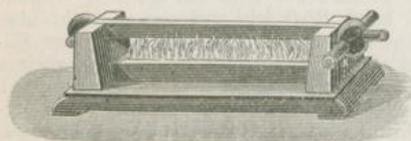
Die Ursachen der Kohäsion und Expansion erkennt man in anziehenden und abstofsenden Kräften, welche in unmeßbar kleinen Entfernungen zwischen den Molekülen der Körper wirksam sind: Molekularkräfte.

Bem. Die beiden Ausdrücke Kohäsion und Expansion werden auch für die Molekularkräfte (Kohäsionskraft und Expansivkraft) selbst gebraucht.

Gewisse Erscheinungen des täglichen Lebens lassen schließen, daß die Stärke der Molekularkräfte sich mit der Temperatur der Körper ändert. Stark erhitzte Wasserdämpfe z. B. können Maschinen treiben, heftige Explosionen bewirken u. s. w.; eiserne Reifen vermögen, wenn sie glühend um geborstene Türme, Räder oder dergl. gelegt und dann abgekühlt werden, bei ihrer Zusammenziehung große Widerstände zu überwinden.

Versuch. Läßt man eine beinahe bis zum Glühen erhitzte Eisen-

Fig. 179.



stange, welche an ihren Enden mittelst eines starken gußeisernen Bolzens und einer Schraube in einem eisernen Gestell (Fig. 179) befestigt ist, genügend erkalten, so zieht sie sich so kräftig zusammen, daß der Bolzen zerbricht.

Durch Wärme werden die anziehenden Molekularkräfte geschwächt, die abstofsenden verstärkt; Abkühlung bewirkt das Gegenteil.

1) cohaerere, zusammenhängen. — 2) expandere, auseinandertreiben.

Je nachdem die anziehenden oder abstofsenden Kräfte im Innern eines Körpers überwiegen, ist der Körper fest oder luftförmig. Sind beide Kräfte nahezu im Gleichgewichte, so erscheint der Körper flüssig. Der Aggregatzustand eines Körpers ist demnach von dem Verhältnis abhängig, in welchem die Molekularkräfte hinsichtlich ihrer Stärke zu einander stehen.

Luftförmige Körper, welche bei der gewöhnlichen Temperatur und dem gewöhnlichen Drucke auch im flüssigen Zustande vorkommen, werden als Dämpfe, die übrigen als Gase bezeichnet. (Wasserdämpfe, dagegen Sauerstoff-, Wasserstoff- und Kohlen säure gas.)

Gase lassen sich wie Dämpfe durch sehr starke Abkühlung, wenn sie zugleich einem starken äußeren Drucke ausgesetzt werden, zu Flüssigkeiten verdichten. Durch einen Druck von mehreren hundert Atmosphären (ebensoviel kg auf 1 qcm) und eine Kälte von mehr als -100° C ist es gegen Ende des Jahres 1877 gelungen, selbst diejenigen Gase, welche bis dahin für permanent („unbezwänglich“) gehalten wurden, nämlich Wasserstoff und die Bestandteile der atm. Luft (Stickstoff und Sauerstoff), in Flüssigkeiten zu verwandeln.

Übungsstoff. 1. Vgl. Eis, W. und Wasserdampf hinsichtlich der Stärke der in denselben wirksamen Molekularkräfte miteinander. — 2. Was sollte man nach dem Verhältnis, in welchem die Molekularkräfte in Flgkn. zu einander stehen, in betreff der Zusammendrückbarkeit flüssiger K. eigentlich erwarten, u. w.? — 3. Wodurch läßt sich das Verhältnis der Molekularkräfte in einem K. leicht ändern? (Beispiele!) — 4. Nenne ein Metall, in welchem bei gewöhnlicher Temp. die anziehenden und abstofsenden Molekularkräfte nahezu im Glgew. sind. — 5. Desgl. feste K., in denen die abstofsenden Molekularkräfte durch Erhitzung der K. plötzlich und sehr heftig wirken. Anwendung! — 6. Welches K. bedient man sich, um mittelst desselben durch Molekularkraft andauernd mechanische Arbeiten zu verrichten? — 7. Inwiefern kann man sagen, daß die abstofsenden Molekularkräfte bei luftf. K. durch die ganze Masse, bei Flgkn. aber nur an der Oberfläche überwiegen? — 8. Wodurch kann man bewirken, daß die abstofsenden Molekularkräfte bei einer Flgk. auch in deren Innerem überwiegen? — 9. Bei welchem sehr bekannten festen K. bewirken die abstofsenden Molekularkräfte leicht eine Verdunstung? — 10. Angenommen, der in Fig. 179 dargestellte Eisenstab lasse sich durch Belastung von 12 Ctr. um ebensoviel verlängern, als er sich bis zum Zerschneiden des Bolzens verkürzte; was würde daraus folgen? — 11. Die Anwendung der Molekularkraft zum Betriebe von Maschinen erfordert eine sorgfältige Überwachung derselben. Zu diesem Zwecke wird der Dampfkessel vor dem ersten Gebrauche der Maschine durch Wasserdruck mittelst Druckpumpe auf seine Stärke geprüft. (Sicherheitsventil.) a. Warum ist solche Vorsicht nötig? b. Wodurch können die im Dampfe wirkenden Kräfte in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten (gleichsam gezügelt) werden?

§ 53. Verschiedenheit der Kohäsion fester Körper.
Elasticität und Festigkeit. Vergleicht man die festen Körper miteinander in Bezug auf das Verhalten, das sie bei einer Verschiebung ihrer Teilchen äußern, so ergeben sich wichtige Unterschiede. Während harte Körper, z. B. Eisen oder Stahl, äußere Eindrücke schwer annehmen, lassen sich weiche Körper, wie Thon, Wachs oder dergl., leicht zusammendrücken. Spröde Körper, wie z. B. Glas und Siegelack von gewöhnlicher Temperatur, zerspringen leicht, wenn man sie biegt, während zähe Körper, wie stark erhitztes Glas, erwärmtes Siegelack u. dergl., leicht jede Veränderung ihrer Gestalt erleiden, ohne den Zusammenhang zu verlieren. Besonders wichtig ist das Verhalten elastischer Körper, das z. B. bei gewundenen Stahldrähten, dünnen

Stahlstäben, sehr dünnen Glasfäden, Kautschuk u. dgl. sehr auffällig hervortritt, wenn man die Körper biegt oder streckt und dann wieder losläßt.

Die Kraft, mit welcher ein Körper nach einer durch äußere Kräfte hervorgerufenen Änderung seiner Gestalt die ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen strebt, wird Elasticität genannt.

Je nachdem die Gestalt eines elastischen Körpers nach der Einwirkung der äußeren Kraft mit der ursprünglichen Gestalt desselben genau übereinstimmt oder nicht, heißt der Körper *vollkommen* oder *unvollkommen elastisch*. Die festen Körper sind nur innerhalb gewisser Grenzen (Elasticitätsgrenzen) vollkommen elastisch. Wird ihre Gestalt über diese Grenzen hinaus verändert, so kehren die Teilchen nicht wieder in die ursprüngliche Lage zurück; es erfolgt entweder eine bleibende Formveränderung oder eine plötzliche Trennung der Teilchen, indem der Körper zerreißt, zerbricht u. s. w. Körper, welche ihre Elasticitätsgrenze schon nach einer geringen Gestaltsänderung erreichen und die veränderte Form beibehalten, wie z. B. Blei, heißen *unelastisch*. — Flüssigkeiten und Gase nehmen nach einem auf sie ausgeübten Drucke ihren ursprünglichen Raum immer genau wieder ein und können daher als vollkommen elastisch bezeichnet werden.

Die Elasticität findet sowohl in der Natur, als im praktischen Leben wichtige Anwendungen. Da das Knochengerüst des menschlichen und tierischen Körpers (besonders im jugendlichen Alter) sehr elastisch ist, so werden Erschütterungen und Stöße, welchen der Körper beim Laufen, Springen u. dgl. ausgesetzt ist, bedeutend abgeschwächt. Im praktischen Leben pflegt man zu demselben Zwecke Federn von Stahl anzuwenden, z. B. bei den zur Personenbeförderung dienenden Fuhrwerken, in den Polstern mancher Möbeln u. s. w. In Taschenuhren, Spieldosen u. dgl. benutzt man die Elasticität als bewegende Kraft, indem man eine gewundene Feder spannt und diese auf das Räderwerk einwirken läßt. Als Druckkraft wirkt die Elasticität z. B. in Thür- und Gewehrschlössern, an den Klappen mancher Blasinstrumente u. s. w. — Anwendung der Elasticität zur Bestimmung der Gewichte des Körper, sowie zum Messen von Druck- und Zugkräften (Federwage, Dynamometer).

Für die Maschinen- und Bautechnik ist die genaue Kenntnis der Elasticitätsgrenzen der zu verwendenden Materialien ganz besonders wichtig (Bau von Eisenbahnbrücken u. dgl.), da dieselben niemals so stark belastet werden dürfen, daß die Elasticitätsgrenze erreicht wird. Man unterscheidet in der Technik eine vierfache Art der Elasticität: Zug-, Druck-, Biegungs- und Drehungs- oder Torsions-Elasticität, je nachdem die Belastung den elastischen Körper in die Länge zu ziehen sucht oder ihn zusammendrücken, zu biegen oder zu drehen strebt.

Da die Kohäsion der Körper von der Temperatur derselben abhängig ist, so muß eine Temperaturveränderung der Körper auch eine Änderung der durch die Kohäsion bedingten Eigenschaften zur Folge haben. Dies wird durch die Erfahrung bestätigt. Die härtesten Metalle erweichen im Feuer; Glas läßt sich, wenn es stark genug erhitzt ist, beliebig gestalten, während es bei gewöhnlicher Temperatur spröde ist u. s. w. Bei manchen Körpern, wie beim Stahl und dem Glase, bewirkt eine starke und schnelle Abkühlung eine bedeutende Härte und Sprödigkeit. Stählerne Werkzeuge erlangen auf diese Weise den zu ihrem Gebrauche nötigen Härtegrad. Die bekannten Glastränen und die Bologneser Flaschen erhalten ihre merkwürdigen Eigenschaften durch schnelle Abkühlung der geschmolzenen Glasmasse in kaltem Wasser oder in der Luft. (*Versuch!)

Um Glaswaren mäfsig hart (möglichst haltbar) zu machen, bringt man sie unmittelbar nach ihrer Herstellung in sogen. Kühlöfen oder taucht sie in heifse Flüssigkeiten. Glasfäden (Glaswolle) und Spiralen von Glas sind auferordentlich elastisch.

Den Widerstand, welchen ein fester Körper der Trennung seiner Teilchen entgegensetzt, bezeichnet man als Festigkeit. Je nach der Art dieses Widerstandes unterscheidet man eine vierfache Festigkeit und zwar nennt man den Widerstand gegen das Zerreißen **Zug-** oder **absolute Festigkeit**, den Widerstand gegen das Zerbrechen **Bruch-** oder **relative Festigkeit**, den Widerstand gegen das Zerdrücken **Druck-** oder **rückwirkende Festigkeit** und den Widerstand gegen das Zerdrehen **Drehungs-** oder **Torsionsfestigkeit**.

Nach der Erfahrung ist die Festigkeit eines Körpers nicht allein von der Beschaffenheit seines Stoffes, sondern auch von seiner Form und Ausdehnung abhängig. In letzterer Beziehung sind folgende Sätze wichtig:

1. *Die Zugfestigkeit wächst wie der Querschnitt des Körpers.* Um z. B. einen Eisendraht zu zerreißen, ist eine 2-, 3-, 4-... mal so grofse Kraft erforderlich, wenn der Querschnitt desselben 2-, 3-, 4-... mal gröfser genommen wird; die Länge ist ohne Einfluß auf die Zugfestigkeit.

2. *Die Bruchfestigkeit eines an beiden Enden unterstützten rechteckigen Balkens wächst ebenso wie die Breite, aber wie das Quadrat der Höhe des Querschnittes; sie steht ferner im umgekehrten Verhältnis zur Länge des Balkens.* Wird ein Balken z. B. 2-, 3-, 4-... mal so breit genommen, so kann er 2-, 3-, 4-... mal soviel tragen; wird er im Querschnitt aber 2-, 3-, 4-... mal so hoch genommen, so kann er 4-, 9-, 16- mal soviel tragen; bis 2-, 3-, 4- facher Länge kann er nur $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ der vorigen Belastung tragen.

3. *Die Druckfestigkeit wächst wie der Querschnitt des Körpers, nimmt aber mit der Höhe ab.* Hohle Pfeiler und Säulen haben eine gröfsere Druckfestigkeit als massive, wenn beide aus demselben Stoffe bestehen und Höhe und Gewicht bei beiden gleich sind. Verhältnismäfsig hohe Körper biegen sich nach der Seite aus und zerbrechen dann.

4. *Die Torsionsfestigkeit ist von der Form der Körper abhängig und bei hohlen Körpern bedeutend gröfser als bei massiven.* Dasselbe mufs z. B. bei dem Bau von Radwellen berücksichtigt werden.

Übungstoff. 1. Welche auf die Festigkeit und Elasticität bezüglichen Eigenschaften zeigt Glas bei gewöhnlicher und bei sehr hoher Temp., nach plötzlicher und nach allmählicher Abkühlung, bei gewöhnlicher Stärke und wenn es sehr dünne Fäden bildet? — 2. Vgl. Stahl und Blei, ferner Thon und Kautschuk hinsichtlich ihrer von der Kohäsion abhängigen Eigenschaften miteinander. — 3. Glas läfst sich mit einem Diamant, Eisen mit Glas, Kupfer mit Eisen und Blei mit Kupfer ritzen. Was folgt hieraus betreffs der Härte dieser K.? — 4. Es ist eine sehr wichtige Regel der Maschinen- und Bautechnik, elastische K., welche einem starken Drucke oder Zuge ausgesetzt sind, niemals bis zu ihrer Elasticitätsgrenze zu belasten; w.? — 5. Unterschied zwischen den Stößen beim Gehen auf Stelzen und auf den Füfsen? Erkl.! — 6. Warum sollen beim Springen die Zehen und nicht die Hacken den Boden zuerst berühren? — 7. Welche bekannte Ersch. zeigt sich, wenn man

kleine scheibenförmige Steine kräftig in sehr schräger Richtung auf Wasser wirft. Grund! — 8. An einem Baugerüste werde ein Stein hinaufgezogen. Ist die Gefahr, daß das Seil zerreißt, anfangs größer, oder wenn der Stein nahezu oben ist (gleichmäßige Beschaffenheit des Seiles vorausgesetzt)? Grund! — 9. Kreisflächen verhalten sich wie die Quadrate ihrer Durchmesser zu einander. Wievielmals schwerer zerreißt hiernach ein Eisendraht von 3 mm als ein anderer von 1,5 mm Dicke? — 10. Tragen gleichdicke Balken bei gleicher materiellen Beschaffenheit und gleicher Länge mehr, wenn ihr Querschnitt quadratisch oder wenn er rechteckig ist, u. w.? (Beispiel: Querschn. 576 qcm, Seiten 24 cm oder 18 und 32 cm.) — 11. Welche Form giebt man den Wagebalken, u. w.? — 12. Vorteile der Γ Form von Eisenbahnschienen und sogen. Υ Trägern, der Röhrenform von Eisenbahnbrücken, der hohlen Knochen und hohlen Halme der Gräser!

§ 54. Adhäsion. Kapillarität. Absorption.

1. Adhäsion. Daß die Massenteilchen der Körper einander anziehen, giebt sich nicht nur durch den Zusammenhang der Teilchen eines und desselben festen und flüssigen Körpers zu erkennen, sondern auch dadurch, daß verschiedene Körper bei gegenseitiger in- niger Berührung aneinander haften. Eis z. B. haftet mit großer Kraft an den Fensterscheiben, Siegellack haftet am Papier, Kreide an der Tafel, Staub an den Wänden, Tinte an der Feder, Wasser, Öl u. dgl. am Gefäße u. s. w. Auch läßt sich ein derartiges Anhaften der Luft nachweisen.

Versuch a. Werden gewisse Pflanzenblätter (z. B. von Rosen, Erdbeeren, Kohl, Kapuzinerkresse) in Wasser getaucht, so bleiben sie (manche nur an der Unterseite) wegen der daran haftenden Luft unbenetzt und zeigen durch die vollständige Zurückwerfung der Lichtstrahlen einen silberähnlichen Glanz (§ 99). — Oder: Füllt man den einen Schenkel einer 2—3 mm weiten, U förmigen, inwendig trockenen Glasröhre vorsichtig mit Wasser, so steigt dieses im anderen Schenkel wegen der am Glase haftenden Luft nicht bis zu gleicher Höhe.

Die Erscheinung, daß zwei Körper bei hinlänglicher Berührung aneinander haften, wird Adhäsion oder Flächenanziehung genannt.

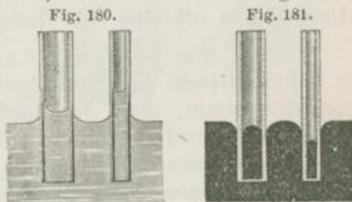
Als Ursache der Adhäsion ist die zwischen den Massenteilchen der sich berührenden Körper wirksame Anziehungskraft anzusehen. Adhäsionserscheinungen kommen bei den Körpern aller Aggregatzustände vor.

Da die Adhäsion eine Molekularwirkung ist, so müßte sie z. B. bei gleichartigen festen Körpern ebenso groß sein wie die Kohäsion. Daß dies meist nicht der Fall ist, hat seinen Grund teils in den Unebenheiten der Oberflächen, teils darin, daß eine Luftschicht auf den Körpern haftet, welche die innige Berührung verhindert. Wo diese Hindernisse beseitigt sind, da haften die Körper, mögen die Stoffe gleichartig oder verschieden sein, auch mit großer Kraft aneinander. In der Natur haben z. B. die aus Gesteinstrümmern oder dergl. zusammengesetzten Felsarten, wie Konglomerate, Sandstein u. s. w., durch bedeutenden Druck ein festes Gefüge erlangt. Unter den Kunstprodukten finden bei Glasspiegeln, ferner bei allen vergoldeten, versilberten, verzinkten, vernickelten Gegenständen u. s. w. infolge der unmittelbaren Berührung der ungleichartigen Stoffe starke Adhäsionswirkungen statt (inwiefern?). — Von den Flüssigkeiten adhäreren diejenigen besonders stark, welche auf festen Körpern erhärten, wie Leim, Gummi u. dgl. Flüssigkeiten adhäreren auch aneinander, selbst wenn sie sich nicht mischen, wie man z. B. an der Ausbreitung von Öltropfen auf Wasser sieht. — Luftförmige Körper werden

durch Adhäsion auf der Oberfläche fester Körper verdichtet und an denselben so festgehalten, daß es oft schwierig ist, eine derartige Gasschicht vollständig zu entfernen. Barometerröhren z. B. müssen, damit die inwendig am Glase haftende Luft ganz entweicht, mit Qu. gefüllt und darauf ausgekocht werden. Entfernt man von einer Fensterscheibe an einer Stelle die Lufthaut dadurch, daß man mit den Fingerspitzen darüber streicht, so werden die Züge durch Behauchen sichtbar (Hauchbilder).

2. Kapillarität. Kommen Flüssigkeiten mit sehr porösen festen Körpern in Berührung, so dringen sie gewöhnlich in die Körper ein und verbreiten sich in denselben. Hierbei steigen sie auch über dem Flüssigkeitsspiegel in den Poren hinauf. (Beispiele!) Diese Erscheinung kann jedoch, wie folgender Versuch zeigt, nur dann eintreten, wenn die Flüssigkeit den Körper benetzt, die Adhäsion zwischen dem festen Körper und der Flüssigkeit also größer ist als die Kohäsion der Flüssigkeit.

Versuch b. Werden 2 ziemlich enge Glasröhren von verschiedener Weite (Fig. 180 und 181) in Wasser getaucht, so steht die Flüssigkeit in beiden Röhren höher als im Gefäße und zwar am höchsten in der engeren Röhre, die Oberfläche der Flüssigkeit in der Röhre ist hohl oder konkav. Stellt man die Röhren in Quecksilber, so tritt das Umgekehrte ein: die Flüssigkeit steht in beiden Röhren tiefer als im Gefäße und zwar am tiefsten in der engeren Röhre; die Oberfläche der Flüssigkeit in den Röhren ist erhaben oder konvex. Beim Herausheben der Röhren haftet das Wasser überall am Glase, während das Quecksilber nur an einzelnen Stellen in sehr kleinen Tropfen daran hängen bleibt. — Entgegengesetztes Verhalten von Wasser und Quecksilbertropfen auf Glas.



Diese Erscheinungen erklären sich daraus, daß die Adhäsion zwischen Glas und Wasser größer ist als die Kohäsion des W., die Adhäsion zwischen Glas und Qu. hingegen kleiner ist als die Kohäsion des Qu.

Sehr enge Röhren werden Kapillarröhren¹⁾ oder Haarröhrchen genannt.

In einem Haarröhrchen steigt eine Flüssigkeit, welche das Röhrchen benetzt, um so höher hinauf, je enger das Röhrchen ist; findet eine Benetzung nicht statt, so steht die Flüssigkeit im eingetauchten Röhrchen um so tiefer unter dem Flüssigkeitsspiegel, je enger das Röhrchen ist: **Kapillaritätserscheinungen oder Haarröhrchenwirkungen.**

Wachs, Stearin, überhaupt Körper, deren Oberfläche fettig ist, werden vom Wasser nicht benetzt. Auf solchen Körpern bildet es in kleinen Mengen kugelförmige Tropfen, während es auf Glas, Holz u. s. w. auseinanderfließt. Beim Quecksilber findet eine Benetzung nur dann statt, wenn es mit Gold, Silber, Zink, Kupfer oder einzelnen anderen Metallen in Berührung kommt; Platin, Eisen, Glas, Holz und die meisten anderen Körper werden nicht davon benetzt.

Haarröhrchen kommen in großer Menge im Holz und Bast aller höheren Pflanzen vor. Im menschlichen und tierischen Körper verzweigen sich die Gefäße zu

¹⁾ capilla, Haar.

immer feineren Haarröhrchen und sind eben dadurch z. B. für eine reichliche Zufuhr und Verteilung der Ernährungsflüssigkeiten im Körper ganz besonders geeignet. In Schwämmen, Zucker, Löschpapier, dem lockeren Boden u. s. w. bilden die engeren Zwischenräume gleichsam Netze von Haarröhrchen.

Eine nützliche Anwendung findet die Kapillarität im täglichen Leben namentlich durch das Aufsaugen des Öles in den Dochten unserer Lampen, ferner beim Gebrauche von Schwämmen, Handtüchern u. dgl., beim Waschen der Kleidungsstücke, beim Dichten der Fugen von zusammengetrocknetem hölzernen Waschgerät u. s. w. — Um Gebäude in nassen Lagen gegen das Eindringen der Bodenfeuchtigkeit zu schützen, wird das Mauerwerk des Fundamentes mit Asphalt bestrichen. Schutz der Außenwände durch Ölfarbe oder Wasserglas.

3. Absorption. Die molekulare Anziehung, welche feste wie flüssige Körper auf die mit ihnen in Berührung stehenden Gase ausüben, bewirkt nicht nur eine Verdichtung des Gases an der Oberfläche der anziehenden Körper, sondern auch ein Eindringen in das Innere derselben und eine Verdichtung des eingedrungenen Gases. Hierbei tritt oft eine merkliche Temperaturerhöhung ein.

Unter den festen Körpern besitzt frisch ausgeglühte Holzkohle in hohem Grade das Vermögen, Gase zu absorbieren oder aufzusaugen. Platinschwamm, d. h. feinporöses Platin, vermag Wasserstoff so heftig aufzusaugen und in seinem Innern zu verdichten, daß derselbe sich dadurch entzündet (Wasserstoffzündmaschine). Flüssigkeiten saugen sehr leicht Gase auf. Wasser von gewöhnlicher Temperatur vermag ohne besonderen Druck einen gleichen Raumteil Kohlensäure zu verschlucken (Kohlensäuregehalt des Brunnenwassers); durch Anwendung eines starken Druckes läßt sich die Aufnahme bedeutend vergrößern (künstliche Herstellung von kohlensäurehaltigen Getränken). Wasser, das lange mit der atm. Luft in Berührung ist, saugt aus derselben sowohl Stickstoff als auch besonders Sauerstoff ein, sodaß die im Wasser aufgelöste Luft ungefähr $\frac{1}{2}$ und nicht wie die atm. Luft $\frac{1}{4}$ soviel Sauerstoff als Stickstoff enthält.

Am größten ist das Absorptionsvermögen des Wassers für Ammoniakgas, von welchem es bei 0° und dem Druck von einer Atmosphäre mehr als das 700 fache seines eigenen Volumens zu verschlucken vermag.

Die Adhäsionserscheinung, daß gasförmige Körper in die Poren fester und flüssiger Körper eindringen und hier festgehalten werden, wird Absorption¹⁾ genannt. Genaue Versuche lehren:

Die Menge des absorbierten Gases nimmt mit dem Drucke, welcher auf das Gas ausgeübt wird, zu und mit der Temperatur ab.
Im übrigen ist die Absorption von der Beschaffenheit beider sich berührenden Körper abhängig

Manche Körper, wie Kochsalz, Ackererde, Holz, Darmsaiten, entfettete Haare, konz. Schwefelsäure u. s. w., vermögen Wasserdämpfe aus der Luft leicht aufzusaugen, und werden deshalb hygroskopisch genannt.

Bem. Das Wort Absorption wird auch noch in weiterem Sinne gebraucht. Man sagt z. B., der Ackerboden absorbiere sowohl flüssige als luftförmige Nährstoffe der Pflanzen, ferner Kohle absorbiere im Wasser gelöste übel-

¹⁾ absorbëre, einsaugen, verschlucken.

riechende Stoffe, Farbstoffe u. dgl. Wegen dieser Eigenschaft wird Holzkohle zum Filtern von Trinkwasser, Knochenkohle zum Entfärben von Flüssigkeiten, zur Entkalkung von Zuckersäften in Zuckerfabriken u. s. w. benutzt.

Eine Aufsaugung gasförmiger Stoffe findet in den Körpern der lebenden Geschöpfe namentlich an allen denjenigen Oberflächen statt, welche mit der atm. Luft in unmittelbarer Berührung stehen, und deren Zellwände stark durchfeuchtet sind (Atmungsorgane). — Der von den Gewässern aus der Luft aufgenommene Sauerstoff ist den Kiementieren zur Atmung unentbehrlich. — Das in die Poren und Spalten der Gesteine eindringende Wasser nimmt Sauerstoff aus der Luft auf und bewirkt dadurch eine allmähliche Verwitterung selbst der härtesten Felsen. Im Ackerboden erlangt das Wasser durch die Aufsaugung von Kohlensäure ein größeres Vermögen, mineralische Bestandteile des Bodens aufzulösen und sie für die Pflanzenwurzeln zur Aufnahme geeignet zu machen.

Übungsstoff. 1. Erkläre die in Fig. 182 dargestellte Ersch. — 2. Warum tritt diese Ersch. um so weniger ein, je schräger das Gefäß gehalten wird? — 3. Erkläre die Wirkung von umgebogenen Gefäßrändern und Tüllen. — 4. Desgl., daß jene Ersch. bei wässerigen Flgkn. nicht leicht eintritt, wenn der Rand fettig ist. — 5. Beschreibung und Zweck des in Fig. 183 dargestellten Verfahrens! — 6. Warum werden Wasservögel nicht naß? — 7. Goldene Ringe werden weiß, wenn sie mit Qu. in Berührung kommen. Erkl.! — 8. Qu.-Tropfen lassen sich aus den Ritzen eines Fußbodens mit einem amalgamierten Zink- oder Kupferstreifen leicht auf sammeln; in welcher Weise? — 9. Führe Beispiele an, in denen von der Adhäsion Anwendung gemacht wird. — 10. Desgl. Fälle, in denen die Adhäsion belästigend wirkt. — 11. Warum müssen Wasserstandsrohre ziemlich weit sein, wenn sie den Flüssigkeitsstand richtig anzeigen sollen? — 12. Wenn man über den Rand eines mit W. gefüllten Gefäßes einen durchnästen Docht hängt, sodafs das eine Ende desselben ins W. eintaucht und das andere (äußere) tiefer liegt als der Wasserspiegel, so fängt der Docht nach einiger Zeit an zu tropfen. Erkl.! — 13. Zengleinen, Rouleauxschnüre u. dgl. sind bei feuchtem Wetter stärker gespannt. Erkl.! — 14. Wenn Papier mit Kleister bestrichen wird, so krümmt es sich. Nach welcher Seite? Erkl.! — 15. Zur Anfertigung bauchiger Fässer werden die Dauben auswendig angefeuchtet und innen erwärmt. Erkläre die Wirkung! — 16. Woraus kann man schließen, daß W. Kohlensäure absorbiert? — 17. Das Eis enthält gewöhnlich zahlreiche Luftblasen. Auf welche Eigenschaften des W. läßt sich dies zurückführen? — 18. Worin mag es seinen Grund haben, daß frisch ausgeglühte Kohle diese Eigenschaft in bedeutend höherem Grade besitzt als nicht ausgeglühte? — 19. Die auf Schiffen zur Aufbewahrung des Trinkwassers dienenden Fässer werden inwendig verkohlt; warum wohl?

Fig. 182.

Fig. 183.



§ 55. Diffusion der Flüssigkeiten und Gase. Da die als Adhäsion bezeichnete Anziehung sowohl zwischen den Körpern verschiedener Aggregatzustände, als auch zwischen den Körpern eines und desselben Aggregatzustandes stattfindet, so bleiben noch die Adhäsionswirkungen zu betrachten übrig, welche zwei Flüssigkeiten und zwei Gase aufeinander ausüben.

Die tägliche Erfahrung lehrt, daß gewisse Flüssigkeiten sich miteinander mischen lassen, andere nicht. Während z. B. Wasser und Weingeist oder Wasser und eine Kochsalzlösung nach und nach eine immer gleichmäßigere Mischung bilden, ordnen sich Wasser und Öl nach ihren spec. Gewichten und bleiben dauernd getrennt. Im letzteren Falle ist bei jeder der beiden Flüssigkeiten die Kohäsion stärker, im ersteren schwä-

cher als die zwischen denselben wirksame Adhäsion. Erscheinungen der ersteren Art treten, wie folgende Versuche zeigen, auch ein, wenn die Flüssigkeiten sich nur berühren, ja sogar dann noch, wenn sie durch eine Scheidewand getrennt sind, welche beide Flüssigkeiten aufzusaugen vermag.

Versuch a. Gießt man in einen Glascylinder zunächst etwas Wasser, das mit Lackmuskulösung blau gefärbt ist, und darauf etwa mit Hülfe einer ziemlich weiten Trichterröhre Salzsäure vorsichtig an den Boden des Gefäßes, so wird das specifisch leichtere Wasser gehoben und es tritt an der Berührungsstelle eine Rottfärbung ein, welche schon in kurzer Zeit merklich nach oben fortschreitet.

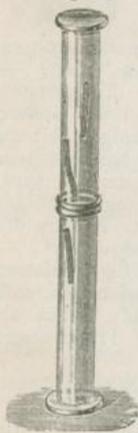
Fig. 184.



Versuch b. Ein kurzer Glascylinder oder eine sogen. Glaszelle (a, Fig. 184) werde am unteren Ende mit Tierblase oder Pergamentpapier sehr dicht verschlossen, darauf ganz mit einer gesättigten Lösung von Kupfervitriol gefüllt und, nachdem man in der oberen Mündung eine Glasröhre luftdicht befestigt hat, in Wasser aufgehängt. Nach kurzer Zeit steigt die Flüssigkeit in der Röhre hinauf und das Wasser im Gefäße fängt an sich bläulich zu färben.

***Versuch c.** Stellt man zwei gleichweite Glascylinder (Fig. 185), von denen der eine Kohlensäure, der andere atm. Luft und einige angefeuchtete Streifen von blauem Lackmuspapier enthält, so aufeinander, daß die spec. schwerere Kohlensäure sich unten befindet, so mischen sich die Gase allmählich miteinander. Das Lackmuspapier färbt sich dabei rot und zwar schon in kurzer Zeit, wenn die Cylinder in offener Verbindung stehen, nach längerer Zeit, wenn sie etwa durch eine Gipsplatte oder durch Pergamentpapier oder Tierblase voneinander getrennt sind. — Enthält der obere Cylinder Wasserstoff, der untere atm. Luft, und ist an letzterem statt des Fußes eine mit gefärbtem W. gefüllte Manometerröhre (U förmige Glasröhre) befestigt, so erfolgt ebenfalls eine Mischung der Gase, welche durch das Aufsteigen der Flüssigkeit im äußeren Schenkel der Röhre angezeigt wird.

Fig. 185.



Wenn zwei mischbare Flüssigkeiten oder zwei Gase sich unmittelbar berühren, oder durch eine dünne poröse

Wand von einander getrennt sind, so vermischen sie sich allmählich: Diffusion ¹⁾ oder Vermischung.

Die Diffusion zweier durch eine poröse Scheidewand voneinander getrennten Flüssigkeiten wird mit dem besonderen Namen Osmose ²⁾ bezeichnet.

Wärme begünstigt die Diffusion der Flüssigkeiten. — Die Flüssigkeiten wie die Gase diffundieren mit verschiedener Geschwindigkeit. Durch eine organische Haut (Membran) diffundieren von den Flüssigkeiten diejenigen, welche Krystallform annehmen können, wie Wasser, Lösungen von Salzen,

¹⁾ diffundēre, ausgießen. — ²⁾ ὀσμῶς (ōsmós), Stofs.

Zucker u. dgl. bedeutend schneller als die, welche nicht krystallisierbar sind und mit Wasser schleimige Massen bilden, z. B. Leim, Eiweiß, Gummi u. dgl. Hiervon macht man in der Zuckerfabrikation zur Gewinnung des Zuckers aus den Rüben praktischen Gebrauch. — Von den Gasen diffundiert Wasserstoff am schnellsten, atm. Luft diffundiert schneller als Kohlensäure, Stickstoff schneller als Sauerstoff.

In der Natur ist die Diffusion namentlich für die Vorgänge der Ernährung der Organismen von größter Bedeutung. Beim menschlichen und tierischen Körper gelangen die Nährflüssigkeiten durch Diffusion aus den Verdauungshöhlen in die Gefäße und aus diesen in die Gewebe; bei den Pflanzen dringen die flüssigen Nährstoffe durch Diffusion von außen in die Wurzeln, die luftförmigen Nährstoffe (Kohlensäure) aus den mit der freien Luft in offener Verbindung stehenden inneren Hohlräumen (Intercellularräume der Blätter), nachdem sie zunächst von der Feuchtigkeit der Zellwände absorbiert worden sind, in das Innere der Zellen. In ähnlicher Weise vollzieht sich auch der als Atmung bezeichnete Gasaustausch (Ausscheidung von Kohlensäure und Aufnahme von Sauerstoff) bei allen lebendigen Geschöpfen. Infolge von Diffusion ist der Gehalt der atmosphärischen Luft an Sauerstoff und Stickstoff (den beiden Gasen, aus welchen die atm. Luft zusammengesetzt ist) überall derselbe, nämlich 21% Sauerstoff und 79% Stickstoff. Die durch Atmung oder Verbrennung entstehenden Ungleichheiten gleichen sich allmählich wieder aus; die Winde und die Erwärmung der Luft durch die Sonne befördern diesen Ausgleich.

Übungsstoff. 1. Worin stimmen Kapillarität, Absorption und Diffusion überein, und wodurch unterscheiden sie sich? — 2. In allen höheren Pflanzen kommen zahlreiche Kapillarröhrchen vor, welche von Zellen umgeben sind. Wie läßt sich hiernach die Ersch. erklären, daß abgeschnittene Pflanzenteile (Blumen und beblätterte Zweige) sich lange frisch erhalten, wenn man sie in W. stellt, während sie sonst rasch welken? — 3. Welche von den beiden bei Versuch b angewandten Flgkn. diffundierte am schnellsten, und woraus war dies zu schließen? — 4. Bis zu welchem Zustande zweier Flgkn. kann die Diffusionsströmung sich fortsetzen? — 5. Um die Zuckersäfte aus den Rüben zu gewinnen, werden letztere zerschnitten und mit W. übergossen; letzteres wird mehrmals wiederholt. Welchen Vorteil bietet das Zerschneiden der Rüben? Warum ist es vorteilhafter, das W. öfters zu erneuern, als die ursprüngliche Wassermenge längere Zeit einwirken zu lassen? — 6. Wird ein in Scheiben zerschnittener Rettig mit Kochsalz bestreut, so „zieht er Wasser“, d. h. die Scheibenflächen werden feuchter, als sie vorher waren. Worin mag dies seinen Grund haben? — 7. Warum ändert W., in welchem längere Zeit Erbsen, Bohnen oder dergl. gelegen haben, namentlich bei höherer Temp. seinen Geschmack? — 8. In Weingeist schrumpfen weiche tierische Gewebe stark zusammen. Erkl.! — 9. Warum wurde bei Versuch c der Cylinder, welcher Kohlensäure enthielt, unter, der Wasserstoff enthaltende Cylinder dagegen über den mit Luft erfüllten Cylinder gestellt? — 10. Welchen Nachteil bringt die Diffusion bei der Füllung eines Luftballons mit Wasserstoff und warum ist bei der Füllung mit Leuchtgas dieser Nachteil nicht in demselben Grade vorhanden?

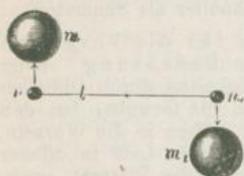
C. Allgemeine Massenanziehung oder Gravitation.

§ 56. Die früher besprochenen Erscheinungen der Schwere (§§ 4 und 6: Druck, Zug, freier Fall) können als die bekanntesten Äußerungen einer Anziehungskraft angesehen werden, welche zwischen den Massen aller im Weltraume vorhandenen Körper wirksam ist, und von welcher die als Schwerkraft bezeichnete Anziehungskraft der Erde nur einen besonderen Fall bildet.

Daß zwischen den Körpern der Erde eine solche Kraft wirkt, hat man aus verschiedenen Versuchen geschlossen. Ein in der Nähe eines freistehenden Berges aufgehängtes Lot hängt nach der Seite des Berges

hin etwas schräg, wie man wiederholt durch Versuche nachgewiesen hat (zum ersten Male 1738

Fig. 186.



am Chimborazo, dann 1774 am Shehallien in Schottland und später noch an verschiedenen anderen dazu geeigneten Bergen). Ferner haben mit großer Sorgfalt angestellte Versuche ergeben, daß ein sehr empfindliches Horizontalpendel (sogen. Drehwaage, l Fig. 186) aus seiner Gleichgewichtslage merklich gedreht wird, wenn man jedem Kugelchen des Pendels eine mehrere Centner schwere Bleikugel (m und m_1) sehr nahe bringt. Aus diesen Versuchen, die auch mit anderen Stoffen (Glas, Elfenbein u. s. w.) wiederholt wurden, muß man schließen, daß eine Anziehung zwischen allen Körpern der Erde vorhanden und daß diese eine gegenseitige ist; wenn man von dieser Anziehung in den meisten Fällen nichts wahrnimmt, so ist dies darin begründet, daß sie zu gering ist, um die Bewegungshindernisse zu überwinden. *Die Schwerkraft ist nur ein besonderer Fall dieser allgemeinen Massenanziehung*, der fallende Stein wird von der Erde angezogen, ebenso wie das Lot der Anziehung des Berges und das Kugelchen der Drehwaage der Anziehung der verhältnismäßig großen Gewichte folgt. *Die Anziehung zwischen der Erde und den irdischen Körpern ist eine gegenseitige und der Erdmittelpunkt nur scheinbar der Sitz der Schwerkraft*, da eine Kugel von gleichmäßiger Dichte einen außerhalb derselben befindlichen Körper ebenso anzieht, als ob ihre ganze Masse in ihrem Mittelpunkte vereinigt wäre.

Schon etwa 100 Jahre früher, ehe diese gegenseitige Anziehung für die Körper der Erde nachgewiesen wurde, war durch astronomische Berechnungen von Newton (1682) der Beweis geführt worden, daß die Himmelskörper sich gegenseitig anziehen. Nachdem es Newton gelungen war, die Bewegung der Planeten aus der Annahme einer mit dem Quadrate der Entfernung abnehmenden Anziehung zwischen Sonne und Planeten zu erklären, fand er ferner, daß es ein und dieselbe Kraft ist, welche den fallenden Stein zur Erde zieht, den Mond in seiner Bahn erhält und überhaupt die Bewegungen der Himmelskörper im Weltenraume regelt (§ 75).

Alle Körper ziehen einander an. Die Anziehungskräfte verhalten sich gradeso wie die anziehenden Massen und umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen: Newtons Gravitationsgesetz.¹⁾

In Zeichen: $P : P_1 = M : M_1$, wenn die Entfernungen (E und E_1) gleich sind,
 $P : P_1 = E^2 : E_1^2$, „ „ Massen (M und M_1)

Beispiel: Die Anziehung ist 2-, 3-, 4-... mal so groß, wenn die Masse bei gleichen Entfernungen das 2-, 3-, 4-... fache beträgt, aber nur $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{16}$... so groß, wenn die Entfernung bei gleichen Massen 2-, 3-, 4-... mal so groß ist.

Daß wir trotz der gegenseitigen Anziehung beim freien Falle, z. B. eines Steines, nur eine Bewegung des Steines gegen die Erde, nicht aber eine Bewegung der Erde gegen den Stein hin wahrnehmen, findet seine Erklärung in den ungleichen Massen der beiden Körper. Die Bewegung

1) grāvitas, die Schwere.

der Erde ist sovielmal kleiner als die des Steines, als ihre Masse größer ist, d. h. also: sie ist so gut wie gar nicht vorhanden.

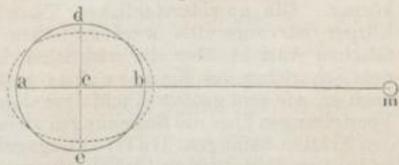
Die Wirkung der Schwerkraft nimmt von den Polen nach dem Äquator hin ab. Dies hat seinen Grund theils darin, daß die Erde an den Polen abgeplattet ist, theils in dem Einflusse der Centrifugalkraft der Erde (§ 76). Die Feder einer sehr empfindlichen Federwage würde demnach durch denselben Körper in der Nähe der Pole stärker zusammengedrückt werden als in den Äquatorgegenden. (Dieser Gewichtsunterschied beträgt für 1 kg ungefähr 5 g; der Radius des Poles ist nahezu um $\frac{1}{25}$ kleiner als der des Äquators.) Auch von der Oberfläche der Erde nach dem Innern hin muß die Schwere abnehmen.

Masse und Gewicht. Nach der Annahme, daß alle Körper aus kleinsten Teilchen zusammengesetzt sind, ist das Gewicht eines Körpers gleich der Summe der Druck- oder Zugwirkungen aller Massenteilchen desselben. Ist der Stoff zweier Körper verschieden, so hat bei gleicher Anzahl der Massenteilchen derjenige Körper das geringste Gewicht, dessen Massenteilchen am leichtesten sind. Die Massen zweier Körper können somit nach dem Gewichte derselben miteinander verglichen werden; Masse und Gewichte sind einander proportional. — Die Zahlen, welche das Gewicht der Raumeinheit, also das spec. Gewicht der Körper ausdrücken, sind hiernach zugleich der Ausdruck für die Masse der Raumeinheit oder die Dichte der Körper.

Mit Hilfe der oben genannten Drehwage (Fig. 186) ist es nach den sehr genauen Versuchen, die von Cavendish (1797), Reich (1835) und anderen angestellt worden sind, möglich gewesen, die Dichte der Erde zu berechnen. Es ergab sich die Zahl 5,6., die der Dichte des Magnetseisens sehr nahe kommt, woraus geschlossen werden muß, daß das Erdinnere aus erheblich schwereren Gesteinen besteht, als die Erdoberfläche.

Übungsstoff. 1. Woraus folgt, daß Rauminhalt und Gew. der K. streng genommen veränderliche Größen sind? — 2. Ein und derselbe K. werde an Orten, welche auf derselben Erdhälfte von Norden nach Süden sehr weit auseinanderliegen, in Meereshöhe gewogen a. mittelst einer Hebelwage, b. mittelst einer Federwage. Beide Wagen seien äußerst empfindlich. Ergebnis? Grund! — 3. Am Boden eines tiefen Schachtes wird ein K. offenbar von einem Teile der Erdmasse nach dem Erdmittelpunkte, von dem übrigen Teile in entgegengesetzter Richtung angezogen. Einfluß a. auf das Gew. des K., b. auf den Gang einer in derselben Tiefe aufgehängten Pendeluhr. — 4. Im Mittelpunkte der Erde muß jeder K. gewichtslos erscheinen; warum wohl? — 5. Welches Gew. würde ein K., der an der Erdoberfläche 1 kg wiegt, an einem Punkte haben, welcher a. um die einfache, b. um die doppelte Länge des Erdradius von der Erde entfernt ist? — 6. Die Masse des Mondes beträgt etwa $\frac{1}{80}$ der Erdmasse. Wie groß ist darnach die Schwerkraft des Mondes im Vergleich zur Schwerkraft der Erde in einem Punkte, der vom Centrum des Mondes um die Länge des Erdradius entfernt ist? — 7. Wie groß ist dieselbe an der Oberfläche des Mondes, wenn der Monddurchmesser $\frac{1}{11}$ des Erddurchmessers beträgt? — 8. Wie groß ist die Schwerkraft an der Oberfläche der Sonne im Verhältnis zur Schwerkraft der Erde, wenn die Masse der Sonne ungefähr 350 000 mal so groß ist als die der Erde und der Halbmesser der Sonne zu 112 Erdhalbmessern angenommen wird? — 9. Wie schwer würde hiernach ein K. von 1 kg Gew. auf einer Federwage erscheinen müssen, wenn statt der Erdanziehung eine Kraft wirkte, welche a. der Schwerkraft des Mondes, b. der Schwerkraft der Sonne gleich wäre? — 10. Die Ebbe und Flut, d. h. das täglich zweimal eintretende Fallen und Steigen des Meeres, hängt hauptsächlich von der Stellung ab, welche der Mond gegen einen Ort der Erde einnimmt (Fig. 187). Es tritt an einem

Fig. 187.



Orte im Weltmeere Flut ein, wenn der Mond seine höchste Stellung für den Ort eingenommen hat, und wenn er sich (12 St. 25 Min. später) auf der gerade entgegengesetzten Seite der Erde befindet, Ebbe dagegen, wenn der Mond auf- oder untergeht. Versuche dies zu erklären. — 11. Die Entfernungen des Mondes von der Erde sind verschieden. Welchen Einfluß muß dies auf die Höhe der Flut ausüben, u. w.? — 12. Stehen Sonne und Mond an derselben oder an entgegengesetzten Seiten der Erde, so ist die Flut am größten. Erkl.! — 13. Wie müssen sich die im Winter, wenn die Sonne uns näher ist, zur Zeit des Voll- und Neumondes entstehenden Fluten zu den Fluten verhalten, welche im Sommer entstehen, wenn die Sonne weiter entfernt ist? Grund! — 14. Wie mag es sich erklären, daß z. B. in der Nordsee die Fluten bedeutend später eintreffen, als man nach der Zeit ihrer Entstehung in der offenen See und nach der anfänglichen Geschw. ihres Fortschreitens (ungefähr 120 geogr. Meilen in einer Stunde) erwarten sollte?

II. Abschnitt.

Mechanik.

(I. Lehrstufe, §§ 7—21.)

A. Von den festen Körpern.

a. Bewegungen und Kräfte im allgemeinen.

§ 57. Ruhe und Bewegung. Arten der Bewegung. Geschwindigkeit. Beschleunigung. Nach unseren Beobachtungen befinden sich die Körper im Zustande der **Ruhe**, d. h. *sie ändern ihre Lage im Raume nicht*, oder im Zustande der **Bewegung**, d. h. *wir nehmen eine Veränderung ihrer Lage wahr*. Bei der Beurteilung, ob ein Körper sich im Zustande der Ruhe oder der Bewegung befindet, beziehen wir die Lage des Körpers auf seine Umgebung. Hierbei sind wir mancherlei Täuschungen ausgesetzt. So erscheint uns z. B. ein Gebäude gewöhnlich in Ruhe, obgleich es an der Umdrehung der Erde um ihre Achse, wie auch an der Bewegung der Erde um die Sonne teilnimmt; fahren wir in einem Eisenbahnzuge sehr schnell daran vorüber, so scheint es sich zu bewegen (relative Ruhe und Bewegung).

Wie schwer es in manchen Fällen ist, zu einer richtigen Erkenntnis darüber zu gelangen, welcher von zwei Körpern, die ihre gegenseitige Lage ändern, der ruhende oder der bewegte sei, zeigen namentlich die Bewegungen der Himmelskörper. Die unwiderstehlichen Täuschungen, welche bei der Beobachtung dieser Körper hervorgerufen werden, haben die Menschheit Jahrtausende lang in einer falschen Ansicht über die wirklichen Bewegungsvorgänge derselben erhalten. Erst dem Scharfsinn des Kopernikus gelang es, diese Täuschungen nachzuweisen; aber auch er, wie sein großer Nachfolger Johann Kepler waren teilweise noch in falschen Vorstellungen über die Beziehungen zwischen den Bewegungen und den sie verursachenden Kräften befangen. Galilei dagegen erkannte dieses Verhältnis richtig und sprach es in dem **Gesetz der Trägheit** aus (vergl. § 3). Nach diesem haben wir nicht in der unveränderten Fortdauer, sondern gerade in der Veränderung

einer schon bestehenden Bewegung oder in der Entstehung einer neuen die Wirkung einer Kraft zu erkennen.

Die Bahn des bewegten Körpers, d. h. der Weg, welchen der Körper bei seiner Bewegung zurücklegt, ist geradlinig oder krummlinig; die Bewegung selbst kann eine fortschreitende oder drehende sein. Mit Bezug auf die in gleichen Zeiten durchlaufenen Strecken läßt sich eine gleichförmige und eine ungleichförmige Bewegung unterscheiden.

1. Gleichförmige Bewegung. *Legt ein Körper in gleichen aufeinander folgenden Zeiteilchen, so klein dieselben auch sein mögen, immer gleiche Wege zurück, so wird seine Bewegung gleichförmig genannt.* (Beispiel: Die Bewegung eines Eisenbahnzuges ist auf ebener Strecke einige Zeit nach der Abfahrt annähernd gleichförmig.)

Als vollkommen gleichförmig kann die Bewegung angesehen werden, welche die Erde ausführt, indem sie sich um ihre Achse dreht. Die sichtbaren Bewegungen der Körper auf der Erde weichen mehr oder weniger von der Gleichförmigkeit ab.

Die Gröfse oder Stärke einer Bewegung wird durch die **Geschwindigkeit** gemessen, mit der ein Körper sich bewegt, d. h. durch den *Weg, welchen der Körper in 1 Sekunde zurücklegt.* Man sagt, ein Eisenbahnzug habe eine Geschwindigkeit von 10 m, wenn er in jeder Sekunde eine Strecke von 10 m zurücklegt.

Bei einer gleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit immer dieselbe; man findet daher den Weg, welchen der Körper innerhalb einer gewissen Zeit zurücklegt, wenn man seine Geschwindigkeit mit dieser Zeit multipliziert.

Wenn c (celeritas) die Geschwindigkeit, t (tempus) die Zahl der Sekunden und s (spatium) die innerhalb dieser Zeit zurückgelegte Strecke bedeutet, so ist:

$$s = ct; \quad c = \frac{s}{t}; \quad t = \frac{s}{c}.$$

Da die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers streng genommen während der ganzen Dauer der Bewegung niemals genau dieselbe bleibt, so ist unter Geschwindigkeit auch bei solchen Körpern, welche sich gleichförmig zu bewegen scheinen, stets die mittlere Geschwindigkeit zu verstehen, also der Weg, welchen man erhält, wenn man den während einer längeren Zeit zurückgelegten Weg durch die Zahl der Sekunden dividiert.

Mittlere Geschwindigkeiten.

Guter Fußgänger . . . 1,5 m	Schnellzug . . . 16—22 m	Sturm 17—28 m
Pferd im Trab . . . 2 „	Brieftaube . . . 20—35 „	Schall in der Luft 340 „
Rennpferd 10 „	Schwacher Wind 0,5—4 „	Büchsenkugel . . . 400 „
Dampfschiff 5 „	Gewöhl. „ 4—11 „	Punkt am Erdäquat. 464 „
Gew. Personenzug 8—10 „	Starker „ 11—17 „	Erde um die Sonne 29,8 km

2. Ungleichförmige Bewegung. *Legt ein Körper in gleichen Zeiten ungleiche Wege zurück, so ist seine Bewegung eine ungleichförmige. Je nachdem die Wege in den aufeinander folgenden gleichen Zeiten immer größer oder kleiner werden, nennt man die ungleichförmige Bewegung beschleunigt oder verzögert.* (Beispiel: Eisenbahnzug bei Beginn und gegen Ende der Fahrt, frei fallender und aufwärts geworfener Stein). Bei einer beschleunigten Bewegung nimmt

somit die Geschwindigkeit zu, bei einer verzögerten Bewegung hingegen ab. Beides kann regelmässig oder auch unregelmässig erfolgen. Der einfachste Fall ist offenbar derjenige, bei welchem die Zu- oder Abnahme der Geschwindigkeit immer dieselbe bleibt. Nur dieser Fall soll in folgendem berücksichtigt werden.

Angenommen, ein Eisenbahnwagen erlange auf horizontaler Bahn, ohne dass die Bewegungswiderstände sich änderten, durch die unveränderlich wirkende Dampfkraft in 1 Sek. eine Geschw. von 20 cm, sodass er also ohne Dampf und ohne Bewegungshindernisse vermöge der Trägheit seiner Masse in jeder folgenden Sekunde einen Weg von 20 cm zurücklegen könnte. Wirkte dann die Dampfkraft immer mit derselben Stärke weiter, so müsste die *Geschwindigkeit* des Wagens, wenn auch die Widerstände der Bewegung immer dieselben bleiben, sich offenbar in jeder folgenden Sekunde um ebensoviele vergrössern als in der 1. Sek. Die Geschw. würde somit nach 2 Sek. $2 \times 20 = 40$, nach 3 Sek. $3 \times 20 = 60$, nach 4 Sek. $4 \times 20 = 80$ cm betragen (*Endgeschwindigkeiten der einzelnen Sekunden.*). — Wirkte auf den Wagen, nachdem er eine bestimmte Geschw. erlangt hat, statt der treibenden Kraft eine ebenso grosse hemmende Kraft unverändert ein, so würde seine Geschwindigkeit in derselben Weise abnehmen, wie sie vorher zunahm.

Der bei einer beschleunigten Bewegung während einer Sekunde erfolgte Zuwachs an Geschwindigkeit heisst Beschleunigung. Bleibt die Beschleunigung immer dieselbe, so wird die Bewegung gleichmässig beschleunigt genannt.

Eine Bewegung, bei welcher die Geschwindigkeit des bewegten Körpers in jeder Sekunde um ein Gleiches abnimmt, heisst gleichmässig verzögerte Bewegung.

Bei einer gleichmässig beschleunigten Bewegung wachsen die Geschwindigkeiten wie die Zeiten.

Wenn v (velocitas) die Endgeschw., g (gravitas) die Beschleunigung und t die Anzahl der Sekunden ausdrückt, so ist in Zeichen:

$$v = t \cdot g.$$

Unter Geschwindigkeit einer ungleichförmigen Bewegung für einen bestimmten Zeitpunkt ist derjenige Weg zu verstehen, welchen der bewegte Körper von diesem Zeitpunkte ab in 1 Sek. zurücklegen würde, wenn er sich ohne weitere Einwirkung der Kraft gleichförmig weiter bewegte.

Zur Bestimmung des *Weges* denken wir uns eine Sekunde in eine möglichst grosse Anzahl gleicher Zeiteilchen geteilt. Dann muss unter den obigen Voraussetzungen die Geschw. offenbar wie vorhin am Ende des zweiten Zeiteilchens doppelt, am Ende des dritten 3mal, am Ende des vierten 4mal so gross sein als am Ende des ersten Zeiteilchens u. s. w.; $\frac{1}{2}$ Sek. nach Beginn der Bewegung muss daher die Geschw. des Wagens die Hälfte von der Endgeschw. der 1. Sek. betragen (*mittlere Geschwindigkeit der 1. Sek.*). Stellt man sich ferner vor, in demselben Augenblicke, in welchem der Wagen seine Bewegung beginnt, treffe neben ihm ein anderer, in der gleichen Richtung fahrender Wagen

mit einer Geschw. ein, welche jener mittleren Geschw. (10 cm) gleich ist, und dieser setze seine Bewegung unverändert fort, so würde der 2. Wagen dem ersten zwar zunächst vorausseilen, aber von diesem schon nach 1 Sek. wieder eingeholt sein, denn um ebensoviel, wie die Geschw. des ersten Wagens im ersten, zweiten . . . Zeiteilchen der 1. Sek. kleiner ist als die Geschw. des zweiten Wagens, ist sie im letzten, vorletzten . . . Zeiteilchen größer. Beide Wagen legen demnach in der 1. Sek. einen gleichen Weg (10 cm) zurück. Man erhält somit für die ersten

beiden Sek. eine mittlere Geschw. von 20 cm u. einen Weg von $2 \times 20 = 40 \text{ cm} = 2^2 \times 10 \text{ cm}$
 $3 \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad 30 \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad 3 \times 30 = 90 \quad \text{''} = 3^2 \times 10 \quad \text{''}$
 $4 \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad 40 \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad \text{''} \quad 4 \times 40 = 160 \quad \text{''} = 4^2 \times 10 \quad \text{''}$

Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung findet

man den Weg (s), welchen der bewegte Körper innerhalb einer gewissen Zeit zurücklegt, wenn man die Hälfte seiner Beschleunigung mit dem Quadrate dieser Zeit multipliziert.

$$\text{In Zeichen:} \quad s = t^2 \cdot \frac{g}{2}.$$

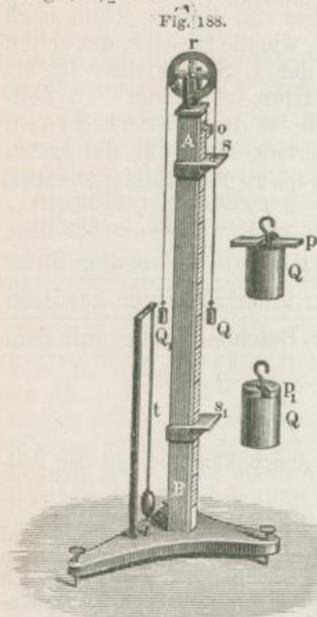
Die Richtigkeit dieser Folgerungen läßt sich durch Versuche mit der Fallmaschine bestätigen (siehe folgenden Paragraphen).

Übungsstoff. 1. In welchem Zustande befinden sich die Gegenstände auf einem Schiffe während der Fahrt und zwar in Beziehung zum Schiffe selbst und zu einem Punkte aufserhalb desselben? — 2. Welcher Täuschung ist man ausgesetzt, wenn man bei bewegtem Gewölke den Mond oder von einem fahrenden Eisenbahnwagen aus nahe Gegenstände betrachtet? — 3. Welche Form haben die Wege, welche die Angriffspunkte der Kr. und L. am Hebel, der festen und losen Rolle, dem Wellrade, dem Keil und der Schraube zurücklegen? — 4. Bahn einer abgeschossenen Kugel a. innerhalb, b. aufserhalb des Geschützrohres? — 5. Art der Bewegung eines Kreisels, während die Schnur abgezogen wird, sowie während der freien Umläufe? — 6. Ein Eisenbahnzug habe auf wagerechter Bahn eine gleichförmige Bewegung; wie muß sich dabei die Dampfkraft zu den Widerständen verhalten? — 7. Was muß eintreten, wenn die Dampfkraft ab- oder zunimmt? — 8. Wie muß sich die Geschw. a. beim freien Falle, b. beim senkrechten aufwärts gerichteten Wurfe ändern, u. w.? — 9. Wodurch kann die Bewegung eines auf einer schiefen Ebene frei herabrollenden K. a. eine gleichförmige, b. eine beschleunigte, c. eine verzögerte werden? — 10. Auf der See ist die Geschw. des Windes durchschnittlich größer als auf dem Lande, und in der Höhe größer als an der Oberfläche der Erde. Erkl.! — 11. Weg eines guten Fußgängers in 1 Stunde, desgl. eines Schnellzuges? — 12. Wv. Meilen ungefähr kann ein Dampfschiff in einem Tage zurücklegen? (7500 m = 1 Meile). — 13. Innerhalb welcher Zeit kann ein Schnellzug nach obiger Angabe einen 10 Meilen entfernten Ort erreichen? — 14. Welche Geschw. hat ein Eisenbahnzug a. nach 10 Sek., b. nach 1 Minute, wenn die Bewegung eine gleichmäßig beschleunigte ist und die Beschleunigung 20 cm beträgt? — 15. Nach wv. Minuten würde der Zug die Geschw. eines Schnellzuges erreicht haben?

§ 58. Versuche über die gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Zur Beobachtung einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung läßt sich die *Atwoodsche Fallmaschine* benutzen.

Die *Atwoodsche Fallmaschine* (Fig. 188 folg. Seite) besteht im wesentlichen 1) aus einem etwa 2,5 m hohen aufrechten *hölzernen Ständer* (AB), welcher an einer Seite mit einer Centimeterteilung versehen ist; 2) aus einer auf dem Ständer befestigten, sehr leicht *drehbaren Rolle*,

auf welcher eine durch gleiche Gewichte (Q und Q_1) belastete Schnur hängt; 3) aus zwei Schiebern (s und s_1), die am Ständer verschoben werden können; der obere dient zum Auffangen



des zur Erzeugung der Bewegung bestimmten Übergewichtes (p), der untere (nicht durchbohrte) Schieber ist zum Auffangen des herabsinkenden Gewichtstückes (Q) bestimmt. Zur Messung der Zeit dient gewöhnlich ein Pendel (t), das mit jedem Schläge 1 Sekunde angiebt (*Sekundenpendel*).

Beim Gebrauche des Apparates wird das mit einem Übergewichte versehene Gewichtstück (Q) so gestellt, daß die Bewegung desselben beim Nullpunkte der Teilung beginnt. Die Geschw., mit welcher das Fallgewicht herabsinkt, ist um so kleiner, je leichter das Übergewicht ist im Verhältnis zu der bewegten Masse. Zur Ausgleichung der Reibung ist ein besonderes kleines Gewicht notwendig; bei genauen Versuchen muß außerdem auf die Masse der Rolle, welche zu bewegen ist, Rücksicht genommen werden. Da das Übergewicht während seiner Bewegung immer denselben Druck auf seine Unterlage ausübt, so ist die Bedingung erfüllt, daß der bewegte Körper durch eine unveränderliche Kraft in Bewegung gesetzt wird. So lange das Übergewicht wirkt, ist die Bewegung eine beschleunigte;

wird es vom Schieber abgehoben, so tritt eine gleichförmige Bewegung ein. (Von den Gewichten ist $Q = Q_1$ und $p = p_1$.)

1. Gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

(Das nicht auffangbare Übergewicht sei die treibende Kraft, $Q = 122,5$ g, $p_1 = 5$ g)

Versuch a. Stellt man den unteren Schieber nacheinander auf 10, 40, 90 und 160 cm, so schlägt das Gewicht Q , wenn man es von 0 ab fallen läßt, nach 1, 2, 3 und 4 Sek. auf den Schieber. *Wege:* $1^2 \times 10, 2^2 \times 10, 3^2 \times 10, 4^2 \times 10 \dots$ cm.

(Das auffangbare Übergewicht sei die treibende Kraft, $Q = 122,5$ g, $p = 5$ g.)

Versuch b. Die Kraft wirke zunächst nur 1 Sekunde. Fängt man zu diesem Zwecke das Übergewicht 10 cm unter dem Nullpunkte auf, so legt das Gewichtstück in jeder folgenden Sek. einen Weg von 20 cm zurück. Letzteres ergibt sich, wenn man den unteren Schieber zunächst 30, dann 50, 70, 90 ... cm unter dem Nullpunkte befestigt. *Beschleunigung: 20 cm.* — Damit die Kraft 2 Sekunden wirken kann, werde das Übergewicht 40 cm unter 0 abgehoben. Der Fallraum beträgt dann für jede folgende Sek. 40 cm. *Endgeschwindigkeit: 2×20 cm.* — Um die Kraft 3 Sekunden wirken zu lassen, ist das Übergewicht 90 cm unter 0 aufzufangen. Hierdurch ergibt sich für jede folgende Sek. ein Fallraum von 60 cm. *Endgeschwindigkeit: 3×20 cm.*

2. Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft und Masse.

(Das auffangbare Übergewicht sei die treibende Kraft.)

Versuch c. Ist das Übergewicht doppelt so groß als vorhin ($p=10$ g), die bewegte Masse aber dieselbe ($Q=Q_1=120$ g, also $Q+Q_1+p=250$ g), so ist die nach 1 Sek. erlangte Geschw. oder die *Beschleunigung* **40 cm.** — Bei Anwendung eines dreimal so großen Übergewichtes ($p=15$ g) erlangt die gleiche Masse ($Q=Q_1=117,5$ g, mithin $Q+Q_1+p=250$ g) eine *Beschleunigung* von **60 cm.** — Ein viermal so großes Übergewicht ($p=20$ g) erteilt der gleichen Masse ($Q=Q_1=115$ g, also $Q+Q_1+p=240$ g) eine *Beschleunigung* von **80 cm** u. s. w.

Die *Beschleunigungen* (g und g_1), welche zwei Kräfte (P und P_1) einem Körper einzeln wirkend erteilen, stehen im geraden Verhältnis zur Stärke der Kräfte.

In Zeichen: $g : g_1 = P : P_1.$

Versuch d. Setzt man durch dasselbe Übergewicht eine doppelt so große Masse in Bewegung ($p=5$ g, $Q=Q_1=247,5$ g oder $p=10$ g, $Q=Q_1=245$ g, sodafs $Q+Q_1+p=500$ g), so wird die *Beschleunigung* nur $\frac{1}{2}$ so groß. — Wird durch dasselbe Übergewicht eine dreimal so große Masse in Bewegung gesetzt, so ist die *Beschleunigung* nur noch $\frac{1}{3}$ so groß ($p=5$ g, $Q=Q_1=372,5$ g oder $p=10$ g, $Q=Q_1=370$ g, sodafs $Q+Q_1+p=750$ g).

Die *Beschleunigungen* (g und g_1), welche eine Kraft ungleichen Massen (M und M_1) erteilt, verhalten sich umgekehrt wie die bewegten Massen.

In Zeichen: $g : g_1 = M_1 : M.$

Übungsstoff. 1. Welchen Bruchteil bildete bei Versuch a und b das Übergewicht von der ganzen bewegten Masse? — 2. Welche Beschleunigung muß hiernach entstehen, wenn $Q=Q_1=99$ g, $p=2$ g? — 3. Wie groß müßten Q und Q_1 genommen werden, wenn die vorige Beschleunigung a. durch 4 g, b. durch 6 g Übergewicht erzielt werden sollte, u. w.? — 4. Wie groß aber müssen Q und Q_1 sein, wenn bei derselben Masse (200 g) durch das 2-, 3- und 4fache Übergewicht eine ebenso vielfache Beschleunigung erzielt werden soll? — 5. Wie groß ferner, wenn die Beziehungen zwischen Masse und Beschleunigung nachgewiesen werden sollen? ($p=4$ g, Q und Q_1 zunächst = 98 g.) — 6. Die Geschw. eines Eisenbahnzuges sei 12 m und nehme in jeder folgenden Sek. gleichmäßig 20 cm ab. a. Wann wird der Zug stillstehen? b. Welchen Weg wird er noch zurücklegen? — 7. Ein Zug habe eine Geschw. von 6 m; welchen Weg würde er in 10 Min. zurücklegen a. bei gleichförmiger Bewegung, b. bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung, wenn die Geschw. in jeder Sek. um 2 cm zunähme? Größe der erlangten Geschw.? — 8. Wie groß würde die Beschleunigung sein, wenn der Zug 1 Min. nach der Abfahrt bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung 540 m zurückgelegt hätte? — 9. In wv. Sek. kann der Zug bei einer Beschleunigung von 24 cm eine Strecke von 300 m zurücklegen? — 10. Wenn ein K. frei fällt, so wird er durch eine Kr. in Bewegung gesetzt, welche seinem Gew. gleich ist und immer mit derselben Stärke wirkt. Wie groß ergibt sich hiernach unter Berücksichtigung der Ergebnisse obiger Versuche die Beschleunigung der Erdschwere?

§ 59. Mafs der Kräfte. Gleichgewicht. Wirkung und Gegenwirkung. An jeder Kraft unterscheidet man dreierlei: 1) ihren Angriffspunkt, d. h. denjenigen Punkt des Körpers, auf welchen die Kraft unmittelbar wirkt, 2) ihre Richtung, d. h. diejenige gerade Linie, in welcher die Kraft den Angriffspunkt zu bewegen strebt, 3) ihre Gröfse oder Stärke.

Da wir nur die Wirkungen der Kräfte, nicht aber die Kräfte selbst wahrnehmen, so können wir letztere auch nur aus ihren Wirkungen kennen lernen, ihre Gröfse oder Stärke also auch nur nach ihren Wirkungen beurteilen. Nach § 4 kann die Schwerkraft zweierlei Wirkungen hervorbringen, nämlich einen blofsen Druck oder Zug, oder eine Bewegung (mechanische Wirkungen). Mechanische Kräfte lassen sich daher auf zweierlei Art messen: 1) indem man die Gröfse ihrer *Druck-* oder *Zugwirkungen* bestimmt; 2) indem man untersucht, wie grofs ihre *bewegende Wirkung* ist, d. h. wie schnell ein Körper (z. B. eine abgeschossene Kugel) sich bewegt, wenn die Kraft während einer gewissen Zeit auf den Körper eingewirkt hat. Das erstere Verfahren ist das einfachere.

Als *Krafteinheit* wird daher gewöhnlich eine *Kraft* bezeichnet, welche in ihrer Richtung den Druck oder Zug einer Gewichtseinheit (1 kg) auszuüben vermag.

Als Instrument zur Messung von Druck- oder Zugkräften dient namentlich die *Federwage* (siehe Fig. 189) und das *Dynamometer*.¹⁾ Letzteres wird für



Fig. 189.

grofse Kräfte, z. B. die Zugkraft eines Pferdes, angewandt. Bei beiden schließt man aus der Stärke der Biegung einer elastischen Feder auf die Gröfse der Kraft.

Ein *Dynamometer* besteht gewöhnlich aus einem starken elastischen Stahlbügel, welcher in die Zugrichtung (z. B. Zuglinie eines Pferdes) eingeschaltet wird. Am Bügel ist eine Metallscheibe befestigt, auf der sich beim Anziehen desselben ein Zeiger bewegt. Letzteres wird durch einen Winkelhebel (ABC) vermittelt, dessen kurzer Arm durch eine Schubstange mit dem Bügel gelenkartig verbunden ist und dessen langer Arm auf den Zeiger einwirkt. Eine auf dem Rande der Scheibe angebrachte Teilung giebt die Gröfse des ausgeübten Zuges in Kilogrammen an.

Um die Gröfse einer Kraft aus ihrer bewegenden Wirkung, z. B. die Gröfse der Pulverkraft, durch welche die Kugel eines Geschützes in Bewegung gesetzt wird, aus der Geschw. der Kugel bestimmen zu können, ist es zunächst erforderlich, aus der angenommenen Krafteinheit ein neues geeignetes Kraftmafs abzuleiten. Dies ist möglich, da man die bewegende Wirkung der Erdanziehung, also derselben Kraft, welche das Gewicht der Körper verursacht, genau kennt. Nach § 6 fallen alle irdischen Körper im leeren Raume gleichschnell. Die Geschw., welche alle frei fallenden Körper im leeren Raume erlangen, nachdem die Schwerk-

¹⁾ δύναμις (dynamis), Kraft.

kraft 1 Sek. auf sie eingewirkt hat, beträgt 9,8 m (genauer 9,806 m unter 45° Breite in Meereshöhe), d. h. wenn die Erde nicht weiter auf den fallenden Körper einwirkte, so würde dieser in jeder folgenden Sek. einen Weg von 9,8 m zurücklegen. (Beschleunigung der Schwerkraft.) Es wird somit an der Größe der angenommenen Kräfteinheit nichts geändert, wenn wir letztere als eine Kraft bezeichnen, welche einer Masse von 1 kg in 1 Sek. eine Geschwindigkeit von 9,8 m oder, was nach § 58 dasselbe ist, einer Masse von 9,8 kg in 1 Sek. eine Geschwindigkeit von 1 m erteilt. Nimmt man hiernach 9,8 kg, d. h. diejenige Anzahl der Kilogramme eines Körpers, welche sich nach der Schwerkraft für 1 m Beschleunigung ergibt, als Masseneinheit an, so folgt:

Als Kräfteinheit kann auch eine Kraft bezeichnet werden, welche der Masseneinheit (9,8 kg) in 1 Sek. eine Geschwindigkeit von 1 m erteilt.

Bezeichnet Q das Gewicht eines Körpers, g die Größe der Beschleunigung der Schwere, M die Masseneinheiten des Körpers, so ist

$$M = \frac{Q}{g} \quad (\text{In Worten?})$$

Beispiel: Eine Kanonenkugel verlasse das Geschützrohr mit einer Geschw. von 600 m. Wie groß ist der Druck, den die Pulvergase auf die Kugel (vom Reibungswiderstande abgesehen) ausgeübt haben, wenn die Dauer der Einwirkung der Gase $\frac{1}{100}$ Sek. beträgt, und wenn man annimmt, daß die Triebkraft während dieser Zeit immer die gleiche Stärke hatte? Das Gewicht der Kugel betrage 20 kg.

Auflösung. Um einer Masse von 9,8 kg in 1 Sek. die Geschw. von 1 m zu erteilen, ist ein Druck von 1 kg erforderlich; soll einer Masse von 20 kg in 1 Sek. dieselbe Geschw. erteilt werden, so ist also ein Druck von $\frac{20}{9,8}$ kg nötig. Bei einer Geschw. von 600 m muß die Kraft 600 mal so groß sein. Da die Kugel diese Geschw. nicht nach 1 Sek., sondern schon nach $\frac{1}{100}$ Sek. erlangt, so muß der Druck der Pulvergase $600 \times 100 \times \frac{20}{9,8}$ kg oder nahezu 122449 kg betragen.

Bem. Für wissenschaftliche Messungen nimmt man als Einheit der Kraft das Dyn an, das ist diejenige Kraft, welche der Einheit der Masse (ein Gramm) in der Einheit der Zeit (eine Sekunde) die Einheit der Geschwindigkeit (ein Centimeter) erteilt. Das auf diesen Einheiten beruhende Maßsystem wird als das Centimeter-Gramm-Sekunden-System bezeichnet (C.-G.-S.-System). Die Masse eines Gramms wird dabei auf die geographische Breite von Paris bezogen. Bringt man dieselbe Masse unter eine andere Breite, so ändert sich ihr Gewicht (durch Wägung auf ein und derselben Federwaage nachweisbar!), während die Masse selbst dieselbe bleibt. Da die Erdanziehung der Gramm Masse während der ersten Sekunde des freien Fallens eine Geschwindigkeit von 981 cm erteilt, so entspricht dieselbe der Summe von 981 Kräfteinheiten, mithin ist 1 Gramm = 981 Dyn oder umgekehrt 1 Dyn = $\frac{1}{981}$ Gramm (also ungefähr = 1 mg).

Zwei Kräfte sind offenbar gleichstark, wenn der Druck oder Zug der einen Kraft ebensogroß ist wie der Druck oder Zug der anderen Kraft, oder wenn die Geschwindigkeiten, welche die beiden Kräfte während der gleichen Zeit gleichen Massen erteilen, einander gleich sind.

Verhält sich ein ruhender oder bewegter Körper unter der Einwirkung mehrerer Kräfte so, als ob die Kräfte gar nicht vorhanden wären, so sagt man, die Kräfte halten einander das Gleichgewicht, oder der Körper sei im Gleichgewichte.

An einer Maschine, welche in Bewegung ist, befinden sich die treibenden und die den Widerstand erzeugenden Kräfte im Gleichgewichte, wenn die Maschinenteile sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen.

Da eine Kraft stets zwischen zwei Körpern oder Körpertheilchen wirkt, so ruft ihre Wirkung in allen Fällen eine ihr gleiche Gegenwirkung nach entgegengesetzter Richtung hervor. So ist z. B. beim Spannen eines Bogens, dem Zusammendrücken einer elastischen Feder, dem Strecken einer dehnbaren Schnur oder dergl. deutlich eine Gegenwirkung wahrzunehmen, welche um so mehr zunimmt, je stärker man drückt oder zieht, und wieder abnimmt, wenn der ausgeübte Druck oder Zug nachläßt. Beim Zerreißen, Zerdrücken, Zerschneiden, Zerbrechen eines Körpers übt nicht nur die Hand einen Druck oder Zug auf den Gegenstand oder das benutzte Werkzeug aus, sondern diese wirken ebensostark wieder auf die Hand zurück. Ein Pferd, das einen Wagen zieht, erleidet durch den Wagen nach rückwärts einen gleichen Gegenzug u. s. w. Wirkung und Gegenwirkung bei Anwendung magnetischer und elektrischer Kräfte. (Beispiele!)

Jede Wirkung erzeugt eine gleiche Gegenwirkung: **Reaktionsgesetz.**

Übungsstoff. 1. Welchen Vorteil gewährt bei dem Dynamometer (Fig. 189) die Einschaltung des Hebels ABC? (Das Verhältnis der Hebelarme sei 1:4 und der Punkt C liege etwa in $\frac{1}{3}$ der Länge des Zeigers.) — 2. Wie liefse sich mit Hilfe des Dynamometers ermitteln, wer von 2 Personen den stärksten Zug oder den stärksten Druck auszuüben vermag? — 3. Wie groß ist die Beschleunigung der Schwere, a. auf dem Monde, b. auf der Sonne, wenn die Anziehung des Mondes $\frac{1}{4}$, die der Sonne das 28fache der Erdanziehung beträgt? (Vgl. § 56, Fragen 7 und 8.) — 4. Warum muß aber dennoch die Masseneinheit für alle drei Himmelskörper dieselbe Größe haben? (Vgl. § 56, Frage 9.) — 5. Wv. Masseneinheiten enthält ein K. von 147 kg Gewicht? — 6. Wie läßt sich aus der Zahl der Masseneinheiten eines K. dessen Gew. bestimmen? — 7. Ein Eisenbahnwagen von 4900 kg werde von Arbeitern 30 Sek. lang auf den Schienen mit einer Kr. von 10 kg fortgeschoben. Welche Geschw. wird der Wagen dadurch erlangen, wenn von Reibung abgesehen wird? — 8. Wie groß würde die Kr. sein müssen, wenn der Wagen in 20 Sek. eine Geschw. von 2 m erlangen sollte? — 9. Wie groß muß die Triebkraft der Pulvergase sein, wenn eine Flintenkugel von 20 g den Lauf mit einer Geschw. von 300 m verläßt, und die Dauer der Einwirkung $\frac{1}{100}$ Sek. beträgt? (Es soll vom Reibungswiderstande abgesehen und angenommen werden, die Triebkraft wirke immer mit derselben Stärke.)

§ 60. Mechanische Arbeit. Wird durch eine Kraft eine Bewegung hervorgebracht, z. B. ein Stein gehoben, eine Feder gespannt, ein Wagen fortgezogen, eine Maschine getrieben, eine Kugel abgeschossen u. s. w., so übt die Kraft in jedem Punkte ihres Weges einen Druck oder Zug aus; *sie überwindet also auf einer gewissen Strecke einen Widerstand.* Eine solche Kraftwirkung bezeichnet man als **mechanische Arbeit**, oder kurz als **Arbeit**.

Bem. Man verwechsle Arbeitsleistung nicht mit der bloßen Ausübung eines Druckes oder Zuges. Arbeit ist Druck oder Zug verbunden mit Bewegung.

Die Größe der mechanischen Arbeit hängt hiernach nicht allein von der Größe des überwundenen Widerstandes ab, sondern

auch von der Gröfse der Strecke, auf welcher der Widerstand überwunden wurde und zwar wächst die Arbeit mit beiden in gleichem Verhältnis. Wird z. B. ein Stein von 10 kg gehoben, oder ein Wagen 10 m weit fortgezogen, so ist die geleistete Arbeit 10mal so grofs, als wenn der Stein nur 1 kg wöge oder der Wagen nur 1 m weit fortbewegt würde.

Um die Gröfse der Arbeit kurz in Zahlen ausdrücken zu können, bezeichnet man als **Arbeitseinheit** *diejenige Arbeit, welche verrichtet wird, wenn eine Last von 1 kg 1 m hoch gehoben, oder überhaupt ein Widerstand von 1 kg auf einem Wege von 1 m überwunden wird.* Diese Arbeitseinheit heifst Kilogramm-meter (kgm) oder Meterkilogramm (mkg).

Beispiel. Wird ein Stein von 100 kg Gew. 1 m hoch gehoben oder eine Pflugschar bei einem Widerstande von 100 kg 1 m weit durch den Boden gezogen, so werden in beiden Fällen 100 mkg Arbeit verrichtet; die Arbeit würde 500 kg betragen, wenn entweder die Widerstände oder die Wegstrecken 5 mal so grofs wären.

Die Arbeit (A) einer Kraft (P) ist gleich dem Produkte aus der Kraft und dem in ihrer eigenen Richtung zurückgelegten Wege (W).

In Zeichen: $A = P \cdot W.$

Bei Dampfmaschinen, wie überhaupt in allen Fällen, in denen eine bedeutende mechanische Arbeit geleistet wird, wendet man die sogen. Pferdekraft als Mafs für die geleistete Arbeit an. Ein kräftiges Pferd kann bei täglich achtstündiger Thätigkeit mit angemessener Unterbrechung einen Widerstand von 75 kg überwinden und dabei im Durchschnitt in jeder Sekunde einen Weg von 1 m zurücklegen. *Eine Pferdekraft ist hiernach die Arbeit von 75 mkg in einer Sekunde.*

Beispiel. Eine Maschine „arbeitet mit 100 Pferdekraften“, heifst: Sie verrichtet in jeder Sekunde eine Arbeit von $75 \times 100 = 7500$ mkg. Dieselbe Arbeit würde eine Lokomotive leisten, wenn der Widerstand des Zuges z. B. 2500 kg und der in jeder Sekunde zurückgelegte Weg 3 m betrüge.

Wenn eine Kraft *unmittelbar* auf einen Körper einwirkt, z. B. ein Stein mit der Hand gehoben, ein Pflug durch ein Zugtier gezogen wird, so legen Kraft und Last gleiche Wege zurück. Die Last wirkt dabei als Gegenkraft in einer der Kraft gerade entgegengesetzten Richtung. Tritt während der Bewegung keine Änderung in der Geschw. ein, so müssen Kraft und Last einander gleich sein. Bezeichnet man nun die der Arbeit der Kraft entsprechende Gegenwirkung der Last ebenfalls als Arbeit, und zwar als Arbeit der Last, so kann man sagen, *die Arbeit der Last sei in solchem Falle der Arbeit der Kraft gleich.*

Wird zur Überwindung eines Widerstandes eine Maschine angewandt, so können (wie in früheren Paragraphen, §§ 7 bis 14, nachgewiesen ist) sowohl Kraft und Last selbst, als auch ihre Wege verschieden sein. Die früheren Betrachtungen haben in dieser Beziehung ergeben, dafs die Wege, welche Kraft und Last in ihrer eigenen Richtung zurücklegen, für den Fall des Gleichgewichtes sich umgekehrt wie Kraft und Last zu einander verhalten. Verhält sich nun *der Kraftweg zum Lastwege, wie die Last zur Kraft sich verhält* ($W_p : W_q = Q : P$), so gilt ganz allgemein das Gesetz:

Die Arbeit der Kraft ist gleich der Arbeit der Last.

In Zeichen: $P \cdot W_p = Q \cdot W_q.$

Die Arbeit, welche eine Kraft zur Überwindung eines Widerstandes mittelst einer Maschine verrichtet, ist demnach ebenso groß wie diejenige Arbeit, welche die Kraft ohne Anwendung der Maschine zur Überwindung desselben Widerstandes hätte verrichten müssen. Durch eine Maschine kann daher wohl die geleistete Arbeit in zweckmäßiger Weise übertragen werden, es kann aber niemals eine Vergrößerung der Arbeit durch die Maschine eintreten (der mechanische Vorteil ist gleich dem mechanischen Nachteil, § 14). Genau genommen ist der Gebrauch einer jeden Maschine noch mit einem Arbeitsverluste verbunden, da bei der Bewegung derselben stets Reibungswiderstände zu überwinden sind. Nichtsdestoweniger ist die Anwendung der Maschinen eine sehr nützliche, denn ohne Maschinen würden manche Arbeiten gar nicht verrichtet werden können. Da es unmöglich ist, durch eine Maschine Arbeit aus nichts zu schaffen, so ist es auch nicht möglich, eine Vorrichtung herzustellen, welche ununterbrochen Arbeit aus sich selbst erzeugen könnte (Perpetuum mobile).

Übungsstoff. 1. Wv. Arbeit wird verrichtet, wenn 4500 kg Mauersteine 6 m hoch gehoben werden? — 2. Ein Wagen werde 20 m weit fortbewegt und leiste einen Widerstand von 150 kg. Wv. Arbeit? — 3. Vermittelst eines Hebels werde eine Last von 240 kg durch 30 kg Kr. gehoben, der Kraftweg sei 0,8 m; a. Lastweg? b. Arbeit der Kr. und der L.? — 4. Angenommen, dieselbe L. sollte mit Hilfe einer losen Rolle um die gleiche Strecke gehoben werden. a. Wv. Kraft würde dazu nötig sein? b. Welchen Weg hätte die Kr. zurückzulegen? c. Wv. Arbeit würde dadurch geleistet werden? — 5. Durch Anwendung eines Wellrades werden 180 kg 3 m hoch gehoben, während die an der Kurbel wirkende Kr. einen Weg von 15 m zurücklegt. Wie groß ist die Kr., und welche Arbeit wird von der Kr. und L. geleistet? — 6. An einer schiefen Ebene verhalte sich die Höhe zur Länge wie 1:10; es werden auf derselben 360 kg 1,5 m hoch gehoben; a. Wie groß ist die parallel zur Ebene wirkende Kr., und welchen Weg legt die Kr. dabei zurück? b. Wie groß ist die von der Kr. und L. geleistete Arbeit? — 7. Der Rücken eines Keiles sei 6 cm breit und die Seite desselben 30 cm lang, die Kr. sei gleich 50 kg. a. Größe des überwundenen Widerstandes? b. Arbeit der Kr. und der L., wenn der Keil 20 cm tief eingetrieben wird? — 8. Die Ganghöhe einer Schraube sei 8 mm, der Radius der Schraube gleich 3 cm und die am Umfange derselben wirkende Kr. betrage 20 kg. a. Wie groß ist der ausgeübte Druck? b. Welchen Weg hat die Kr. zurückzulegen, wenn dieser Druck auf einer Strecke von 10 cm überwunden wird? c. Mech. Arbeit? — 9. Durch den Kopf der Schraube sei ein Stab gesteckt, an welchem die Kr. in einem 18 cm von der Achse der Schraube gelegenen Punkte wirke. Was würde sich ergeben, wenn die Kr. wiederum 20 kg betrüge?

§ 61. Von den Hindernissen der Bewegung. Der Widerstand, welchen eine Kraft bei der Verrichtung einer mechanischen Arbeit überwindet, wird nicht allein durch die Trägheit der Masse des bewegten Körpers geleistet, sondern es treten, wie bereits in § 3 hervorgehoben wurde, jeder Bewegung noch gewisse Hindernisse hemmend entgegen, nämlich die Reibung und der Widerstand des Mittels.

Bei der Anwendung von Rollen u. dgl. erwächst auch aus der *Steifigkeit der Seile* ein Widerstand, welcher hemmend auf die Bewegung einwirkt.

Unter Reibung versteht man dasjenige Bewegungshindernis, welches an den Berührungsflächen zweier Körper auftritt, wenn ein Körper sich auf einem anderen bewegt. Man unterscheidet gleitende und rollende Reibung, je nachdem ein Körper auf einem anderen hingeleitet, oder auf einer Unterlage fortrollt. (Beispiele!)

Die Reibung hat ihren Grund darin, daß selbst die glattesten Flächen fester Körper Unebenheiten besitzen, und die sich berührenden

Teilchen der beiden Körper einander anziehen. Da nun die Unebenheiten der Berührungsflächen mehr oder weniger ineinander greifen, so müssen bei der Bewegung die hervorragenden Teilchen abgestoßen werden, oder der bewegte Körper muß über sie hinweggehoben werden. Im ersteren Falle ist die *Kohäsion*, im letzteren die *Schwerkraft* zu überwinden. Der durch die *Adhäsion* geleistete Widerstand ist im allgemeinen am größten, wenn die Bewegung beginnt, da während der Ruhe das Anhaften der Berührungsflächen zunimmt. — Für glatte Flächen gelten die beiden einfachen Gesetze:

1) Die gleitende wie die rollende Reibung nimmt zu wie der Druck, welchen der eine Körper gegen den anderen ausübt.

2) Die gleitende Reibung ist größer als die rollende und unabhängig von der Größe der Berührungsfläche der sich reibenden Körper.

Letzteres wird dadurch erklärlich, daß bei der größeren Anzahl von Berührungspunkten der Druck sich auf eine größere Fläche verteilt.

Zur Überwindung der rollenden Reibung ist bei demselben Drucke um so weniger Kraft erforderlich, je größer der Durchmesser des rollenden Körpers ist.

Die Zahlen, welche angeben, der wievielte Teil der Last als Kraft zur Überwindung der Reibung bei bestimmten Körpern erforderlich ist, werden **Reibungskoeffizienten** genannt. Für Metall auf Metall ist der mittlere Koeffizient der gleitenden Reibung während der Bewegung bei trockenen Flächen ungefähr $\frac{1}{10}$, bei geschmierten ungefähr ein $\frac{1}{15}$. Für gute Landstraßen ist der Koeffizient der rollenden Reibung durchschnittlich $\frac{1}{30}$, für Eisenbahnen $\frac{1}{40}$.

Die Reibung gewährt uns zahlreiche Vorteile. Ohne Reibung würde das Gehen, Fahren, das Festhalten von Gegenständen, das Eintreiben von Nägeln und Keilen, das Anziehen von Schrauben, das Übertragen der Bewegungen von Maschinentheilen mittelst Riemen, das Spielen auf Streichinstrumenten u. s. w. unmöglich sein. Bei der Anwendung von Maschinen wirkt die Reibung dadurch nachteilig, daß die wirkliche Nutzleistung, d. h. die Überwindung der durch den Zweck der Maschine bedingten Widerstände, hinter der Arbeit der Kraft zurückbleibt. Die gleitende Reibung wird namentlich in solchen Fällen, in denen Lasten auf dem Boden fortzubewegen sind, dadurch vermieden, daß man unter den betreffenden Körpern sogen. Leitrollen befestigt. Tische, Sessel, Bettstellen u. s. w. lassen sich bedeutend leichter verschieben, wenn sie mit derartigen Rollen versehen sind.

Als Widerstand des Mittels bezeichnet man den Widerstand, welchen das Wasser und die Luft leisten, worin sich ein Körper bewegt. Indem der Körper den Stoff vor sich her verdrängt, findet nicht nur eine Reibung statt, sondern der Stoff wird auch zum Teil selbst in Bewegung gesetzt. Letzteres namentlich wirkt hemmend auf die Bewegung des Körpers ein. Für mäfsige Geschwindigkeiten gilt der Satz:

Der Widerstand des Mittels wächst ungefähr wie das Quadrat der Geschwindigkeit; er ist um so größer, je dichter das Mittel ist, und hängt ferner von der Größe und Gestalt des bewegten Körpers ab.

Beispiel. Ein in Wasser mäfsig bewegter Körper setzt bei der 4fachen Geschw. in derselben Zeit 4mal soviel Wasser in Bewegung und erteilt dem

Wasser, mit welchem er in Bewegung kommt, auch die 4fache Geschwindigkeit; der Widerstand ist also $4 \times 4 = 16$ mal so groß geworden. — Bei sehr schnellen Bewegungen bilden sich rings um den bewegten Körper Schichten des Mittels, welche mit sehr verschiedener Geschw. fortgerissen werden und ihrerseits wieder andere mit fortreißen. In solchen Fällen nimmt der Widerstand stärker zu, als oben angegeben ist

Um den Widerstand des Mittels zu verkleinern, giebt man Kähnen, Schiffen, den Scheiben der Uhrpendel u. s. w. eine besondere Form (welche?). Der Widerstand des Mittels ist vorteilhaft beim Schwimmen, Rudern, bei der Fortbewegung von Dampfschiffen durch Schaufelräder und Schrauben, beim Fallen mit einem Fallschirme, beim Fliegen der Vögel u. s. w.

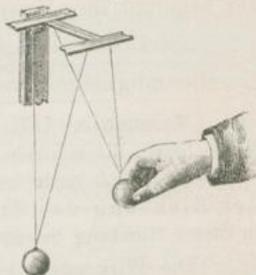
Übungsstoff. 1. Kann die Form der Geschosse (ob kugelig oder spitz) einen Einfluss auf die Flugweite derselben ausüben, u. w.? — 2. Werden eine Bleikugel und eine Kugel von Eisen im W. gleichschnell fallen, a. wenn sie gleichgroß sind, b. wenn sie gleiches Gew. haben? Grund! — 3. Warum fließt das W. eines Flusses in der Mitte schneller als am Ufer? — 4. Wenn W. durch einen Schlauch hindurchgetrieben wird (Feuerspritze), so erleidet es im Verhältnis zu seiner Masse einen um so geringeren Reibungswiderstand, je weiter der Schlauch ist. Erkl.! — 5. Warum steigt bei Springbrunnen und Feuerspritzen das W. nicht so hoch, als es nach der Größe des Druckes steigen müßte? — 6. Welchen Einfluss würde es auf die Bewegung eines Eisenbahnzuges ausüben, wenn man die Schienen stark mit Fett bestriche? (Raupenzüge.) — 7. Auf welche Weise und zu welchem Zwecke sucht man bei Glatteis die Reibung zu vergrößern? — 8. Welchen Einfluss übt die Größe eines Wagenrades auf die Überwindung der Reibung aus? — 9. Wie ändert sich die Reibung, wenn das Gew. eines Wagens doppelt so groß wird? — 10. Warum laufen Zapfen in ihren Lagern am leichtesten, wenn sie schon längere Zeit gebraucht sind? — 11. Welche Mittel werden angewandt, um auf Fahrstraßen die Reibung zu vermindern? — 12. Wv. Kr. ist erforderlich, um einen Wagen von 2000 kg a. auf einer gewöhnlichen Straße, b. auf Schienen fortzubewegen, wenn die Bahnen wagerecht sind (Rbg.-Koeff. siehe oben)? — 13. Ein Eisenbahnwagen habe ein Gew. von 12000 kg und werde auf einer wagerechten Bahn 30 m weit fortbewegt. Wie groß ist die geleistete Arbeit, wenn die Reibung $\frac{1}{30}$ beträgt? — 14. Der Umfang eines Schleifsteines sei 4 m, der Druck des zu schleifenden Gegenstandes senkrecht gegen die Schleiffläche betrage 20 kg, der Reibungs-Koeff. sei $\frac{1}{3}$. Wv. Arbeit ist nach 15 Umdrehungen verrichtet?

§ 62. Vom Stofse. Trifft ein bewegter Körper auf einen anderen ruhenden oder bewegten Körper, so entsteht ein Stofs. Da die zusammenstossenden Körper ineinander einzudringen streben, so findet dabei je nach ihrer materiellen Beschaffenheit eine mehr oder weniger merkliche Verschiebung ihrer Massenteilchen statt; außerdem tritt eine Änderung in den Bewegungszuständen der Körper ein. Einen wesentlichen Einfluss übt die größere oder geringere Elasticität der Körper auf den Erfolg des Stosses aus. Man hat daher namentlich zwischen dem Stofse der elastischen und der als unelastisch geltenden Körper zu unterscheiden. Je nach der Richtung, in welcher der Stofs erfolgt, wird er als gerader, schiefer, centraler oder excentrischer Stofs bezeichnet.

Ein Stofs heißt gerade, wenn er rechtwinklig gegen die Berührungsfläche der beiden Körper gerichtet ist, schiefer, wenn dies nicht stattfindet; er wird central genannt, wenn die Richtung desselben durch den Schwerpunkt des gestofsenen Körpers hindurchgeht, andernfalls heißt er excentrisch.

Im folgenden findet der Einfachheit wegen nur der centrale Stofs kugelförmiger Körper, deren Masse als vollkommen elastisch oder als vollkommen unelastisch angesehen werden kann, eine Berücksichtigung.

1. Centraler Stofs unelastischer Kugeln. Versuch a. Hebt man von 2 gleichgroßen Thonkugeln, welche an Doppelfäden dicht nebeneinander in gleicher Höhe aufgehängt sind, die eine nach der Seite hin auf (Fig. 190) und läßt sie dann fallen, so bewegen sich beide Kugeln nach dem Zusammenstofse in der Richtung jener Kugel mit der Hälfte der ursprünglichen Geschwindigkeit weiter. Läßt man beide aus gleicher Höhe nach entgegengesetzten Seiten herabfallen, so heben sich ihre Geschwindigkeiten gegenseitig auf. Ein Zusammenstofse bei ungleichen Geschwindigkeiten ergibt für gleich gerichtete Bewegungen eine Geschwindigkeit, welche gleich der halben *Summe*, für entgegengesetzt gerichtete eine Geschwindigkeit, welche gleich der halben *Differenz* der ursprünglichen Geschwindigkeiten ist. Hieraus folgt:



Wenn zwei unelastische Kugeln von gleicher Masse gerade und central zusammenstofsen, so ist ihre gemeinsame Geschwindigkeit gleich dem arithmetischen Mittel ihrer ursprünglichen Geschwindigkeiten.

Wenn C und c die Geschwindigkeiten vor, V die Geschwindigkeit nach dem Stofse bezeichnen, so ist in Zeichen:
$$V = \frac{C+c}{2}.$$

(Je nach der Bewegungsrichtung ist c positiv oder negativ zu setzen.)

Da ein ruhender Körper zur Erlangung einer bestimmten Geschwindigkeit nach bekannten Erfahrungen desto mehr Kraft erfordert, je größer seine Masse ist, so kann ein bewegter Körper auch um so mehr Bewegung an einen anderen abgeben, je mehr Masse er enthält. Aus Versuch c, § 58, läßt sich schließen, daß ein Körper, welcher m Masseneinheiten enthält, einem anderen Körper auch eine m mal so große Geschwindigkeit erteilen kann, als ein mit derselben Geschwindigkeit sich bewegendes Körper von 1 Masseneinheit. Die Geschwindigkeit, welche zwei bewegte unelastische Körper beim Zusammenstofse annehmen, läßt sich daher dadurch bestimmen, daß man zunächst diejenigen Geschwindigkeiten berechnet, welche beide Körper einzeln einer Masseneinheit erteilen können, und darauf die Summen dieser Geschwindigkeiten durch die Zahl der Masseneinheiten dividiert.

In Zeichen:
$$V = \frac{MC + mc}{M + m}.$$

Das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit ist der Ausdruck für die Bewegungsgröße oder Bewegungsquantität eines bewegten Körpers.

2. Centraler Stofs elastischer Kugeln. Bekannte Erfahrungen lehren, daß elastische Kugeln nach einem geraden Stofse gegen eine feste Wand auf demselben Wege und mit derselben Geschwindigkeit wieder zurückkehren, während unelastische Körper liegen bleiben. Wird eine elastische Kugel central gestofsen, so springt sie mit derselben Geschwindigkeit und unter demselben Winkel nach der anderen Seite zurück (Gummibälle, Billardkugeln). — Treffen zwei Kugeln aufeinander, so ergibt sich Folgendes:

Versuch b. Verfährt man wie bei Versuch a mit 2 gleichgroßen Elfenbeinkugeln, so nimmt die ruhende Kugel die Bewegung der anderen

an und diese ruht nach dem Stofse. Läßt man beide Kugeln aus beliebiger Höhe herabfallen, so nimmt die eine die Geschwindigkeit der anderen an. Beide kehren nach dem Stofse um, wenn sie entgegengesetzt, sie behalten ihre Bewegungsrichtung bei, wenn sie gleich gerichtet waren.

Zwei elastische Kugeln von gleicher Masse vertauschen ihre Geschwindigkeiten, wenn sie gerade und central zusammenstossen.

Versuch c. Läßt man von 2 ungleichgroßen Kugeln 1) die größere Kugel gegen die ruhende kleinere, 2) die kleinere gegen die ruhende größere stossen, so bewegen sich nach dem Stofse beide Kugeln und zwar im 1. Falle beide in der Richtung des Stofses, während im 2. Falle nur die größere Kugel sich in dieser Richtung bewegt, die kleinere hingegen wieder zurückspringt.

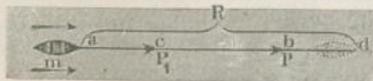
Die Wirkungen des Stofses werden sehr häufig benutzt, um einen harten Körper in einen weichen einzuschlagen oder einzurammen, ferner bei Bearbeitung eines Körpers durch Hammerschläge, bei Stampf-, Poch-, Hammerwerken u. dgl. Der Stofse elastischer Kugeln findet seine bekannteste Anwendung beim Billardspiele. Bei manchen Fahrzeugen, Maschinen u. s. w. sucht man die schädlichen unelastischen Stöße dadurch zu vermeiden oder abzuschwächen, daß man zwischen den unelastischen Körpern elastische einschaltet.

Übungstoff. 1. Erkläre die Wirkung eines Sprungbrettes. — 2. Eine Billardkugel soll so gestofsen werden, daß sie eine ruhende Kugel in Bewegung setzt, nach dem Stofse selbst aber stillsteht. Wie ist dies auszuführen? — 3. Wie ferner, wenn die gestofsene Kugel hinter der anderen herlaufen soll? — 4. Wenn Nägel in dünne Bretter eingeschlagen werden, so wirkt der elastische Stofse oft störend; inwiefern? — 5. Wie verfährt man in solchen Fällen, um die beabsichtigte Wirkung zu erzielen? — 6. Inwiefern macht es sich dabei bemerklich, daß die Geschw., welche der ruhende Körper durch den Stofse erhält, mit der Größe seiner Masse abnimmt? — 7. In der Hand kann man, ohne sich zu schaden, Steine zerschlagen, wenn Hand und Arm frei sind, nicht aber, wenn die Hand auf einer Unterlage liegt. Erkl.! — 8. Das Abprallen beim schiefen Stofse kann unter gewissen Bedingungen auch durch Flgkn. erfolgen. Bekanntes Beispiel! — 9. Von 2 gleichgroßen unelastischen Kugeln habe die eine 10 m, die andere 15 m Geschw. Wie werden sie sich nach ihrem Zusammenstofse verhalten, wenn der Stofse ein gerader und centraler ist und die Bewegungsrichtungen vor dem Stofse a. gleich, b. entgegengesetzt waren? — 10. Wie ferner, wenn die Kugeln a. 6 und 4 kg, b. 2 und 5 kg wiegen?

b. Zusammensetzung und Zerlegung von Bewegungen und Kräften.

§ 63. Zusammensetzung und Zerlegung von Bewegungen. Sehr häufig ist die Bewegung eines Körpers nicht die Wirkung einer einzelnen Kraft, sondern ein Ergebnis von dem Zusammenwirken mehrerer Kräfte. Ein sehr bekanntes und einfaches Beispiel hierzu ist die Bewegung eines Kahnes, auf den sowohl die Kraft, mit welcher gerudert wird, als auch die Strömung des Gewässers einwirkt. Angenommen, der Kahn *m* (Fig. 191) werde durch die Ruderkraft (*P*) innerhalb einer gewissen Zeit in gerader Richtung von *a* nach *b*, durch die Strömung (*P*₁) allein in derselben Zeit und *in gleicher Richtung* von *a* nach *c* getrieben, so legt er, wenn beide Kräfte gleichzeitig wirken, innerhalb derselben Zeit einen Weg (*ad*) zu-

Fig. 191.



innerhalb derselben Zeit einen Weg (*ad*) zu-

rück, welcher zwar auch die Richtung ab hat, aber um ac länger ist als ab ($ad = ab + ac$). Würde der Kahn während des Ruderns durch die Strömung *in entgegengesetzter Richtung* um ac (Fig. 192) rückwärts getrieben, so würde er während dieser Zeit in einem Punkte ankommen, welcher um ac hinter b liegt ($ad = ab - ac$). Hieraus folgt:

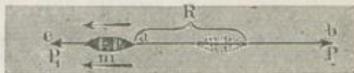


Fig. 192.

Wird ein Körper in gerader Linie zu zwei Bewegungen angeregt, so ist der wirklich zurückgelegte Weg bei gleicher Richtung der Kräfte gleich der Summe, bei entgegengesetzter Richtung derselben gleich dem Unterschiede der einzelnen Wege.

Wirken die beiden Kräfte wie in Fig. 193, unter einem Winkel auf den Kahn ein, so würde der Kahn weder in der einen noch in der anderen Richtung sich bewegen. Statt nach b zu gelangen, würde er offenbar in einem Punkte ankommen, welcher von b um ac in der Richtung der Strömung entfernt ist, also in dem Schnittpunkte d der von b und c zu ac und ab gezogenen Parallelen. Der Kahn hat somit die dem Ausgangspunkte a gegenüberliegende Ecke des Parallelogramms erreicht.

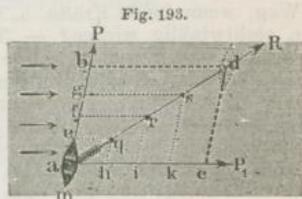


Fig. 193.

Das Parallelogramm, in welchem zwei anstossende Seiten die Einzelwege darstellen, die ein durch zwei Kräfte bewegter Körper in gleichen Zeiten zurücklegen würde, heißt **Bewegungs-Parallelogramm**.

Wird ein Körper zu zwei Bewegungen angeregt, deren Richtungen einen Winkel miteinander bilden, so befindet er sich nach irgend einer Zeit in der seinem Ausgangspunkte gegenüberliegenden Ecke des Bewegungs-Parallelogramms.

Ist die Wirkung der beiden Kräfte derart, dass der bewegte Körper durch jede Kraft allein getrieben, in gleichen, wenn auch noch so klein angenommenen Zeiten von beiden Seitenwegen gleiche Bruchteile zurücklegen würde, so bleibt die von ihm einmal eingeschlagene Richtung immer dieselbe (warum?). Alle Punkte, welche er unter dieser Voraussetzung trifft, müssen demnach in einer geraden Linie und zwar in der Diagonale seines Bewegungs-Parallelogramms liegen.

Welchen Einfluss würde es nach Fig. 193 auf die Richtung des vom Kahn in Wirklichkeit zurückgelegten Weges ausüben, wenn a , mit zunehmender, b , mit abnehmender Kraft gerudert würde, die Strömung aber immer gleichstark wäre?

Sind die Seitenbewegungen gleichartig, so stellt die Diagonale des Bewegungs-Parallelogramms den Weg dar, welchen der Körper in Wirklichkeit zurücklegt (**Mittelweg oder resultierender Weg**).

Wenn s und s_1 die Seitenwege bedeuten für den besonderen Fall, dass diese einen rechten Winkel einschließen, so ist in Zeichen: $R = \sqrt{s^2 + s_1^2}$. †)

†) Allgemein: $R = \sqrt{s^2 + s_1^2 + 2s \cdot s_1 \cdot \cos w}$ (siehe Seite 148).

Werden die Strecken ae , ef , fg und gb (Fig. 193), sowie die Strecken ah , hi , ik und kc in je 1 Sek. durchlaufen, so stellen sie die Seiten-Geschwindigkeiten, die auf der Diagonale gelegenen Strecken aq , qr , rs und sd hingegen die resultierenden Geschwindigkeiten dar.

Wäre der Weg ad gegeben und die Aufgabe gestellt, die Bewegung des Körpers in zwei etwa der Richtung nach gegebene Seitenbewegungen zu zerlegen, also z. B. zu bestimmen, welchen Weg der Kahn durch die Strömung, sowie durch das Rudern allein zurückgelegt haben würde, so brauchte man offenbar nur durch d zu den Geraden, welche jene Richtungen angeben, Parallelen zu ziehen. Dieses Verfahren wird als das **Zerlegen von Bewegungen** bezeichnet.

Übungsstoff. 1. Wie würde die Richtung und Länge des Mittelweges (Fig. 193) sich ändern, wenn der Winkel, welchen die beiden Krafrichtungen einschließen, a. bis 0° abnähme, b. bis 180° zunähme, die Größe der Seitenkräfte aber sich nicht änderte? — 2. Ein Kahn lege durch andauerndes, gleichstarkes Rudern allein in 1 Minute 60 m, durch die Strömung allein 20 m zurück. Welches ist der Weg, wenn beide Kräfte a. in gleicher, b. in gerade entgegengesetzter Richtung, c. rechtwinklig wirken? — 3. Einfluß des Winkels auf Richtung und Länge des Weges? — 4. Ein Stein werde a. senkrecht abwärts, b. senkrecht aufwärts geworfen; die Wurfkraft erteile ihm eine Geschw. von 50 m. Welche Geschw. hat der Stein nach 1, 2, 3, 4... Sek., wenn die Geschw., welche ein frei fallender K. in diesen Zeiteinheiten erlangt, 10, 20, 30, 40... m beträgt? — 5. Wie müßte die Bahn eines wagrecht geworfenen Steines beschaffen sein, wenn letzterer mit gleichförmiger Geschw. zur Erde hinabsänke, und wie ist sie in Wirklichkeit; w.? — 6. Nach welcher Richtung wird ein Vogel getrieben, der bei Westwind nach Norden fliegt, wenn die Geschw. des Windes ebenso groß ist als die Geschw., welche die Flugkraft dem Vogel erteilt? — 7. Wovon hängt es hierbei ab, ob der Weg mehr eine nördliche oder westliche Richtung hat? — 8. Welche Richtung hat der Weg, den eine quer durch einen im Fahren begriffenen Eisenbahnwagen rollende Kugel zurücklegt, in Bezug auf die Schienen? — 9. Einfluß der Geschw. auf die Größe des Winkels, den der Weg der Kugel mit den Schienen bildet? — 10. Warum ist von einem schnell fahrenden Schiffe aus ein am Ufer befindlicher Gegenstand durch einen Wurf schwer zu treffen? — 11. Wirkliche und scheinbare Richtung a. eines bei ruhiger Luft nahe vor dem Fenster eines Eisenbahnwagens, b. eines am Fenster selbst während der Fahrt herabfallenden Regentropfens? — 12. Einfluß der Fahrgeschwindigkeit? — 13. Wie muß sich der Lauf des Schiffes (Fig. 57) ändern, wenn beim Vorwärtsfahren das Steuer a. schräg nach rechts, b. schräg nach links gedreht wird, u. w.?

§ 64. Zusammensetzung der Kräfte. Wie sich aus den Wegen, welche ein Körper unter der Einwirkung zweier oder mehrerer Kräfte einzeln zurücklegen würde, der in Wirklichkeit zurückgelegte Weg finden läßt, so läßt sich auch aus den einzelnen Kräften eine Kraft bestimmen, durch welche dieselben in ihrer gemeinsamen Wirkung ersetzt werden können. Fälle, in denen ein Zusammenwirken von Kräften stattfindet, sind außer den in vorigem Paragraphen betrachteten Beispielen die Fortbewegung eines Schiffes durch Wind und Strömung, die Bewegung eines Geschosses unter der Einwirkung von Pulverkraft und Erdanziehung, das Aufziehen eines Rammjärs durch mehrere an Seilen wirkende Zugkräfte, das Zusammenwirken von Kraft und Last am Hebel u. s. w.

*Eine Kraft, welche allein dieselbe Wirkung hervorbringt, wie zwei oder mehrere gleichzeitig wirkende Kräfte, wird **Mittelkraft** oder **Resultierende** genannt; die Einzelkräfte heißen **Seitenkräfte** oder **Komponenten**.*

1. Zusammensetzung von Kräften, welche denselben Angriffspunkt haben und in derselben Geraden wirken.

Da die Stärke der Kräfte nur nach der Gröfse ihrer Wirkungen beurteilt werden kann, so giebt das Verhältnis, in welchem der von einem Körper durch die Einwirkung mehrerer Kräfte zurückgelegte Weg zu demjenigen Wege steht, die der Körper durch die Seitenkräfte innerhalb derselben Zeit einzeln zurücklegen würde, auch zugleich das Verhältnis der Mittelkraft zu den Seitenkräften an. Es ergibt sich somit nach Anleitung der Figuren 191 und 192 des vorigen Paragraphen:

1. Wenn zwei oder mehrere Kräfte in derselben Richtung gleichzeitig auf einen Punkt wirken, so hat die Mittelkraft dieselbe Richtung und ist gleich der **Summe** der einzelnen Kräfte.

In Zeichen: $R = P + P_1 + P_2 + \dots$

2. Wirken zwei Kräfte in gerade entgegengesetzter Richtung gleichzeitig auf einen Punkt, so hat die Mittelkraft die Richtung der größeren Kraft und ist gleich dem **Unterschiede** der beiden Kräfte.

In Zeichen: $R = P - P_1$, wenn $P > P_1$ ist.

Beides ist für Druck- oder Zugkräfte durch die Figuren 194 und 195 veranschaulicht, in denen die in n wirkenden Einzelkräfte durch eine Kraft $R = Q$ ersetzt gedacht werden können (mo sei gleich on). *Linien, welche den Angriffspunkt, die Richtung und Gröfse von Kräften darstellen, heißen Kraftlinien.*

Fig. 194.

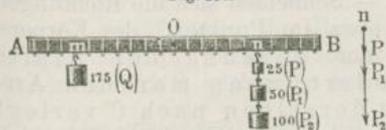
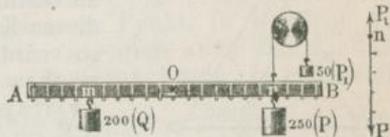


Fig. 195.



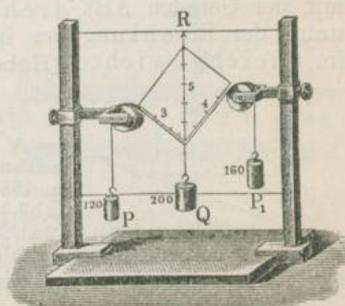
Aus obigem (2.) folgt, dass zwei in demselben Punkte nach gerade entgegengesetzten Richtungen wirkende Kräfte einander das Gleichgewicht halten, wenn sie gleichgroß sind.

2. Zusammensetzung von Kräften, welche denselben Angriffspunkt haben und einen Winkel einschließen.

Sieht man wie vorhin die Geraden, welche in Fig. 193 die Wege darstellen, als Kraftlinien an, so läßt sich die Richtung und Gröfse der Mittelkraft in Bezug auf die beiden Seitenkräfte unmittelbar daraus ableiten (in welcher Weise?). Das Parallelogramm der Bewegungen stellt dann ein Parallelogramm der Kräfte dar. Bestätigung:

Versuch. Wird eine über 2 Rollen gehängte Schnur an ihren Enden und zwischen den Rollen so belastet, daß Gleich-

Fig. 196.



*10

gewicht entsteht, so stellen die schrägen Schnurteile 2 anstoßende Seiten eines Parallelogramms dar, dessen senkrechte Diagonale sich zu diesen Seiten ebenso verhält, wie das mittlere Gewicht zu den entsprechenden Seitengewichten, wie sich leicht durch eine Zeichnung nachweisen läßt.

Wenn zwei Kräfte unter einem Winkel gleichzeitig auf eine Punkt einwirken, so wird die Richtung und Stärke ihrer Mittelkraft durch die Diagonale eines Parallelogramms dargestellt, dessen Seiten die Richtung und Stärke der Seitenkräfte ausdrücken. (**Parallelogramm der Kräfte.**)

Für den besonderen Fall, daß der Winkel, unter welchem die Kräfte wirken, ein rechter ist, ist in Zeichen: $R = \sqrt{P^2 + P_1^2}$ †)

Für mehrere Kräfte läßt sich dadurch eine Mittelkraft finden, daß man zunächst zwei Kräfte zusammensetzt, die erhaltene Mittelkraft mit der dritten Kraft vereinigt u. s. w.

3. Zusammensetzung von Kräften mit verschiedenen Angriffspunkten.

(Anwendung des Parallelogramms der Kräfte.)

a. **Zwei sich schneidende Kräfte.** Gesetzt, auf einen beliebigen festen Körper wirken in den Punkten A und B (Fig. 197) in derselben Ebene, aber in verschiedener Richtung die beiden Kräfte P und P_1 ein, und es sei die Mittelkraft zu bestimmen. — Schneiden sich die Richtungen dieser Kräfte etwa im Punkte C des Körpers,

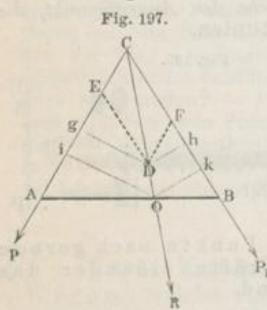


Fig. 197.

so wird an der Wirkung der Kräfte nichts geändert, wenn man den Angriffspunkt derselben nach C verlegt (CE = P und CF = P_1). Hierdurch läßt sich der gegebene Fall auf den einfacheren zurückführen, daß beide Kräfte denselben Angriffspunkt haben. Das Parallelogramm CEDF er giebt dann die *Mittelkraft* CD ††), deren Angriffspunkt ohne Änderung der Wirkung ebenfalls in ihrer eigenen Richtung beliebig verlegt werden kann. Wäre der Körper nun in irgend einem Punkte dieser Richtung (etwa in O, dem Durchschnittspunkte derselben mit der Geraden AB) drehbar befestigt, so befände er sich offenbar unter der Einwirkung der in A und B angreifenden Kräfte P und P_1 im Gleichgewichte (**Hebel**, vergl. § 68).

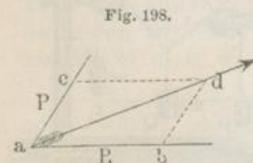


Fig. 198.

†) Trigonometrisch allgemein ausgedrückt:

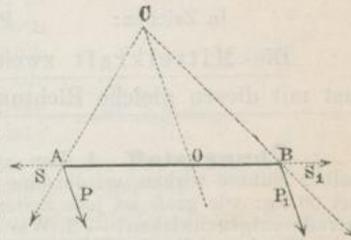
$$R = \sqrt{P^2 + P_1^2 + 2P \cdot P_1 \cdot \cos w}, \text{ wenn } w \text{ den Winkel bezeichnet, unter welchem die Kräfte wirken, denn nach Fig. 198 ist } ad^2 = ab^2 + bd^2 - 2ab \cdot bd \cdot \cos \sphericalangle abd = ab^2 + ac^2 - 2ab \cdot ac \cdot \cos (180^\circ - \sphericalangle cab) = ab^2 + ac^2 + 2ab \cdot ac \cdot \cos \sphericalangle cab, \text{ weil minus } \cos (180^\circ - \sphericalangle cab) = \text{plus } \cos \sphericalangle cab.$$

††) Trigonometrisch: $R = CD = \sqrt{P^2 + P_1^2 + 2P \cdot P_1 \cdot \cos w}$. (Siehe †) dieser Seite.)

Die vom Drehpunkte O auf die Krafrichtungen gefällten Lote Oi und Ok verhalten sich hierbei umgekehrt wie die zugehörigen Kräfte selbst. Zieht man nämlich die Hülfsseite Dg und Dh , so ist $Ok : Oi = Dh : Dg = DF : DE = EC : FC = P : P_1$, da $Ok \parallel Dh$, $Oi \parallel Dg$, $\triangle DhF \sim \triangle DgE$ u. s. w.

b. Zwei gleich gerichtete Kräfte. Sind die beiden in derselben Ebene auf den Körper wirkenden Kräfte parallel und gleich gerichtet (Fig. 199), so läßt sich die Mittelkraft ähnlich wie vorhin bestimmen. Wir nehmen zu diesem Zwecke zunächst wieder an, der Körper sei ganz frei beweglich. Um diesen Fall auf den vorigen zurückzuführen, kann man sich vorstellen, in A und B wirken noch 2 gleiche entgegengesetzte Kräfte (S und S_1) in der Richtung von AB . Dadurch wird an der Wirkung jener parallelen Kräfte nichts geändert. Setzt man dann die in A und B wirkenden Kräfte (P und S , P_1 und S_1) zu je einer Mittelkraft zusammen und verlegt darauf wie oben die Angriffspunkte beider Mittelkräfte nach C , indem man sich vorstellt, jedes der beiden Kräfteparallelogramme werde in der Richtung seiner Diagonale verschoben, so heben sich die beiden gerade entgegengesetzt gerichteten Seitenkräfte auf, während die beiden gleich gerichteten durch eine Mittelkraft ersetzt werden können, welche dieselbe Richtung hat und der Summe dieser Kräfte ($P + P_1$) gleich ist[†]) (Figur weiter auszuführen!). Ist nun der Punkt O der Geraden AB ein in der Richtung der Mittelkraft gelegener Punkt, in welchem der Körper drehbar befestigt sei, so entsteht wie vorhin unter dem Einfluß der in A und B wirkenden Kräfte P und P_1 Gleichgewicht (Hebel).

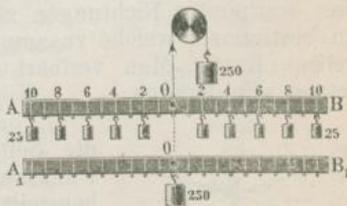
Fig. 199.



Die vom Drehpunkte auf die Krafrichtungen gefällten Lote verhalten sich auch hierbei wieder umgekehrt wie die zugehörigen Kräfte. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke der an A und B zu zeichnenden Parallelogramme mit den anstossenden Dreiecken CAO und CBO folgt nämlich $S : P = AO : CO$ und $S_1 : P_1 = BO : CO$. Da nun $S \cdot CO = S_1 \cdot CO$ (denn $S = S_1$), so ist auch $P \cdot AO = P_1 \cdot BO$ oder $P : P_1 = BO : AO = L_1 : L$ (Lote von O auf die Richtungen der Kräfte).

Dies findet für den besonderen Fall, daß die Kräfte unter rechten Winkeln auf einen wagerechten Stab einwirken, nach Anleitung von Fig. 200 darin seine Bestätigung, daß von den gleichen Gewichten, welche auf den frei an einer festen Rolle hängenden Hebel AB wirken, sich je 2 durch ein im Drehpunkte aufgehängtes Gewicht ersetzen lassen, welches der Summe der beiden Gewichte gleich ist. Eine Belastung des Hebels mit ungleichen Gewichten ergibt

Fig. 200.



[†]) Trigonometrisch: Ist $P \parallel P_1$, so verwandelt sich die Gleichung:

$$R = \sqrt{P^2 + P_1^2 + 2P \cdot P_1 \cdot \cos w} \text{ (siehe vorige Seite unten) in die einfachere:}$$

$$R = \sqrt{P^2 + P_1^2 + 2P \cdot P_1} = P + P_1, \text{ da für diesen Fall } w = \text{Null und } \cos 0 = 1 \text{ ist.}$$

dasselbe, wenn die Abstände vom Drehpunkte für je 2 Gewichte sich umgekehrt wie diese verhalten.

Bezeichnet man die auf den drehbaren Körper wirkenden Seitenkräfte wegen ihrer Wirkung als Drehkräfte, so folgt:

Zwei Drehkräfte halten einander das Gleichgewicht, wenn ihre Mittelkraft durch den Drehpunkt des Körpers geht. Dies findet statt, wenn sich die Kräfte umgekehrt verhalten, wie die vom Drehpunkte auf ihre Richtungslinien gefällten Lote.

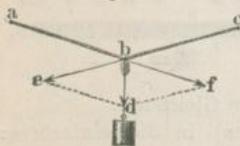
$$\text{In Zeichen:} \quad P : P_1 = L_1 : L.$$

Die Mittelkraft zweier parallel und gleich gerichteten Kräfte hat mit diesen gleiche Richtung und ist der Summe derselben gleich.

Übungsstoff. 1. Von zwei gleich gerichteten Kräften, welche in demselben Punkte wirken, sei die eine doppelt so groß als die andere, ihre Mittelkraft sei 60 kg: wie groß ist jede Seitenkraft? — 2. Wie groß aber, wenn sie einander gerade entgegenwirken? — 3. Wie ändert sich die Größe der Mittelkraft zweier auf einen Punkt wirkenden Kräfte, wenn letztere zunächst gleich gerichtet sind, und darauf ihre gegenseitige Richtung so ändern, daß sie entgegengesetzte Richtungen erhalten? — 4. Wie ferner die Richtung, wenn die Seitenkräfte etwa einen spitzen Winkel einschließen und beide zunächst gleich sind, eine derselben darauf aber ihre Größe ändert? — 5. Warum ist es für die Wirkung nicht gleichgültig, in welchen Abständen die einen Rammbar aufziehenden Arbeiter voneinander stehen? — 6. Ein angehauener Baum soll mit mehreren Seilen niedergezogen werden. Welchen Einfluß hat dabei a. die Höhe, in welcher die Seile befestigt sind, b. der Winkel, welchen die Seile mit dem Baumstamme einschließen, c. die Richtung, welche die Zuglinien gegeneinander haben? — 7. Von 2 Kräften, welche auf denselben Punkt wirken und einen rechten Winkel einschließen, sei die eine gleich 15, die andere gleich 20 kg; wie groß ist ihre Mittelkraft? — 8. Welchen Druck erleiden die Drehungsachsen der in den Fig. 22 und 23 dargestellten Hebel durch die an letzteren wirkenden Gewichte? — 9. In welchem Punkte muß ein gerader unbiegsamer Stab von 80 cm Länge und gleichmäßiger Dicke unterstützt werden, wenn an dessen einem Ende 10 kg, am andern 15 kg hängen und Glgew. entstehen soll? (Mittelkraft!) — 10. Angriffspunkt und Größe der Mittelkraft bei den Rollen? — 11. Welchen Zug erleiden die beiden oberen Haken (Fig. 29) durch P und Q? (P = 1 kg.)

§ 65. Zerlegung der Kräfte. Um die Wirkung einer einzelnen gegebenen Kraft richtig beurteilen zu können, ist es in manchen Fällen erforderlich, diese Kraft in zwei oder mehrere Kräfte von bestimmten Richtungen zu zerlegen, d. h. zwei oder mehrere Kräfte zu bestimmen, welche zusammen dieselbe Wirkung haben, wie die gegebene Kraft. Man verfährt hierbei umgekehrt wie beim Zusammensetzen von Kräften.

Fig. 201.

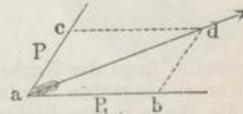


Von besonderer Wichtigkeit ist der Fall, daß die Seitenkräfte unter einem Winkel auf einen Punkt wirken. Sollte z. B. die Stärke des Zuges beurteilt werden, welchen die beiden Aufhängepunkte a und c des Seiles abc (Fig. 201) durch die in der Mitte b desselben hängende Last von etwa 50 kg erleiden, so könnte man sich vorstellen,

dafs jeder Teil des Seiles durch eine besondere, in b wirkende Kraft angezogen würde. Stellt etwa bd die Richtung und Gröfse der senkrecht abwärts gerichteten Zugkraft dar, so erhält man die Gröfse der Seitenkräfte, wenn man ab und cb über b hinaus verlängert und zu diesen Linien durch d Parallelen gezogen denkt. Wie nun in dem dadurch entstehenden Parallelogramme $bedf$ die Seiten be und bf sich zur Diagonale bd verhalten, ebenso verhält sich nach dem vorigen Paragraphen der Zug, welchen die Punkte a und c erleiden, zu jenem Gewichte. Wäre etwa $eb = bf = 2bd$, so betrüge der Zug links und rechts je 100 kg.

In Fig. 202 ist eine Kraft ($R = ad$) in zwei Seitenkräfte zerlegt, welche einen spitzen Winkel einschließen. Wie ist die Zeichnung auszuführen, wenn 1) nur die Richtung, 2) nur die Gröfse der beiden Seitenkräfte, 3) die Richtung und Gröfse von nur einer Seitenkraft gegeben ist?

Fig. 202.



Bem. Die Mittelkraft ist in diesen und den späteren Abbildungen gewöhnlich durch Befiederung der sie darstellenden Geraden hervorgehoben.

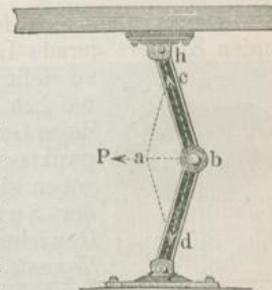
Eine Kraft wird in zwei einen Winkel einschließende Seitenkräfte zerlegt, indem man ein Parallelogramm zeichnet, in welchem die Diagonale die gegebene Kraft und die anstossenden Seiten die zu suchenden Kräfte darstellen.

Übungsstoff. 1. Das Seil abc , Fig. 201, laufe in c über eine feste Rolle und sei hier so belastet, dafs Glgew. entsteht. Was wird eintreten, wenn man die Rolle 1) dem Punkte a nähert, 2) weiter von a entfernt? Erkl.! (Das mittlere Gew. sei an einer losen Rolle aufgehängt und werde nicht verändert.) — 2. Gröfse und Verhältnis der Seitenkräfte nach Wiederherstellung des Glgew.; geringste Belastung des freien Seilendes? — 3. Kann abc eine gerade Linie bilden? Grund! — 4. Wie ändert sich in Fig. 202 die Mittelkraft, wenn der Winkel, welchen P und P_1 einschließen, a . kleiner, b . gröfser wird? — 5. Weise durch Zeichnung nach, dafs eine in schräger Richtung auf eine wagerechte Fläche drückende Kraft niemals einen senkrechten Druck hervorrufen kann, welcher der vollen Gröfse der Kr. gleich ist. (Zerlegung in 2 Seitenkräfte.) Einfluß der Gröfse des Winkels auf das Gröfsenverhältnis der Kräfte! — 6. Welchen Einfluß hat die Richtung zweier Dachsparren auf das Verhältnis des senkrechten Druckes zum wagerechten Schube.

Fig. 203.



Fig. 204.



(Druck in der Richtung der Sparren als gleich angenommen.) — 7. An einem Schlitten, Fig. 203, sei die Zuglinie nach vorn schräg aufwärts, an einem Wagen schräg abwärts gerichtet. Wie läfst sich ermitteln, mit welcher Kr. das Fahrzeug im Verhältnis zur Zugkraft auf wagerechter StraÙe fortbewegt wird, und wie grofs der Druck oder Schub ist? — 8. Erkläre hiernach den Einfluß der Gröfse des Winkels in Frage 6b (§ 64). — 9. Fig. 204 stellt eine Kniepresse dar. Zwei Metallstangen sind durch ein Gelenk miteinander verbunden. Die eine derselben drückt gegen ein festes, unbewegliches Widerlager, die andere auf einen zu pressenden Gegenstand, wenn eine Kraft P in wagerechter Richtung auf das Gelenk einwirkt. Es soll der Druck bestimmt werden, welcher dadurch auf die Unterlage ausgeübt wird: a . in der Richtung der Stange selbst, b . in senkrechter Richtung. (2malige Kraftzerlegung; man zerlege die Seitenkraft bd in eine horizontale und eine senk-

rechte Seitenkraft.) Wie ändert sich die Wirkung, indem sich die beiden Stangen mehr und mehr der geradlinigen Verbindung ihrer äußeren Endpunkte nähern? — 10. Erkläre Fig. 205, in welcher ein Segelboot dargestellt sei; *op* bezeichne die

Fig. 205.

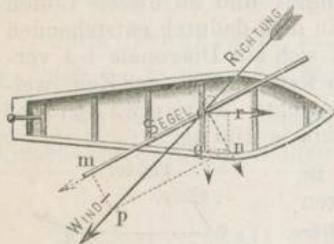
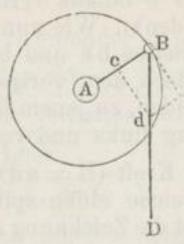


Fig. 206.



Kraft des Windes, *or* die Kraft, mit welcher das Boot durch den Wind kielwärts fortbewegt wird. (2malige Kraftzerlegung; der Seitendruck *op* wird durch den Widerstand des Wassers aufgehoben.) — 11. AB, Fig. 206, stelle eine Kurbel dar, mit welcher die Stange *BD* zum Drehen der Welle *A* durch ein Gelenk verbunden sei. a. Es soll zunächst für die dargestellte Lage der Kurbel das Verhältnis angegeben werden, in welchem der auf die Kurbel ausgeübte Zug zu der drehenden Wirkung, sowie zu dem Drucke steht, den die Welle in der Richtung der Kurbel erleidet; b. ferner ist durch Zeichnung zu ermitteln, wie sich jenes Verhältnis bei einer Drehung der Kurbel ändert. Bei welchen beiden Kurbelstellungen kann mittelst der Stange *BD* keine Drehung bewirkt werden, u. w.? (Tote Punkte.)

c. Vom Schwerpunkte.

§ 66. Schwerpunkt und Gleichgewichtslagen.

a. Schwerpunkt. Aus der Wirkung paralleler Kräfte wird nunmehr auch die Richtung des durch die Schwerkraft bewirkten Druckes und Zuges erklärlich. Nach § 56 nämlich kann die anziehende Wirkung, welche die Erde auf einen Körper ausübt, als das Ergebnis von dem Zusammenwirken aller Massenteilchen der Erde angesehen werden. Stellen wir uns nun vor, die Masse des Erdkörpers sei gleichmäßig verteilt und die Erde sei eine vollkommene Kugel, so liegen nach allen Seiten eines in der Druck-, Zug- oder Fallrichtung gezogenen Durchmessers der Erde gleichviele anziehende Teilchen, deren Einzelkräfte sich paarweise zu einer Mittelkraft vereinigen lassen, welche mit dem gedachten Durchmesser zusammenfällt. Der Mittelpunkt der Erde muß daher als der Ausgangspunkt der Schwerkraft erscheinen.

Denkt man sich ferner von jedem Massenteilchen eines frei fallenden Körpers gerade Linien nach dem Mittelpunkte der Erde gezogen,

Fig. 207.



so stellt jede derselben die Richtung der auf ein Massenteilchen wirkenden Schwerkraft vor (Fig. 207). Da alle diese Geraden bei der großen Entfernung des Erdmittelpunktes als parallel angesehen werden können, so ergeben sie nach § 64 eine Mittelkraft, deren Größe gleich der Summe der parallelen Kräfte, d. h. gleich dem Gewichte des Körpers ist. *Der im Innern des Körpers liegende Angriffspunkt dieser Mittelkraft wird Schwerpunkt des Körpers genannt.* Man kann sich demnach das Gewicht eines Körpers in seinem Schwerpunkte vereinigt denken. — Die Lage des Schwerpunktes läßt sich im allgemeinen am einfachsten durch den Versuch ermitteln.

Versuch. Hängt man einen Körper in mehreren Punkten seiner Oberfläche nacheinander an einem Faden auf, so schneiden sich die Richtungslinien der Schwere in demselben Punkte, was sich bei einem scheibenförmigen Körper leicht durch Linien, bei einem Körper, welcher sich nach allen Richtungen des Raumes ziemlich gleichmäÙig ausdehnt, durch Stäbchen, die durch den Körper hindurchgesteckt sind, nachweisen läÙt (Fig. 208 und 209). Vergrößert man die Masse des Körpers an einer beliebigen Stelle, so rückt der Schwerpunkt nach dieser Stelle hin. Aus obigem folgt zugleich:

Fig. 208.

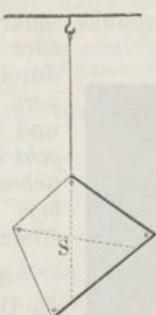
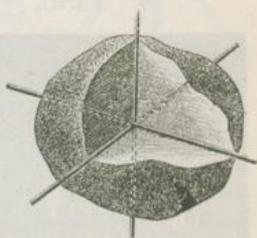


Fig. 209.



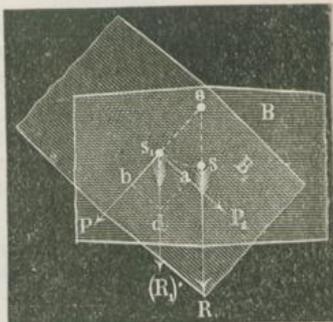
Ist ein Körper in seinem Schwerpunkte unterstützt, so befindet er sich in jeder Lage im Gleichgewichte.

Die Lage des Schwerpunktes hängt von der Verteilung der Masse des Körpers ab. Ist die Masse gleichmäÙig verteilt, so fällt bei regelmäÙig gestalteten Körpern der Schwerpunkt mit ihrem geometrischen Mittelpunkt zusammen; er liegt also bei Scheiben von der Form eines Parallelogramms und bei Würfeln im Durchschnittspunkte der Diagonalen, bei kreisförmigen Scheiben und Kugeln im Centrum u. s. w. Bei ungleicher Verteilung der Masse des Körpers liegt der Schwerpunkt stets an derjenigen Seite, an welcher die gröÙere Masse sich befindet.

b. Gleichgewichtslagen. Wird ein Körper (B, Fig. 210 und 211) aufserhalb seines Schwerpunktes in einem Punkte (O) oder einer geraden Linie (Achse) drehbar unterstützt, so kann er sich nach obigem nur dann im Gleichgewichte befinden, wenn die durch seinen Schwerpunkt gehende Senkrechte den Unterstützungspunkt oder die Achse trifft. Hierbei können, wie sich leicht durch Versuche nachweisen läÙt, je nach der Lage, welche der Schwerpunkt gegen den Drehungspunkt oder die Drehungsachse einnimmt, folgende beiden Fälle eintreten:

1. Liegt der Schwerpunkt senkrecht unter dem Aufhängepunkte oder der Drehungsachse, so geht er, wenn der Körper aus seiner Gleichgewichtslage gebracht wird, in eine höhere Lage über (S und S_1 , Fig. 210). *Sich selbst überlassen, fällt der Körper nach jeder Bewegung wieder in die ursprüngliche Lage zurück: stabile¹⁾ oder sichere Gleichgewichtslage.* Dies wird erklärlich, wenn man sich die in S_1 angreifende senkrecht abwärts wirkende Kraft (R_1) durch das Parallelogramm $s_1 b d a$ in die beiden Seitenkräfte P und P_1 zerlegt denkt, von

Fig. 210.

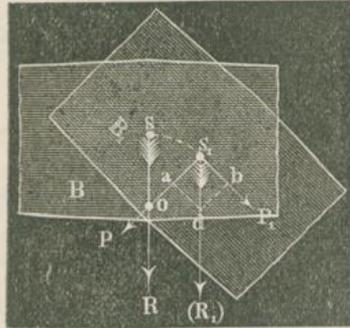


¹⁾ stabilis, unveränderlich.

denen die erstere durch den Widerstand der Achse aufgehoben wird, die andere den Körper so zu drehen strebt, daß der Schwerpunkt nach S zurückgeht.

2. Liegt der Schwerpunkt senkrecht über dem Aufhängepunkte

Fig. 211.



oder der Drehungsachse, so nimmt er durch den geringsten Anstoß des Körpers eine immer tiefere Lage ein (S und S_1 , Fig. 211). Bei einer Drehung geht der Körper aus seiner ursprünglichen Lage in die sichere Gleichgewichtslage über: labile¹⁾ oder unsichere Gleichgewichtslage. Erkläre die Figur!

auf wagerechter Unterlage), so ist der Körper bei jeder neuen Lage immer wieder im Gleichgewichte: indifferente²⁾ Gleichgewichtslage. Bei dieser Gleichgewichtslage findet also bei der Drehung des unterstützten Körpers weder eine Hebung, noch eine Senkung seines Schwerpunktes statt.

Man kann hiernach den Schwerpunkt auch als denjenigen Punkt bezeichnen, in welchem ein Körper unterstützt werden muß, damit er sich in jeder Lage im Gleichgewicht befindet.

Fig. 212.



Die stabile Gleichgewichtslage ist wichtig für die Aufhängung der Wagebalken. Auch bei frei beweglichen Körpern, wie Schiffen, Kähnen u. dgl. strebt der Schwerpunkt, da das Gewicht so wirkt, als wenn es im Schwerpunkte vereinigt wäre, eine möglichst tiefe Lage einzunehmen. Lampen, Kompass u. dgl. werden auf Schiffen in Ringen (Fig. 212) so aufgehängt, daß die eine Drehungsachse längs, die andere quer zum Schiffe gerichtet ist, damit trotz der Schwankungen des Schiffes die sichere Gleichgewichtslage jener Gegenstände erhalten bleibt. (Cardanische Aufhängung.)

Übungsstoff. 1. Wo liegt der Schwerpunkt einer überall gleichdicken, geraden Metallstange? — 2. Warum darf der Schwerpunkt eines Pfeiles nicht vorn liegen? — 3. In welcher Glgw.-Lage muß sich ein Wagebalken befinden, u. w.? — 4. Wo liegt der Schwerpunkt von kreisförmigen und quadratischen Doppelscheiben, welche überall gleichdick sind und halb aus Kupfer, halb aus Eisen bestehen? — 5. Angenommen, die Scheiben seien von Holz; wie ist dann bei gleicher Dicke der Scheiben eine ungleiche Verteilung der Masse möglich, und welchen Einfluß würde eine solche Verteilung der Masse auf die Lage des Schwerpunktes ausüben? — 6. In welchen Glgw.-Lagen befinden sich zwei Kugeln, von denen die eine auf einer wagerechten Fläche ruht und die andere in einem auf ihrer Oberfläche gelegenen Punkte frei aufgehängt ist? — 7. Eine Kugel bestehe halb aus Blei und halb aus Holz. In welcher Lage befindet sich dieselbe im stabilen und in welcher im labilen Glgw.? —

1) labare, fallen wollen. — 2) indifferens, gleichgiltig.

8. Ein Ring werde in verschiedenen Punkten aufgehängt. Wo werden die Richtungslinien der Schwere sich dann treffen? — 9. Nenne Hohlkörper, bei welchen der Schwerpunkt eine ähnliche auffällige Lage hat. — 10. Aus einem 3—4 cm langen Stückchen Holundermark und einem kurzen eisernen Nagel mit kugelschaligem Kopfe soll ein Körper zusammengesetzt werden, welcher sich von selbst aufrichtet, wenn man ihn niederlegt. Wie ist dies auszuführen? Erkl.! — 11. Warum müssen zum Spiel bestimmte Würfel aus gleichmäßig schweren Stoffen bestehen? — 12. Ein Kork mit eingeklemmter Münze bleibt auf einer Nadelspitze im Glgew., wenn 2 oder 3 Gabeln im Korke befestigt sind (Fig. 213). Erkl.! — 13. Auf einer schiefen Ebene kann man eine kreisförmige Scheibe bergan laufen lassen, wenn ihr Schwerpunkt eine bestimmte Lage hat; welche? Erkl.!

Fig. 213.



§ 67. Die Standfestigkeit der Körper. Um einem Körper eine feste Stellung zu geben, unterstützt man ihn in mehreren nicht in gerader Linie liegenden Punkten (Tische, Stühle, Schränke u. s. w.). Hierbei hängt die Standfestigkeit des Körpers, wie die Erfahrung lehrt, 1. von der Größe der Unterstüßungsfläche, 2. von der Höhe, in welcher der Schwerpunkt liegt, und 3. vom Gewichte des Körpers ab. Auf einer Fußspitze steht man nicht so sicher, als wenn beide Sohlen den Boden berühren. Damit hohe Lampen ebenso sicher stehen als niedrige, füllt man ihren Fuß mit Blei aus. Gefüllte Kisten, Fässer u. dgl. sind nicht so leicht umzuwerfen als leere u. s. w. Derartige Erscheinungen erklären sich in folgender Weise:

Da das Gewicht eines Körpers als eine senkrecht abwärts wirkende Kraft angesehen werden kann, deren Angriffspunkt im Schwerpunkte des Körpers liegt, so kann ein Körper nur dann standfähig sein, wenn sein Schwerpunkt unterstützt ist. Stellt man sich nun vor, der Körper ABCD (Fig. 214) werde um die Kante C soweit gedreht, daß sein Schwerpunkt S senkrecht über der Drehungskante liegt, so entsteht unsicheres Gleichgewicht. Der geringste Stoß würde dann genügen, den Körper zum Fallen zu bringen. Bis der Schwerpunkt diese höchste Lage erreicht, muß die Kraft den durch das Gewicht des Körpers hervorgerufenen Widerstand überwinden. Jene

Fig. 214.

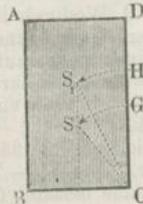
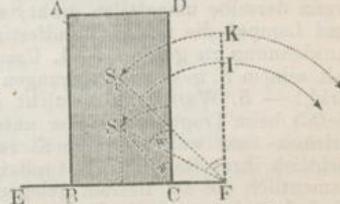


Fig. 215.



Lage wird offenbar um so eher erreicht, je kleiner der Winkel ist, um welchen der Körper beim Kippen gedreht werden muß. Letzteres hängt davon ab, 1) wie hoch der Schwerpunkt des Körpers liegt, 2) wie weit die Drehungskante von der senkrechten Schwerlinie des Körpers, d. h. von der durch seinen Schwerpunkt gehenden Senkrechten, entfernt ist (Fig. 215), oder wie groß die Unterstüßungsfläche des Körpers ist (inwiefern?). Bestätigung:

Versuch. Wird der hohle Fuß des Apparates (Fig. 216, folg. Seite) mit Eisenfeilspänen gefüllt, oder die Kugel desselben weiter hinunter-

geschoben, oder die Fußplatte durch eine grössere von gleichem Gewichte ersetzt, so ist die Standfestigkeit jedesmal grösser als anfangs.

Ein Körper ist nur dann **standfähig**, wenn sein Schwerpunkt **senkrecht über der Unterstützungsfläche** desselben liegt. Die **Standfestigkeit** eines Körpers ist um so grösser, je grösser sein Gewicht und seine Unterstützungsfläche ist und je tiefer sein Schwerpunkt liegt.



(Fig. 218). Der Körper muß daher nach vorn herüber geneigt werden (Fig. 219), wenn die Last auf dem Rücken, nach rechts, wenn sie an der linken Seite getragen wird u. s. w.

Einen Körper, der nur eine sehr kleine Unterstützungsfläche hat, im labilen Gleichgewichte halten, heisst **Balancieren**.¹⁾ Das Balancieren ist um so schwieriger, 1) je leichter der Körper ist, 2) je tiefer der Schwerpunkt des Körpers liegt, weil dann der Weg, welchen der Schwerpunkt beim Umfallen zurücklegen muß, um so kleiner, und die Zeit, den Körper vor dem Umfallen zu schützen, um so kürzer ist.

Übungsstoff. 1. Welche Haltung geben wir unserm K. unwillkürlich, wenn wir a. bergan, b. bergab gehen; w.? — 2. Welche ferner auf einem Wagen, wenn derselbe umzufallen droht; w.? — 3. Wodurch läßt sich bei hohen Leuchtern und Lampen die nötige Standfestigkeit erreichen, ohne dem Fusse eine übermäßige Ausdehnung zu geben? — 4. Um von einem Sitze aufstehen zu können, führt man mit seinem K. gewisse Bewegungen aus, welche das Zurückfallen verhindern; welche? Erkl.! — 5. Warum ist es nicht einerlei, ob man ein mit Flgk. gefülltes, offenes Gefäß beim Tragen oben oder unten anfaßt? Erkl.! — 6. Vgl. pyramiden-, kegel-, prismen- und walzenförmige K. von gleicher Grundfläche und gleichem Gew. hinsichtlich ihrer Standfestigkeit miteinander. Gründe! — 7. Warum werden bei Schiffen namentlich die am tiefsten gelegenen Räume belastet (Schiffsballast)? — 8. Welchen Einfluß übt es auf die Standfestigkeit eines Kahn's aus, wenn man in demselben aufrecht steht? — 9. Wie steht man in einem Kahn oder auf einem Wagen, wenn diese in Bewegung sind, am sichersten? — 10. Warum geht man auf Stelzen unsicher? — 11. Wenn man sich seitwärts auf einem Fusse dicht an die Wand lehnt, so kann man den andern nicht aufheben, ohne umzufallen. Grund! — 12. Ein Hammer oder Beil ist an seinem unteren Ende (am Holm) schwerer wagrecht zu halten als am oberen Ende. Erkl.! — 13. In manchen Gegenden werden Lasten von geringem Gew. auf dem Kopfe getragen. Veränderung der Lage des Schwerpunktes? Haltung des K.? — 14. Ist ein dünner oder dicker Stab leichter zu balancieren, u. w.? — 15. Sind Messer und Degen leichter zu balancieren, wenn die

¹⁾ balancer (franz.), schwebend erhalten.

Spitze nach oben oder unten gekehrt ist? Erkl.! — 16. Wie mag es sich erklären, daß Seiltänzer mit Hilfe einer an ihren Enden mit Blei beschwerten Stange (Balancierstange) auf einem Seile sicherer gehen, als wenn sie nur ihre Arme ausbreiten?

d. Die einfachen Maschinen und ihre einfachsten Verbindungen.

(Siehe §§ 7—14.)

1. Die Gruppe des Hebels.

§ 68. Der Hebel. Die früheren Betrachtungen der 6 einfachen Maschinen führten zu dem Ergebnis, daß sich die Rolle und das Wellrad auf den Hebel, der Keil und die Schraube auf die schiefe Ebene zurückführen lassen. Hebel und schiefe Ebene bilden somit die eigentlichen mechanischen Elemente, d. h. die Grundbestandteile aller Vorrichtungen, welche den Zweck haben, eine Kraft in vorteilhafter Weise auf einen Widerstand zu übertragen. Die damals angestellten Versuche über die Gleichgewichtsbedingungen des Hebels beschränkten sich auf den einfachsten Fall, daß zwei Kräfte, von denen die eine als Last bezeichnet wurde, senkrecht auf den Hebel wirkten. Ferner blieb der Einfluß unberücksichtigt, welchen die Lage des Schwerpunktes auf das Gleichgewicht des unbelasteten Hebels ausübt. Von diesen beiden Beschränkungen ist in folgendem abgesehen.

a. Zwei Kräfte wirken auf den Hebel.

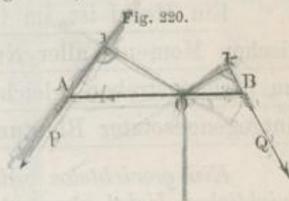
Wirken die beiden Kräfte P und Q in verschiedener Richtung (etwa beide unter schiefen Winkeln, Fig. 220) auf den zunächst gewichtslos gedachten Hebel, so halten sie sich (nach § 64, 3a) das Gleichgewicht, wenn ihre Mittelkraft durch den Drehpunkt O geht. Dann verhalten sich die vom Drehpunkte auf die Krafrichtungen gefällten Lote O_i und O_k umgekehrt wie die Kräfte zu einander (vgl. Fig. 198). Dies hat nach dem Satze über die Wirkung zweier Drehkräfte (§ 64, 3b) auch dann Gültigkeit, wenn die Kräfte parallel und gleich gerichtet sind. Bezeichnet man nun die Lote vom Drehpunkte auf die Richtung der Kräfte als Hebelarme, so erlangt das in § 8 nur für einen besonderen Fall abgeleitete Hebelgesetz allgemeine Gültigkeit. Es ist in Zeichen:

$$P : Q = h_q : h_p \text{ oder } P \cdot h_p = Q \cdot h_q \dagger)$$

Nennt man das Produkt einer Kraft in den Hebelarm, an dem sie wirkt, das *statische*¹⁾ Moment der Kraft, so läßt sich das Hebelgesetz in der Form der *Momentengleichung* aussprechen:

†) Trigonometrisch: $P \cdot l \cdot \sin w = Q \cdot l_1 \cdot \sin w_1$, wenn mit l und l_1 die Entfernungen der Angriffspunkte der Kräfte vom Drehpunkte und mit w und w_1 die Winkel bezeichnet werden, unter denen die Kräfte auf den Hebel einwirken.

1) Statik, Lehre vom Gleichgewicht der Körper.



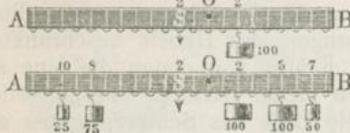
Am Hebel ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die statischen Momente gleich sind.

Bei 2 parallel und gleich gerichteten Kräften, mögen sie unter schiefen oder rechten Winkeln auf den Hebel wirken, ist es für die Gleichgewichtsbedingung einerlei, ob man das Verhältnis der Lote vom Drehpunkte auf die Richtungslinien der Kräfte oder das Verhältnis der Abstände des Drehpunktes von den beiden Angriffspunkten in die Momentengleichung aufnimmt.

b. Mehrere Kräfte wirken auf den Hebel.

Beim Gebrauche eines wirklichen Hebels wird der Einfluss seines Gewichtes aufgehoben, wenn man der Drehungsachse eine solche Lage giebt, dafs sie durch den Schwerpunkt geht. Liegt die Achse seitlich vom Schwerpunkte (S, Fig. 221), so ist das Drehungsmoment des

Fig. 221.



Hebelgewichtes mit in Rechnung zu ziehen. Da man sich unbeschadet der Wirkung den Schwerpunkt als Angriffspunkt des Gewichtes und den Hebel selbst als gewichtslos denken kann, so muß der Hebel im Gleichgewichte sein, wenn man z. B. eine dem Gewichte gleiche Kraft an der anderen Seite vom Drehpunkte in demselben Abstände wirken läßt. Bei der weiteren Belastung bleibt der Hebel offenbar im Gleichgewichte, wenn das Drehungsbestreben der links wirkenden Kräfte gleich dem der rechts wirkenden Kräfte ist. Wirken mehrere Kräfte auf einen Hebel, so gilt daher das Gesetz:

Ein Hebel ist im Gleichgewichte, wenn die Summe der statischen Momente aller Kräfte, welche den Hebel in der einen Richtung zu drehen streben, gleich ist der Summe der statischen Momente der in entgegengesetzter Richtung wirkenden Kräfte.

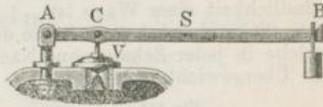
Ein gewichtslos gedachter Hebel wird mathematischer Hebel, ein wirklicher Hebel physischer Hebel genannt.

Die Gesetze des Hebels sind zuerst von Archimedes (220 v. Chr.) aufgestellt und mathematisch begründet worden.

Übungsstoff. 1. Die Kurbel eines Wellrades sei 30 cm lang, die daran wirkende Kr. betrage 10 kg. Wv. Kr. würde zur Überwindung derselben Last erforderlich sein, wenn die Kurbel nur 25 cm lang wäre? — 2. Wie lang müßte die Kurbel sein, wenn durch 8 kg Kr. die gleiche Wirkung hervorgebracht werden sollte? — 3. Die Welle eines Wellrades sei 10 cm dick. Wievielmals so groß würde das Drehungsmoment ein und derselben L. sein, wenn die Welle 15 cm dick wäre? — 4. Wende dies auf die zur Herstellung des Glgew. erforderliche Kr. an. — 5. Warum kann die Vergrößerung des Durchmessers einer Rolle keinen Einfluss auf das Verhältnis ausüben, in welchem Kr. und L. zu einander stehen? — 6. Wie ändert sich die drehende Wirkung einer Kr., welche an einem Hebel rechtwinklig wirkt, wenn a. ihr Angriffspunkt dem Drehpunkte von 60 cm bis auf 40 cm genähert wird, b. die Krafrichtung sich ändert? — 7. An einem Hebebaume wirke 20 cm vom Drehpunkte eine L. von 250 kg. Einfluss, wenn man a. den Angriffspunkt der L. dem Drehpunkte bis auf 15 cm näherte, b. die Lastrichtung änderte? — 8. Eine 2 m

lange Eisenstange, deren Schwerpunkt in der Mitte liege, sei an einem Ende unterstützt und werde am anderen Ende wagerecht gehalten; ihr Gew. betrage 40 kg. Wv. Kr. ist dazu nötig? — 9. Wv. ferner, wenn der Schwerpunkt a. 80, b. 60, c. 50, d. 40 cm vom Unterstützungspunkte entfernt läge? — 10. Welche Gleichung ergibt sich für die Gleichgewichtsbedingung des Hebels (Fig. 221), wenn die beiden äußeren Gewichtstücke rechts vertauscht würden und links 10 cm vom Drehpunkte ein Gew.

Fig. 222.



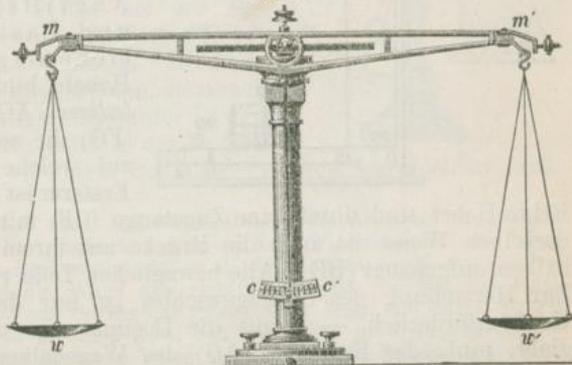
ergänzt werden sollte? — 11. Der mit dem Sicherheitsventil eines Dampfkessels verbundene Hebel AB (Fig. 222) sei 40 cm lang und wiege 3 kg, der Schwerpunkt S des Hebels liege 20 cm vom Drehpunkte entfernt. Wie groß ist der Druck auf das Ventil, wenn AC = 8 cm ist? — 12. Wie groß ferner, wenn 36 cm vom Drehpunkte ein Gewichtstück von 4,5 kg aufgehängt wäre? — 13. Welchen Druck würde das Ventil erleiden, wenn dasselbe Gewichtstück 10 cm weiter nach links gehängt würde?

§ 69. Hebel- oder Balkenwagen. (Hebelverbindung.)

Da das Gleichgewicht eines belasteten Hebels nicht allein von der Größe der Kraft abhängt, sondern auch von der Länge des Hebelarmes, an dem die Kraft wirkt, so kann man zum Wägen verschiedener Lasten entweder verschiedene Gewichte anwenden, welche man immer an demselben Hebelarme wirken läßt, oder ein und dasselbe Gewicht in verschiedenen Abständen vom Drehpunkte wirken lassen. Hiernach lassen sich verschiedene Arten von Hebelwagen unterscheiden.

1. Die gleicharmige Wage. Je nachdem dieselbe zum Gebrauche im täglichen Leben (Krämerwage, Fig. 10) oder zu sehr genauen Wägungen (chemische Wage, Fig. 223) dient, ist ihre Einrichtung verschieden. Bei der chemischen Wage bildet der Wagebalken ein festes Gerüst von leichten Metallstäben.

Fig. 223.



Die stählerne Achse ruht mit scharfer Schneide auf glattem Stahl oder einem harten, polierten Steine. Die Zunge ist abwärts gerichtet. Zum genauen Einstellen dienen mehrere Schrauben.

Eine gute Wage muß nicht nur richtig, sondern auch empfindlich sein. *Richtig ist eine Wage, wenn sie das Gewicht des zu wägenden Körpers ohne Fehler angiebt, empfindlich, wenn schon durch ein geringes Übergewicht ein deutlicher Ausschlag erfolgt.*

Die Richtigkeit einer gleicharmigen Wage erkennt man leicht daran, daß der Wagebalken ohne Belastung wie bei gleicher Belastung der Schalen eine horizontale Lage annimmt. Dies ist der Fall, wenn 1) die beiden Aufhängepunkte der Schalen vom Drehpunkte des Wagebalkens gleichweit entfernt sind und mit

ente
oder
ngung
linien
beiden

fluß
olche
seit-
des
g zu
t der
griffs-
Hebel
n, so
sein,
ichte
vom
teren
das
rechts
el, so

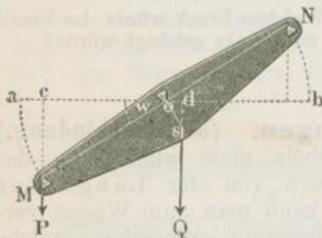
sta-
tung
er in
ein
auf-

daran
st er-
e die
erden
würde
e? —
arum
Ver-
sich
wenn
b. die
Dreh-
dem
2 m

diesem in gerader Linie liegen, 2) wenn die Gewichte beider Arme samt den Schalen und ihren Aufhängemitteln einander gleich sind.

Wie empfindlich eine Wage ist, ergibt sich, wenn man beide Schalen mit dem größten zulässigen Gewichte belastet und darauf untersucht, welches das kleinste Übergewicht ist, das noch einen deutlichen Ausschlag hervorruft. Die Größe der Empfindlichkeit wird durch einen Bruch ausgedrückt, dessen Zähler das kleinste Übergewicht und dessen Nenner die größte Belastung der Wage angibt. Die Empfindlichkeit einer Wage ist $\frac{1}{20000}$ heißt also, daß bei einer Belastung von 20000 g oder 20 kg durch 1 g noch ein deutlicher Ausschlag erfolgt. Chemische Wagen, welche in jeder Schale ohne Nachteil 1 kg zu tragen vermögen, müssen noch durch ein Übergewicht von höchstens 1 mg einen deutlichen Ausschlag geben ($\frac{1}{10000000}$).

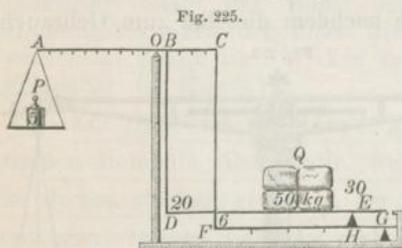
Fig. 224.



Bei den gewöhnlichen Wagen läßt sich eine solche Empfindlichkeit nicht erreichen, da der Wagebalken zum Tragen größerer Lasten auch die genügende Festigkeit haben muß.

Eine Wage ist um so empfindlicher, 1) je länger der Wagebalken ist, denn um so größer ist das Drehungsbestreben des Übergewichtes (P, Fig. 224), 2) je leichter der Balken ist, denn um so kleiner ist das als Last (Q) wirkende und im Schwerpunkte vereinigt gedachte Gewicht des Balkens, und 3) je näher der Drehpunkt dem Schwerpunkte des Wagebalkens liegt, denn um so kürzer ist bei einem Ausschlage des Balkens der zugehörige Hebelarm (od) jener Last.

2. Die Decimalwage (Brückenwage, Fig. 225). Sie ist eine aus



zwei Hebeln zusammengesetzte ungleicharmige Wage, bei welcher die Angriffspunkte der Kraft und Last eine unveränderliche Lage haben. Von diesen Hebeln bildet der eine den Wagebalken (AC), während der andere (FG) die sogen. Brücke (DE) trägt, auf welche die Last gestellt wird. Ersterer ist zwei-, letzterer einarmig.

Beide Hebel sind durch eine Zugstange (CF) miteinander verbunden. In derselben Weise ist auch die Brücke mit ihrem einen Ende am Wagebalken aufgehängt (BD). Alle beweglichen Teile ruhen auf Stahlschneiden. Zur Herstellung des Gleichgewichtes ist nur der 10. Teil der Last als Kraft erforderlich. — Damit die Decimalwage das Gewicht richtig angibt, muß der Kraftarm (AO) des Wagebalkens 10mal so lang sein als der bis zur Zugstange der Brücke reichende Teil des Lastarms (OB); ferner müssen sich die Abstände der Zugstangen vom Drehpunkte ebenso verhalten wie die Arme des einarmigen Hebels ($OB : OC = GH : GF$).

Der Hebel FG ist in Wirklichkeit gabelförmig und hat wie die Brücke rechts zwei Unterstützungspunkte. Decimalwagen sind besonders zum schnellen Wägen größerer Lasten geeignet.

Beispiel zur Erklärung der Wirkung einer Decimalwage: In Fig. 225 verhält sich $OB : OC = 1 : 5$. Da von der Last (Q) 20 kg auf die Zugstange BD und die übrigen 30 kg auf die Stahlschneide E einwirken, so erleidet der Lastarm des Wagebalkens in B einen Zug von 20 kg. Der von F aus durch den Hebel FG im Punkte C ausgeübte Zug beträgt zwar nur $\frac{2}{5} = 6$ kg, letztere regen

den Wagebalken aber ebenso stark zur Drehung an als $6 \times 5 = 30$ kg im Punkte B (warum?). Beides zusammen ergibt für B einen Zug von 50 kg. (Beim Gebrauch der Wage ist die Last mitten auf die Brücke zu stellen.)

Ist die Brückenwage so eingerichtet, daß die Last durch $\frac{1}{100}$ ihres eigenen Gewichtes im Gleichgewicht gehalten wird, so heißt die Wage *Centesimalwage* (Mauthwage).

3. Die *Schnellwage* (römische Wage, Fig. 226). Sie besteht aus einem *ungleicharmigen Wagebalken* (AB), an dessen kurzem Arme (AO) die Last (Q) aufgehängt wird, und dessen langer Arm (OB) zum Aufhängen eines sogen. *Laufgewichtes* (P) einen verschiebbaren Ring (M) trägt. Zur Herstellung des Gleichgewichtes schiebt man das Laufgewicht, je nachdem die Last größer oder kleiner ist, weiter nach dem Ende oder nach dem Drehpunkte des Balkens, man verlängert oder verkürzt also je nach Erfordernis den Kraftarm des Hebels. Die Teilstriche am Hebel sind mit Zahlen versehen, welche das Gewicht der Last unmittelbar angeben.

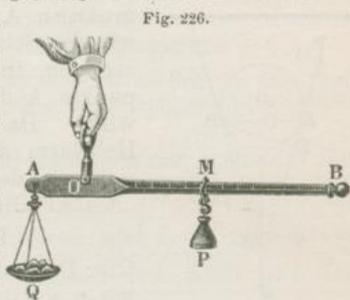


Fig. 226.

4. Die *Zeigerwage* (Fig. 227). Der Balken derselben ist gewöhnlich ein *Winkelhebel*, dessen abwärts gerichteter Kraftarm einen Zeiger bildet, welcher mit seiner Spitze bei der Belastung der Wage auf einem numerierten Gradbogen das Gewicht der Last anzeigt. Die Teile der Skala sind ungleich und werden demnach gewöhnlich durch das Auflegen bekannter Lasten bestimmt. Zur genauen Einstellung des Zeigers dienen Metallkugeln, die an einem Schraubengewinde verschiebbar sind.



Fig. 227.

Übungstoff. 1. Bei einer Krämerwage seien die Abstände der beiden Angriffspunkte vom Drehpunkte ungleich und zwar links 20, rechts 19,8 cm. Der kürzere Arm des Wagebalkens sei etwas stärker als der längere, sodafs vor der Belastung Glgew. entsteht und die Wage also richtig erscheint. a. Welches Gew. scheint die Ware zu haben, wenn sie auf der linken Seite liegt und durch 1,5 kg im Glgew. gehalten wird? b. Welches Gew. hat die Ware in Wirklichkeit? — 2. Bei einer anderen Wägung liege die Ware auf der rechten Schale und werde ebenfalls durch 1,5 kg im Glgew. gehalten. Welches ist a. das scheinbare, b. das wirkliche Gew. der Ware? — 3. In welchem Falle würde der Käufer und in welchem der Verkäufer im Nachteil sein, u. w.? — 4. Wie läfst sich eine derartige Unrichtigkeit einer Ware entdecken? — 5. Wenn man eine unrichtige Wage belastet ins Glgew. bringt und dann die Last mit Gewichtstücken vertauscht, ohne das Glgew. zu stören, so erhält man das richtige Gew. (sogen. Bordsache Doppelwägung). Worauf beruht dies? — 6. An dem einen Arm einer Krämerwage sei ein sogen. Laufgewicht aufgehängt, das angeblich nur den Zweck hat, die Wage nach dem Auflegen der Stoffe, welche zur Umhüllung der Ware dienen, ins Glgew. zu bringen, in Wirklichkeit aber auch sonst angewandt wird. In welchem Falle giebt dann die Wage das Gew. der Ware a. zu hoch, b. zu niedrig an; w.? — 7. Eine auf 50 kg geeichte Wage gebe bei ihrer größten zulässigen Belastung noch durch 1 g einen deutlichen Ausschlag. Gröfse der Empfindlichkeit? — 8. Für $Q = 80$ kg

ist der Zug zu berechnen, welchen die Punkte B und C (Fig. 225) unter der Annahme erleiden, daß der einarmige Hebel in E $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$ der Last trägt. — 9. Warum ist die Last am besten mitten auf die Brücke zu stellen? — 10. Die Brücke bewegt sich stets parallel zu sich selbst auf und ab. Erkl.!

§ 70. Rolle. Rollenverbindungen oder Flaschenzüge.

Das in § 9 angeführte Gesetz der losen Rolle hat nur für den Fall Gültigkeit, daß die Seilteile parallel sind. Um einen allgemeinen Ausdruck desselben zu erhalten, betrachten wir die Sehne AB des Seilbogens (Fig. 228) als einarmigen, in B unterstützten Hebel, in dessen Endpunkte A die Kraft und in dessen Mitte C die Last wirkt. Da BD als Lot auf die Krafrichtung den Hebelarm der Kraft und BC als Lot auf die Lastrichtung den Hebelarm der Last bildet, so entsteht offenbar Gleichgewicht, wenn $P \cdot DB = Q \cdot CB$ oder

$P : Q = CB : DB$ ist. Nun ist

$CB : DB = OB : AB$, da $\triangle OCB \sim \triangle ABD$; warum? †)
Folglich auch $P : Q = OB : AB$ oder in Worten:

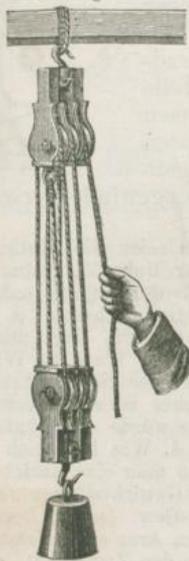
An der losen Rolle verhält sich die Kraft zur Last, wie der Radius der Rolle zur Sehne des Seilbogens.

Wie ergibt sich das früher angeführte Gesetz aus diesem allgemeineren Satze?

Fig. 229.



Fig. 230.



Der mechanische Vorteil, welchen die Anwendung von Rollen gewährt, läßt sich dadurch vergrößern, daß man Rollen zu sogen. Flaschenzügen miteinander verbindet. Eine sehr bekannte Rollenverbindung stellt der gemeine Flaschenzug dar (Fig. 229 und 230). Bei demselben sind zwei oder drei Rollen unter- oder nebeneinander in zwei Scheren (Flaschen oder Klöben) so befestigt, daß jede Rolle sich unabhängig von der anderen drehen kann. Die eine der beiden Scheren wird an einem festen Punkte aufgehängt und durch ein an ihrem unteren Ende befestigtes Seil mit der anderen Schere so verbunden, daß je 2 gleichliegende Rollen von einer Seilschleife umfaßt werden. An der frei herabhängenden Schere wirkt die Last (Q) während die Kraft (P) am freien Seilteile zum Heben der Last einen Zug ausübt.

†) Man betrachte $\sphericalangle BAD$ als Winkel des rechtwinkligen Dreiecks CAE und $\sphericalangle BOC$ als Winkel des rechtwinkligen Dreiecks BOE, so ergibt sich die Gleichheit dieser Winkel, da dieselben durch die beiden an E gelegenen gleichen Winkel zu rechten Winkeln ergänzt werden.

Wie sich Kraft und Last zu einander verhalten, folgt ohne weiteres daraus, daß eine Drehung der Rollen nicht eintreten kann, wenn die Spannungen aller Seilteile (bei paralleler Lage) gleich sind. Während nun die Kraft nur ein Seilteil gespannt hält, werden durch die Last alle übrigen Seilteile gespannt gehalten. Die Anzahl der letzteren Seilteile ist gleich der Zahl der vom Seile umspannten Rollen. — Das Verhältnis der Wege ergibt sich, wenn man die Verkürzung aller von der Last gespannt gehaltenen Seilteile (Lastweg) mit der Verlängerung des durch die Kraft angezogenen Seilteiles (Kraftweg) vergleicht. Beides läßt sich durch den Versuch bestätigen.

Hängt man den Flaschenzug umgekehrt so auf, daß die Scheren ihre Stellen wechseln, so wird die untere Rolle überflüssig. Zur Herstellung des Gleichgewichts ist dann $\frac{1}{2}$ der Last erforderlich; warum?

Am gemeinen Flaschenzuge herrscht Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält, wie die Zahl 1 zur Anzahl der vom Seile umspannten Rollen. — Die Wege, welche Kraft und Last zurücklegen, stehen zu einander im umgekehrten Verhältnis von Kraft und Last.

In Zeichen: $P : Q = 1 : n,$
 $W_p : W_q = Q : P = n : 1,$ wenn n die Anzahl der Rollen bedeutet.

Eine andere, ebenfalls sehr häufig angewandte Rollenverbindung ist der Differential-Flaschenzug (Fig 231). Dieser besteht aus einer *festen Doppelrolle*, welche durch eine *Kette ohne Ende* mit einer *losen Rolle* verbunden ist. Die beiden Durchmesser der Doppelrolle sind nur wenig voneinander verschieden (der größeren Deutlichkeit wegen in der Figur auffallender dargestellt). Die von derselben herabhängende Kette bildet zwei Schleifen, von denen eine die lose Rolle mit der Last trägt, die andere zum Angriffe für die Kraft lose herabhängt. Indem die Kette durch die Kraft P angezogen wird, wickelt sich der eine Teil der festen Schleife von dem kleineren Umfange der Doppelrolle (bei B) ab, während der andere Teil derselben sich auf den größeren Umfang (bei D) aufwickelt. Mit der losen Schleife findet das Umgekehrte statt. Dies hat zur Folge, daß die feste Schleife sich verkürzt und die Last gehoben wird, die lose Schleife sich dagegen verlängert. Ein Gleiten der Kette wird dadurch verhindert, daß sich auf den Umfängen der Rollen Vertiefungen befinden, in welche die einzelnen Kettenglieder eingreifen.

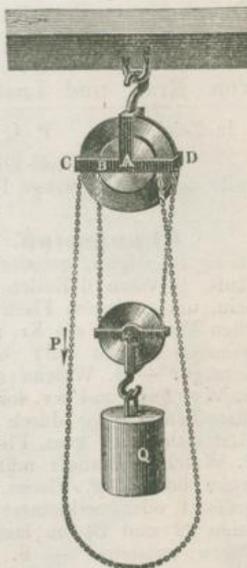


Fig. 231.

Das Verhältnis zwischen Kraft und Last ergibt sich, wenn man sich den Durchmesser CD der festen Doppelrolle als Hebel vorstellt, dessen Drehpunkt in A liegt und dessen Angriffspunkte C , B und D sind. Im Punkte C wirkt die Kraft, in B und D je die

Hälfte der Last auf den Hebel ein. Der dem Punkte B entsprechende Punkt, in welchem nur das Gewicht des Kettenteiles wirkt, kann vernachlässigt werden. Dieser Hebel ist nun nach § 68 im Gleichgewichte, wenn die Summe der Drehungsmomente für die Punkte C und B gleich dem Drehungsmomente für den Punkt D ist.

Beispiel: Ist $Q = 100$ kg, $AB = 9$, $AC = 10$ cm, so ist das Drehungsmoment für $C = 10 \times P$, für $B = 9 \times 50$, für $D = 10 \times 50$, die Gleichgewichtsbedingung also:

$$(10 \times 50P) + (9 \times 50) = 10 \times 50. \text{ Hieraus folgt:}$$

$$10 \times P = (10 \times 50) - (9 \times 50) \text{ oder } = (10 - 9) \times 50, \text{ mithin } P = 5 \text{ oder auch } P : 50 = (10 - 9) : 10. \text{ (In Worten nach der Bedeutung der Zahlen auszudrücken!)}$$

Allgemein: Bezeichnet $R (= AC)$ den größeren, $r (= AB)$ den kleineren Radius, so ist $R \cdot P + r \cdot \frac{Q}{2} = R \cdot \frac{Q}{2}$. Hieraus folgt:

$$R \cdot P = R \cdot \frac{Q}{2} - r \cdot \frac{Q}{2} = (R - r) \cdot \frac{Q}{2}; \text{ demnach}$$

$$P : \frac{Q}{2} = (R - r) : R \text{ oder}$$

$$P : Q = (R - r) : 2 R.$$

Durch den Versuch läßt sich nachweisen, daß die Wege sich umgekehrt zu einander verhalten wie Kraft und Last.

Am Differential-Flaschenzuge verhält sich die Kraft zur Last, wie die Differenz der beiden Halbmesser der festen Doppelrolle zum größten Durchmesser derselben sich verhält. — Die von der Kraft und der Last zurückgelegten Wege stehen zu einander im umgekehrten Verhältnis von Kraft und Last.

$$\text{In Zeichen: } P : Q = (R - r) : 2R \text{ und } W_p : W_q = Q : P.$$

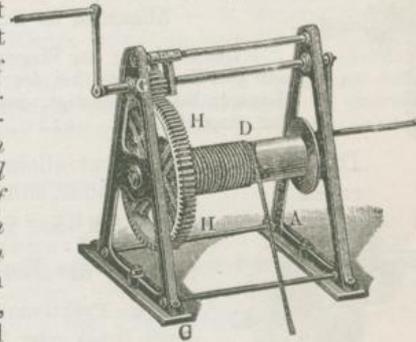
Der Differential-Flaschenzug bietet bei großer Kraftersparnis wesentliche Vorteile durch die geringe Länge der Kette.

Übungsstoff. 1. Wv. L. kann an einem gem. Flschz. durch 24, 30 und 36 kg im Glgew. gehalten werden, a. wenn das Seil um 2 feste und 2 lose Rollen läuft, b. wenn 6 Rollen vom Seile umspannt werden? — 2. Wv. Kr. würde nötig sein, um an jenem Flschz. 100, 120 und 150 kg im Glgew. zu halten? — 3. a. Welchen Weg muß die Kr. zurücklegen, wenn durch beide Flschze. die Last um 2 m gehoben werden soll? b. Um wv. wird die L. gehoben, wenn der Kraftweg 4 m beträgt? — 4. Welche mech. Arbeit wird dabei (Frage 3, a und b) geleistet? — 5. Wv. feste und wv. lose Rollen muß ein gem. Flschz. enthalten, wenn mittelst desselben 120 kg durch 30 kg im Glgew. gehalten werden sollen? — 6. Warum läßt sich beim gem. Flschz. die Anzahl der Rollen nicht beliebig vergrößern? — 7. Welchen Einfluß müßte es auf das Verhältnis zwischen Kr. und L. ausüben, wenn beim Diff.-Flschz. der Abstand der beiden Umfänge der festen Rolle vergrößert oder verkleinert würde? — 8. Die beiden Durchmesser der festen Rolle seien 22 und 24 cm lang, die L. gleich 600 kg; wv. Kr. ist erforderlich, damit Glgew. entsteht? — 9. Wv. L. kann an demselben Flschz. durch 20 kg Kr. im Glgew. gehalten werden? — 10. Wv. Rollen müßte ein gem. Flschz. enthalten, wenn die Kraftersparnis dieselbe sein sollte? — 11. Welchen Weg hat bei jenem Flschz. (8.) die Kr. bei einer einmaligen Umdrehung der festen Rolle zurückgelegt? — 12. Um wv. hat sich dabei der eine Teil der festen Schleife auf-, der andere abgewickelt? — 13. Beurteile hiernach, a. um wv. das Seil der festen Schleife sich verkürzt hat, b. um wv. die Schleife selbst dadurch kürzer geworden, um wv. die

L. also gehoben ist. c. wv. Arbeit geleistet ist. — 14. Welcher mech. V. und welcher mech. N. ist mit der Anwendung beider Flaschenzüge verbunden?

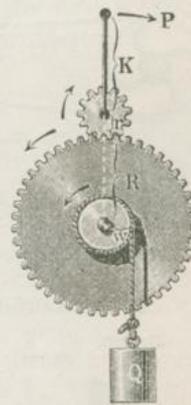
§ 71. Verbindungen des Wellrades. Nach § 10 läßt sich die Wirkung des einfachen Wellrades dadurch vergrößern, daß man eine dünnere Welle und ein größeres Rad anwendet. Diese Art der Veränderung des Wellrades läßt nur eine geringe Vergrößerung der Wirkung desselben zu (warum?). Um die Wirkung des Wellrades bedeutend zu erhöhen, befestigt man auf der Lastwelle ein Zahnrad und läßt die Kraft mittelst Kurbel auf eine besondere Welle einwirken, deren Zahnrad in das Zahnrad der ersten Welle eingreift (Fig. 232). In diesem Falle wird die Maschine *Seilwinde*, auch *Bockwinde* oder *Haspel* mit einfachem Vorgelege genannt.

Fig. 232.



In Fig. 233 sei w der Radius der Welle, an welcher die Last (Q) wirkt, R der Radius des auf dieser Welle befestigten großen (getriebenen) Rades, r der Radius des kleinen (treibenden) Rades, K die Kurbel. Damit Gleichgewicht entsteht, müssen die (in folgendem mit D bezeichneten) Druckwirkungen, welche die Zähne der beiden Räder durch die Kraft und Last in entgegengesetzter Richtung aufeinander ausüben, gleich sein. Das Verhältnis zwischen Kraft und Last läßt sich in folgender Weise berechnen:

Fig. 233.



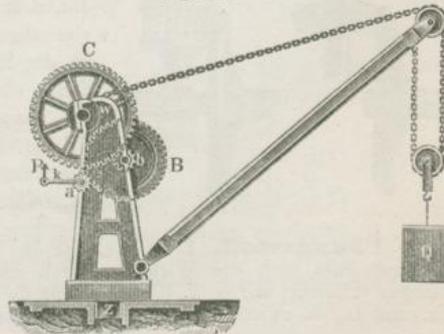
Beispiel: Ist $R = 4w$ und $K = 3r$, so ergibt sich nach § 10: $d = \frac{1}{4}Q$, aber auch $= 3P$, folglich $P = \frac{1}{12}Q$.

Allgemein: $D = \frac{W}{R} \cdot Q$, aber auch $= \frac{K}{r} \cdot P$, folglich $\frac{W}{R} \cdot Q = \frac{K}{r} \cdot P$, also auch $w \cdot r \cdot Q = K \cdot R \cdot P$, mithin $P : Q = w \cdot r : K \cdot R$; in Worten? Verhältnis der Wege?

Fig. 234.

Gezähnte Räder, deren Zähne die Richtung des Radhalbmessers haben, werden *Stirnräder* genannt (Fig. 233 bis 235). Ihre Wellen liegen parallel zu einander. — Winden mit mehrfachem Vorgelege werden als *Kräne* (Fig. 234) an Bahnhöfen, Häfen, in Maschinenfabriken u. s. w. angewandt.

Um große Lasten auf eine geringe Höhe zu heben, bedient man sich häufig der *Wagenwinde* (Fig. 235, folg. Seite), d. h. einer Vorrichtung, bei welcher ein



kleines Zahnrad (Getriebe) in eine Zahnstange eingreift, die beim Drehen der Kurbel sich auf- oder abbewegt. Rad und Stange sind von einem starken Gehäuse um-

geben. Beim Gebrauche stemmt man die Winde unter den zu hebenden Gegenstand. Ist die Kurbel (K) etwa 5 mal so lang als der Halbmesser (r) des Rades, so ist $P = \frac{1}{5} Q$. — Wie verhalten sich hiernach die Wege zu einander?



Allgemein ist $P : Q = r : K$, oder in Worten?

Die Wirkung der Wagenwinde läßt sich dadurch verstärken, daß man die Kurbel wie bei der Seilwinde auf der Achse eines besonderen, kleineren Rades befestigt, dessen Zähne in das in die Stange einfassende Rad eingreifen.

Das Wellrad dient nicht allein zur Bewältigung großer Lasten und Widerstände, sondern namentlich dazu, eine drehende Bewegung von einer Welle auf eine andere zu übertragen. Je nach der Art dieser Übertragung unterscheidet man außer den Stirnrädern:

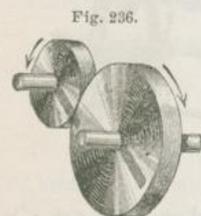


Fig. 236.

Fig. 237.

a. Friktionsräder, d. h. Räder, welche unmittelbar durch Druck oder Reibung bei der Berührung ihrer Umfänge die Bewegung übertragen (Fig. 236). Ihre Anwendung beschränkt sich auf solche Fälle, in denen die Widerstände sehr gering sind (Buchdruckerpresse, Morse-Telegraph).

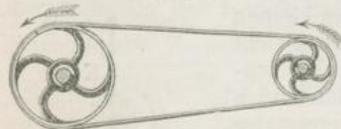
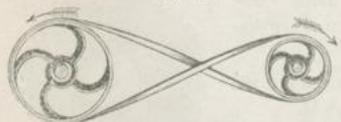


Fig. 238.



b. Riemenscheiben (Fig. 237 und 238). Dieselben dienen dazu, die Drehung einer Welle auf eine entfernte andere Welle zu übertragen. Zu diesem Zwecke werden 2 nicht mit Zähnen versehene Räder (Riemenscheiben) beider Wellen durch einen sogen. Riemen ohne Ende verbunden. Je nachdem beide Wellen sich in derselben oder in entgegengesetzter Richtung drehen sollen, verfährt man wie bei Fig. 237 oder wie bei Fig. 238 (Drehbank, Nähmaschine).

c. Winkelräder (Fig. 239 und 240). Soll die Bewegung einer Welle auf eine zu dieser senkrecht stehende andere Welle übertragen werden, so geschieht dies durch Winkelräder.

Fig. 239.

Fig. 240.

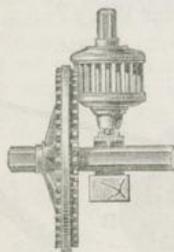


Fig. 239 stellt 2 konische Winkelräder dar, d. h. zwei Räder, deren Radkränze die Form von abgestumpften Kegeln haben. In Fig. 240 ist die Einrichtung dargestellt, bei welcher die Zähne eines auf der horizontalen Welle befestigten Kamm- oder Kronrades zwischen die Triebstücke des auf der senkrechten Welle angebrachten sogen. Drehlings oder Trillings eingreifen.

Übungsstoff. 1. Bei welcher der beiden einfachen Maschinen (Hebel und Wellrad) läßt sich die Wirkung durch bloße Größenveränderung der Teile am meisten erhöhen; w.? — 2. Welchen Einfluß würde es auf das Verhältnis a. zwischen Kr. und L., b. zwischen den Wegen, welche Kr. und L. bei einer Drehung zurück-

legen, ausüben, wenn bei einer Seilwinde von den vier Teilen w , R , r und K je einer an GröÙe zu- oder abnähme? (Drücke diese und die folgende Frage ganz in Worten aus.) — 3. Bei einer Seilwinde sei $w = 5$, $R = 35$, $r = 6$, $K = 30$ cm und $P = 20$ kg. Wie groß ist Q ? — 4. Wie verhalten sich die Wege zu einander? — 5. Wv. Arbeit wird geleistet, wenn die Last um 4 m gehoben wird? — 6. Bei einer einfachen Wagenwinde sei $r = 4$, $K = 24$ cm, $Q = 180$ kg; wie groß ist P , und wie verhalten sich die Wege zu einander? — 7. Wie groß ist die geleistete Arbeit, wenn die L 30 cm hoch gehoben wird? — 8. Worin besteht bei den beiden angeführten Maschinen der mech. V. und worin der mech. N.? — 9. Weise durch eine Rechnung an den in Frage 3 bis 6 angeführten Beispielen nach, daß bei beiden Maschinen der mech. N. dem mech. V. gleich ist. — 10. Man will die drehende Bewegung einer Welle auf eine andere Welle übertragen. Wie kann man dabei verfahren, a. wenn beide Wellen parallel sind, b. wenn sie rechtwinklig zu einander stehen? — 11. Führe aus eigener Anschauung Fälle an, in denen die eine oder andere dieser Einrichtungen vorkommt.

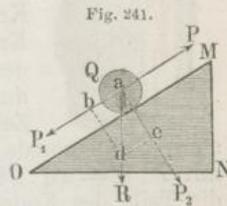
2. Die Gruppe der schiefen Ebene.

§ 72. Schiefe Ebene, Keil und Schraube. Die Gesetze der schiefen Ebene, des Keiles und der Schraube (§ 11—13) finden ihre eigentliche Erklärung durch das Parallelogramm der Kräfte.

1. Die schiefe Ebene.

a. Die Kraft wirke parallel zur Ebene.

Auf der schiefen Ebene OM (Fig. 241) werde die Last Q durch eine Kraft P parallel zur Ebene im Gleichgewichte gehalten; der Schwerpunkt a des Körpers Q sei der Angriffspunkt dieser Kraft. Um die GröÙe der Kraft P zu erhalten, bestimmen wir zunächst die GröÙe einer Kraft P_1 , welche jener Kraft gerade entgegengesetzt ist; sind beide gleich, so muß offenbar Gleichgewicht eintreten. Diese Kraft ergibt sich dadurch, daß man die durch das Gewicht des Körpers gegebene senkrechte Zugkraft $R = ad$, als deren Angriffspunkt ebenfalls der Schwerpunkt des Körpers angesehen werden kann, durch das Parallelogramm $abcd$ in 2 Seitenkräfte zerlegt, von denen die eine der Ebene parallel, die andere senkrecht zur Ebene gerichtet ist, die erstere also nur eine Bewegung, die letztere nur einen Druck zu erzeugen vermag. In welchem Verhältnis steht dann die Kraft P_1 , also auch die Kraft P , zur Last, und wie groß ist der Druck, welchen die schiefe Ebene durch die Last erleidet?



Um das Verhältnis dieser Kräfte durch die Teile der schiefen Ebene ausdrücken zu können, sind die beiden rechtwinkligen Dreiecke abd und MNO miteinander zu vergleichen. Es ist

$$\triangle abd \sim \triangle MNO \text{ (warum?)}, \text{ folglich } ab : ad = MN : MO \text{ oder}$$

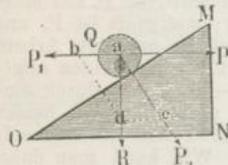
$$P : Q = \text{Höhe} : \text{Länge der Ebene}; P = Q \cdot \frac{h}{l} \dagger$$

Wie verhält sich der Druck, den die Ebene erleidet, zur Last?

†) Trigonometrisch: $P = Q \cdot \sin w$, wenn w den Neigungswinkel der schiefen Ebene bezeichnet (weil $ab = ad \cdot \sin \sphericalangle bda$ und $\sphericalangle bda = w$).

b. Die Kraft wirke parallel zur Basis der Ebene.

Wie ist Fig 242 nach obigem zu erklären? — In welchem Verhältnis stehen die Kräfte P_1 und P_2 zur Last Q ? — Es ist auch hier



$$\triangle bad \sim \triangle MNO \text{ (warum?)}, \text{ folglich} \\ ab : ad = MN : NO \text{ oder}$$

$$P : Q = \text{Höhe} : \text{Basis der Ebene}; P = Q \cdot \frac{h}{b} \text{ †)}$$

Wie verhält sich der Druck, den die Ebene erleidet, zur Last? — Wie erklärt es sich, daß der Druck auf die Ebene in diesem Falle größer ist als das Gewicht des Körpers?

2. Der Keil.

MON, Fig. 243, stelle einen Doppelkeil dar, auf welchen senkrecht gegen seine Seiten der Druck Q wirke; diesen beiden Kräften soll durch eine senkrecht auf den Rücken wirkende Kraft P das Gleichgewicht gehalten werden. — Da der Keil sich unter der alleinigen Wirkung der beiden seitlichen Druckkräfte aufwärts bewegen würde, so muß offenbar Gleichgewicht entstehen, wenn die Kraft P ebensogroß ist als eine ihr gerade entgegengesetzte Kraft, welche als die Mittelkraft jener beiden Druckkräfte angesehen werden kann. Zur Bestimmung dieser Kraft denken wir uns die Angriffspunkte der seitlichen Kräfte nach dem auf der Mittellinie des Keiles liegenden Punkte a verlegt und die Größe dieser Kräfte durch die gleichen Geraden ab und ac dargestellt. Zeichnet man dann das Parallelogramm der Kräfte, so stellt die Diagonale ad die gesuchte Mittelkraft R dar. Es verhält sich somit $P : Q = ad : ab$ (oder $a c$). Dasselbe Verhältnis läßt sich auch durch die Teile des Keiles ausdrücken, denn es ist



$\triangle dba \sim \triangle MON$, da ihre Seiten paarweise senkrecht aufeinander stehen, ihre Winkel also beziehungsweise gleich sind. Folglich

$$ad : ab = MN : MO \text{ oder } P : Q = \text{Rücken} : \text{Seite des Keiles. ††)}$$

Beim einfachen Keil, dessen Querschnitt ein rechtwinkliges Dreieck ist, kommt das Gesetz der schiefen Ebene zur Anwendung (die Kraft wirkt parallel zur Basis der Ebene).

3. Die Schraube.

Da man sich die Schraube als eine um einen Cylinder gewundene schiefe Ebene vorstellen kann, deren Länge den Schraubengang und deren Basis den Umfang des Cylinders darstellt, so haben die auf

†) Trigonometrisch: $P = Q \cdot \tan w$, wenn w wiederum den Neigungswinkel der Ebene bezeichnet (weil $ab = ad \cdot \tan \sphericalangle bda$ und $\sphericalangle bda = w$).

††) Trigonometrisch: $P = 2Q \cdot \sin \frac{w}{2}$, wenn $w (= \sphericalangle dba)$ den Keilwinkel bezeichnet ($\frac{1}{2}ad = ab \cdot \sin \frac{\sphericalangle dba}{2}$; folglich $ad = 2ab \cdot \sin \frac{\sphericalangle dba}{2}$).

Fig. 243 bezüglich den Betrachtungen zugleich für die Schraube Giltigkeit. Man erhält also mit veränderter Bezeichnung:

$$P:Q = \text{Ganghöhe} : \text{Umfang der Schraube oder}$$

$$P:Q = \text{Ganghöhe} : \text{Kreisweg der Kraft.}$$

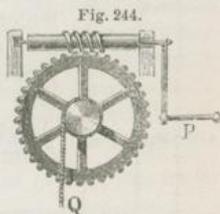
Der letztere Ausdruck ist insofern allgemeiner, als er auch auf den Fall angewandt werden kann, daß die Kraft nicht am Umfange der Spindel, sondern wie in Fig. 41 und 42 am äußeren Ende eines durch den Kopf der Spindel gesteckten Stabes wirkt. Die Schraube läßt sich dann sovielmal leichter drehen, wievielmals der Stab (von der Achse der Spindel bis zum Angriffspunkte der Kraft gemessen) länger ist als der Radius der Schraubenspindel, denn der Stab stellt offenbar einen Hebel dar, dessen Drehpunkt mit der Achse zusammenfällt, und dessen Angriffspunkt der Last am Umfange der Spindel liegt.

Die Schraube ohne Ende. Sie besteht aus einer Schraubenspindel, deren Windungen in die Zähne eines Wellrades eingreifen. Die Kraft wirkt an einer an der Schraubenspindel befestigten Kurbel, die Last mittelst eines Seiles oder einer Kette an der Welle. Durch jede Umdrehung der Spindel wird das Zahnrad um eine Ganghöhe verschoben. Bezeichnet r den Radius der Welle, R den des Rades, h die Ganghöhe der Schraube, W den Kreisweg der Kraft, so ist, wenn wir wie bei der Seilwinde (§ 71) mit D den Druck bezeichnen, welchen die Zähne des Wellrades und die Schraubengänge gegeneinander ausüben,

$$D = \frac{r}{R} \cdot Q, \text{ aber auch } = \frac{W}{h} \cdot P, \text{ folglich}$$

$$\frac{r}{R} \cdot Q = \frac{W}{h} \cdot P, \text{ also auch } r \cdot h \cdot Q = R \cdot W \cdot P, \text{ mithin}$$

$$P:Q = r \cdot h : R \cdot W; \text{ in Worten?}$$



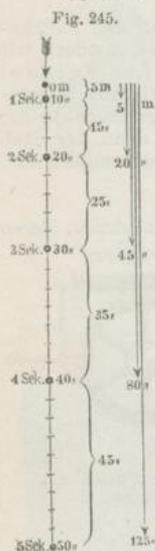
Übungsstoff. 1. Warum sind in den Kräfte-Parallelogrammen, Fig. 241 und 242, die Richtungen der Seitenkräfte so gewählt, daß die eine derselben der Kraft P gerade entgegengesetzt ist, die andere senkrecht zur Ebene wirkt? — 2. Welchen Einfluß muß es auf die Länge der Seiten jener Parallelogramme ausüben, wenn der Neigungswinkel der Ebene a kleiner, b größer wird? — 3. Beurteile hiernach die Veränderung, welche 1) die Größe der Kraft P , 2) die Größe des Druckes dadurch erfährt. — 4. Vergleiche die Druckwirkungen, welche die Ebene (Fig. 241 und 242) durch die gleiche Last bei Herstellung des Glgew. erleidet, wenn der Neigungswinkel derselbe ist. — 5. Bei welcher Richtung der Kraft P muß dieser Druck noch größer sein? — 6. Wie ändert sich beim Keile (Fig. 243) die Richtung der Seiten des Parallelogramms, wenn der Keilwinkel seine Größe ändert? — 7. Welchen Einfluß übt dies auf die Länge der Diagonale aus? — 8. Inwiefern ist daher die Größe der Kraft von der Größe des Keilwinkels abhängig? — 9. Unter den drehbaren einfachen Maschinen ist die Schraube diejenige, bei welcher am meisten an Kraft gewonnen werden kann, warum? — 10. In welchem Verhältnis vergrößert sich die Wirkung der Schraube, wenn die Kr. an einem durch den Kopf derselben gesteckten Stabe wirkt? — 11. Die Kurbel einer Schraube ohne Ende sei 25 cm lang, die Ganghöhe 2 cm, der Halbmesser des Zahnrades 40 cm, derjenige der Welle 8 cm. a. Wv. L. kann dann mit 10 kg Kr. überwunden werden? b. Welchen Weg muß die Kr. zurücklegen, wenn die L. um 2 m gehoben werden soll? c. Welche Arbeit wird dabei geleistet?

C. Besondere Bewegungen.

§ 73. Freier Fall und senkrechter Wurf.

1. Der freie Fall. Im luftleeren Raume fallen alle Körper gleichschnell (vergl. § 6). Da der *freie Fall* durch die Schwerkraft, also durch eine unveränderlich wirkende Kraft hervorgerufen wird, so muß derselbe eine *gleichmäßig beschleunigte Bewegung* sein (§ 57). Die Größe der Beschleunigung, welche die Schwerkraft einem frei fallenden Körper zu erteilen vermag, läßt sich durch das freie Fallen desselben nur annähernd ermitteln, da die Bewegung zu schnell erfolgt und im luftgefüllten Raume der Widerstand der Luft hemmend auf dieselbe einwirkt. Berechnungen, welche man auf Grund sehr genauer Pendelversuche anstellte, haben ergeben, daß *ein im luftleeren Raume frei fallender Körper unter 45° geographischer Breite in 1 Sek. eine Geschwindigkeit von nahezu 9,806 m erlangt* (am Äquator 9,708, in Berlin annähernd 9,813, am Pol beinahe 5 cm mehr als am Äquator.)

Diese Geschwindigkeit wird Beschleunigung der Schwere genannt und mit g (*gravitas*) bezeichnet. Nimmt man dieselbe abgerundet zu 10 m an, so hat der Körper in der 1. Sekunde des freien Falles einen Weg von 5 m zurückgelegt, denn da seine Geschwindigkeit von 0 bis 10 m gleichmäßig wächst, so muß der zurückgelegte Weg dem arithmetischen Mittel beider Zahlen entsprechen, also $\frac{0+10}{2} = 5$ m sein (vergl. §§ 57 und 58). Da die Schwere auch in der 2. Sek. in gleicher Weise wie in der 1. Sek. auf den fallenden Körper einwirkt, so muß sie auch seine Geschwindigkeit um gleichviel vermehren, mithin beträgt die zu Ende der 2. Sek. erlangte Geschwindigkeit 20 m; der Fallraum der 2. Sek. aber ist $\frac{10+20}{2} = 15$ m u. s. w. Die auf diese Weise abgeleiteten Endgeschwindigkeiten und Fallräume stellt Fig. 245 dar; in Form einer Tabelle lassen sich dieselben übersichtlich zusammenstellen.



Anzahl der Sekunden	Endgeschwindigkeit	Fallräume der einzelnen Sek.	Gesamtfallraum
1	1. g	$\frac{1}{2} \cdot g$	1. $1 \frac{g}{2}$
2	2. g	$\frac{3}{2} \cdot g$	2. $2 \frac{g}{2}$
3	3. g	$\frac{5}{2} \cdot g$	3. $3 \frac{g}{2}$
.	.	.	.
.	.	.	.
t	$t \cdot g$	$(t - \frac{1}{2}) \cdot g$	$t \cdot t \frac{g}{2}$

Aus dieser Zusammenstellung ergibt sich das Gesetz:

Die Endgeschwindigkeiten eines frei fallenden Körpers wachsen wie die Fallzeiten, die einzelnen Fallräume wie die ungeraden Zahlen und die ganzen Fallräume wie die Quadrate der Fallzeiten.

Ein kürzerer Ausdruck für dieses Gesetz ist durch die Gleichungen gegeben:

$$\text{I. } v = gt; \quad \text{II. } s_1 = (t - \frac{1}{2})g; \quad \text{III. } s = \frac{g}{2} \cdot t^2.$$

Gleichung I giebt die Formel für die Berechnung der Endgeschwindigkeit (v), Gleichung II für die Berechnung der einzelnen Fallräume (s_1), Gleichung III für die des Gesamtfallraumes (s). Setzt man den Wert $t^2 = \frac{2s}{g}$ (aus Gl. II) in die Gl.

$v^2 = g^2 t^2$ (Gl. I quadriert) ein, so ergibt sich

$$v^2 = g^2 \cdot \frac{2s}{g} = 2gs$$

$$v = \sqrt{2gs}, \quad \text{wonach sich die Endgeschw. aus der Fallhöhe berechnen läßt.}$$

Bem. Wie hier, so ist auch in den folgenden Paragraphen bei allen Bewegungen im luffterfüllten Raume vom Widerstande der Luft abgesehen.

Die Fallgesetze wurden von Galilei (geb. 1564 zu Pisa, gest. 1642) im Jahre 1602 aus Beobachtungen abgeleitet, welche derselbe an glattpolierten Messingkugeln machte, die in schräg gestellten, mit glattem Pergament ausgelegten hölzernen Rinnen herabrollten. Dadurch wurde die Fallbewegung verlangsamt, denn die Kraft, mit welcher ein Körper sich auf einer schiefen Ebene hinabbewegt, verhält sich (nach § 72) zu der Kraft, mit welcher er frei fällt, wie die Höhe der Ebene zur Länge derselben. Beträgt die Steigung der Ebene $\frac{1}{n}$, so hat man alle für den freien Fall gültigen Werte mit $\frac{1}{n}$ zu multiplizieren, um die entsprechenden Werte für die schiefe Ebene zu erhalten. In demselben Verhältnis ist also auch die Beschleunigung beim Falle auf der schiefen Ebene geringer als beim freien Falle.†) Am einfachsten und sichersten gelingt der Nachweis der Fallgesetze mittelst der Atwoodschen Fallmaschine (§ 58). Die genaue Beobachtung des wirklichen freien Falles, die Benzenberg (1802) am Michaelisturm in Hamburg und Reich (1832) in einem Bergwerkschacht in Freiberg mit großer Sorgfalt vornahm, ist schwierig und schon dadurch sehr beschränkt, daß die erforderlichen großen Fallräume nicht vorhanden sind.

2. Der senkrechte Wurf. Während beim freien Falle nur eine Kraft wirkt, sind die Wurfbewegungen ein Ergebnis vom Zusammenwirken zweier Kräfte. Die einzelnen Bewegungsrichtungen, in welchen die Wurfkraft und die Schwerkraft auf den geworfenen Körper einwirken, bilden entweder eine gerade Linie (senkrechter Wurf), oder sie schließen einen Winkel ein (wagerechter und schiefer Wurf). Wird der Körper senkrecht aufwärts geworfen, so wirkt die Schwerkraft der Wurfkraft gerade entgegen. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Körper aufsteigt, muß daher in jeder folgenden Sekunde seiner aufwärts gerichteten Bewegung um 10 m abnehmen; *die Bewegung ist somit eine gleichmäßig verzögerte*. Wird ein Körper senkrecht abwärts geworfen, so

†) Trigonometrisch ausgedrückt: $g_1 = g \cdot \sin w$, wenn g_1 die Beschleunigung beim Fall auf der schiefen Ebene und w den Neigungswinkel der Ebene bezeichnet. Die oben aufgestellten Formeln für den freien Fall behalten Gültigkeit für den Fall auf der schiefen Ebene, wenn in denselben statt g überall $g_1 = g \cdot \sin w$ gesetzt wird. Die Endgeschw., mit welcher ein Körper am Fusse der schiefen Ebene ankommt, nachdem er die Länge derselben durchlaufen hat, ergibt sich demnach:

$$v = \sqrt{2g_1 s} = \sqrt{2g \cdot \sin w \cdot s} = \sqrt{2g \cdot \frac{h}{l} \cdot l} = \sqrt{2gh}; \quad \text{in Worten?}$$

vergrößert sich seine Geschwindigkeit durch die Schwerkraft in jeder Sekunde um 10 m; die Bewegung ist also eine gleichmäßig beschleunigte.

Beispiel zum senkrecht aufwärts gerichteten Wurf.

a. Geschwindigkeiten

beim Steigen:		beim Fallen:	
(Von unten zu lesen.)		(Von oben zu lesen.)	
„	„	5. „	50—5.10 = 0 „ ↑ Anfangsgeschwindigkeit 0 m
„	„	4. „	50—4.10 = 10 „ ↑ Geschw. nach der 1. Sek. 10 „
„	„	3. „	50—3.10 = 20 „ „ „ „ 2. „ 20 „
„	„	2. „	50—2.10 = 30 „ „ „ „ 3. „ 30 „
„	„	1. „	50—1.10 = 40 m „ „ „ 4. „ 40 „
„	„	0. „	50—0.10 = 50 m „ „ „ 5. „ 50 „ ↓

Die Geschwindigkeit eines senkrecht geworfenen Körpers nimmt beim abwärts gerichteten Wurf um ebensoviele zu, beim aufwärts gerichteten Wurf während des Steigens um ebensoviele ab, als sie beim freien Falle in der gleichen Zeit zunimmt.

Wenn a die Anfangsgeschwindigkeit bezeichnet und v , g und t die oben angegebene Bedeutung haben, so ist in Zeichen:

$$v = a \pm gt.$$

Hat der Körper den höchsten Punkt seiner Bahn erreicht, so ist $v = 0$. Setzt man dies in der Gleichung $v = a - gt$ ein, so erhält man

$$gt = a \text{ und daraus die Steigdauer}$$

$$t = \frac{a}{g}; \text{ in Worten?}$$

Für die Endgeschwindigkeit beim Fallen ergibt sich demnach:

$$v = gt = g \cdot \frac{a}{g} = a; \text{ in Worten?}$$

Ein senkrecht aufwärts geworfener Körper steigt ebenso lange, als er fällt; die Endgeschwindigkeit, welche er durch das Herabfallen erlangt, ist gleich der Anfangsgeschwindigkeit a .

b. Höhen und Fallräume.

(Von unten zu lesen.)		(Von oben zu lesen.)	
„	„	5. „	50—9.5 = 5 „ ↑ Der K. fällt in der 1. Sek. 1.5 = 5 m
„	„	4. „	50—7.5 = 15 „ „ „ „ „ 2. „ 3.5 = 15 „
„	„	3. „	50—5.5 = 25 „ „ „ „ „ 3. „ 5.5 = 25 „
„	„	2. „	50—3.5 = 35 „ „ „ „ „ 4. „ 7.5 = 35 „
„	„	1. „	50—1.5 = 45 m „ „ „ „ 5. „ 9.5 = 45 „ ↓

Da der Weg, welchen ein in gerader Linie zu zwei Bewegungen angeregter Körper zurücklegt, bei entgegengesetzter Richtung der Kräfte gleich dem Unterschiede der Einzelwege ist (§ 63), so gilt der Satz:

Die Steighöhe eines senkrecht aufwärts geworfenen Körpers ist um den Fallraum der Steigzeit kleiner als diejenige Höhe, welche er während dieser Zeit durch die Wurfkraft allein erreichen würde.

$$\text{In Zeichen:} \quad h = at - t^2 \frac{g}{2}.$$

Drückt man wie oben die Zeit durch die Wurfgeschwindigkeit und die Beschleunigung der Schwere aus ($t = \frac{a}{g}$), so erhält man:

$$h = \frac{a^2}{2g}; \text{ in Worten?}$$

Übungsstoff. 1. Ist die Meinung richtig, ein K. falle deshalb immer schneller, weil die Erde ihn immer stärker anziehe? Grund! — 2. Wie mag sich diese Meinung gebildet haben? — 3. Wie erklärt es sich, daß die Geschw. des freien Falles mit der Fallmaschine (Fig. 188) nachgewiesen werden können, obgleich die Bewegung viel langsamer erfolgt? — 4. Bei jenen Versuchen war die Beschleunigung 20 cm , wenn $Q = Q_1 = 122,5\text{ g}$ und $p = 5\text{ g}$, desgl. 40 cm , wenn $Q = Q_1 = 120\text{ g}$ und $p = 10\text{ g}$, ferner wieder 20 cm , wenn $Q = Q_1 = 245\text{ g}$ und $p = 10\text{ g}$. Grund! — 5. Wie groß etwa hätten die Gewichte sein müssen, wenn die Beschleunigungen ebensoviele cm betragen sollten, als sie beim freien Falle Meter betragen? — 6. Wie ist durch eine rinnenförmige schiefe Ebene dasselbe zu erreichen? — 7. Ein Stein gebrauche 4 Sek. , um von einem Turme frei auf den Boden zu fallen. a. Endgeschw., b. Höhe des Turmes? — 8. Wv. später ist das Aufschlagen des Steines von oben zu hören, als unten? — 9. Auf der Festung Königstein befindet sich ein Brunnen von solcher Tiefe, daß ein hinabfallender Stein erst nach $5\frac{1}{2}\text{ Sek.}$ unten ankommt? Wie tief ist der Brunnen? — 10. Wievielmals so schnell gelangt dabei der Schall von unten nach oben als der Stein nach unten? — 11. Wievielmals so groß ist der Luftwiderstand beim freien Falle nach $2, 3, 4, 5\text{ Sek.}$ als nach 1 Sek. ? (§ 61.) — 12. Geschw. einer senkrecht aufwärts geschossenen Kugel nach 10 Sek. ? (Wurfgeschw. = 300 m.) — 13. Nach wv. Sek. kommt die Kugel unten wieder an? Steighöhe! — 14. Wie groß ist ihre Geschw. 5 Sek. vor dem Aufschlagen auf den Boden? — 15. Eine andere Kugel bleibe 1 Minute aus. Wie hoch ist sie gestiegen?

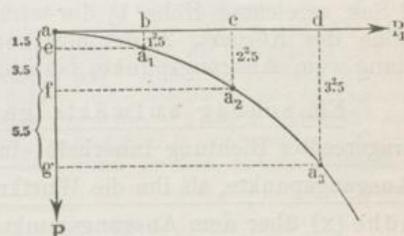
§ 74. Wagerechter und schiefer Wurf.

1. Der wagerechte Wurf. Angenommen, eine Kugel werde in wagerechter Richtung abgeschossen und lege in 1 Sekunde den Weg

ab zurück (Fig. 246). Wirkte dann keine andere Kraft auf die Kugel ein, so würde diese sich vermöge der Trägheit stets in derselben Richtung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegen ($ab = bc = cd$ u. s. w.); ihre Bahn bildete eine gerade Linie. Da die Kugel jedoch der Wirkung der Schwerkraft unterliegt, so sinkt sie innerhalb der $1.\text{ Sek.}$ um den Fallraum dieser Sekunde, nämlich

um 5 m , unter die Schußlinie herab, in der $2.\text{ Sek.}$ um 3.5 m , in der $3.\text{ Sek.}$ um 5.5 m u. s. w.; oder in 2 Sek. um $2^2 \cdot 5\text{ m}$, in 3 Sek. um $3^2 \cdot 5\text{ m}$ u. s. w. Man erhält demnach den Ort, an welchem die abgeschossene Kugel nach Ablauf einer jeden Sek. unter der Wirkung der Schwerkraft ankommt, durch das Parallelogramm der Bewegungen. Die Wege, welche die Kugel in den einzelnen Sekunden zurücklegt, können nicht geradlinig sein. Wäre letzteres der Fall, so müßte die Kugel z. B. nach $\frac{1}{2}\text{ Sek.}$ schon um die Hälfte von 5 m gesunken sein. Dies ist unmöglich, da jeder frei fallende Körper wegen der zunehmenden Geschwindigkeit in jedem folgenden Zeiteilchen einen größeren Weg zurücklegt als in dem vorhergehenden. Die Kugel muß somit nach $\frac{1}{2}\text{ Sek.}$ sich noch über der Diagonale des Parallelogramms befinden. Dasselbe gilt auch für jeden anderen Bruchteil der $1.\text{ Sek.}$ wie für alle folgenden Sekunden. Da die Ablenkung von der eingeschlagenen Richtung eine stetige ist und gesetzmäßig erfolgt, so muß die Bahn der Kugel eine *gesetzmäßig gekrümmte Linie* sein.

Fig. 246.

jeder
igte.0 m
0 "
0 "
0 "
0 "
0 "
rpers
auf-
als

oben

Setzt

enso
das
a.5 m
5 "
5 "
5 "
5 "ngen
räfte
Satz:
s ist
e er

die

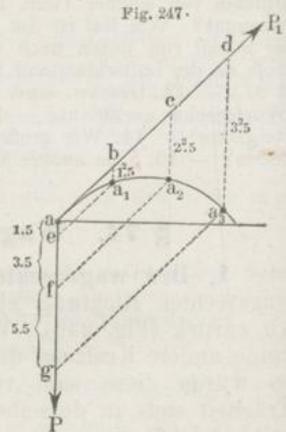
Ein wagerecht geworfener Körper entfernt sich in wagerechter Richtung innerhalb einer bestimmten Zeit so weit von seinem Ausgangspunkte, als ihn die Wurfkraft allein treiben würde; er sinkt dabei so tief herab, als ob er der Schwerkraft allein folgte.

Wenn y die wagerechte Entfernung, a die Anfangsgeschwindigkeit und x die Tiefe unter der Horizontalen bezeichnet, so ist in Zeichen:

$$y = ta \text{ und } x = t^2 \cdot \frac{g}{2}.$$

2. Der schiefe Wurf. Wird ein Körper unter irgend einem Winkel schräg aufwärts geworfen, so muß seine Bahn ähnlich wie beim wagerechten Wurf eine *gesetzmäßig gekrümmte Linie* bilden.

Wie läßt sich die Wurfbewegung für den schiefen Wurf nach obigem unter Anleitung von Fig. 247 erklären? Vergleiche ferner die Dreiecke miteinander, welche entstehen, wenn man sich die von b , c und d ausgehenden Senkrechten bis zur wagerechten Geraden verlängert denkt. Wie läßt sich hiernach aus der Anfangsgeschwindigkeit des geworfenen Körpers und der durch die Wurfkraft allein in 1 Sek. erreichten Höhe 1) die wirkliche Steighöhe des Körpers, 2) die horizontale Entfernung vom Ausgangspunkte berechnen?



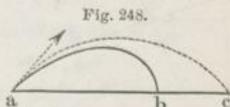
Ein schräg aufwärts geworfener Körper entfernt sich in wagerechter Richtung innerhalb einer bestimmten Zeit so weit von seinem Ausgangspunkte, als ihn die Wurfkraft allein treiben würde; seine Steighöhe (x) über dem Ausgangspunkte ist um den Fallraum dieser Zeit kleiner als die Höhe (h), welche er durch den Wurf allein erreichen würde.

In Zeichen: $y = te$ und $x = th - t^2 \cdot \frac{g}{2}$, wenn e die Strecke bedeutet, um welche der K. sich in 1 Sek. in wagerechter Richtung von seinem Ausgangspunkte entfernt und die übrigen Buchstaben die oben angegebene Bedeutung haben.†)

†) Trigonometrisch: $y = t \cdot a \cdot \cos w$ (1) und $x = t \cdot a \cdot \sin w - t^2 \cdot \frac{g}{2}$ (2), wenn a die Wurfgeschw., w den Elevationswinkel bezeichnet. Wenn der Körper den wagerechten Boden wieder erreicht, so ist $x = \text{Null}$, folglich $t^2 \cdot \frac{g}{2} = t \cdot a \cdot \sin w$ oder $t \cdot \frac{g}{2} = a \cdot \sin w$, also $t = \frac{2 a \sin w}{g}$ (3), demnach $y = \frac{2 a \sin w}{g} \cdot a \cos w = \frac{a^2 \cdot \sin 2 w}{g}$ (da $2 \sin w \cdot \cos w = \sin 2 w$). Dieser Ausdruck hat seinen größten Wert (größte Wurfweite), wenn $\sin 2 w = 1$, also $2 w = 90^\circ$, $w = 45^\circ$ ist — Ist $w < 45^\circ$, so erhält man durch Einsetzen des Winkels und seines Komplement-

Durch Zeichnung wie durch Rechnung läßt sich nachweisen, daß die Wurfweite am größten ist, wenn der Winkel, den die Wurfrihtung mit der wagerechten Richtung bildet (*Erhebungs- oder Elevationswinkel*), 45° beträgt. Jede andere, geringere Entfernung kann durch 2 Neigungswinkel erreicht werden, von denen der eine ebensoviel kleiner, als der andere größer ist als 45° ($45^\circ - n$ und $45^\circ + n$).

Die Bahn, welche ein in wagerechter oder schräger Richtung geworfener Körper zurücklegen würde, wenn die Luft der Bewegung nicht hemmend entgegenwirkte, ist eine *Parabel*. Bei dem wirklichen Wurf in der Luft ist der absteigende Teil der Bahn, namentlich wenn die zurückgelegte Strecke sehr groß ist, mit dem aufsteigenden Teile nicht symmetrisch, sondern stärker gekrümmt (*ballistische Kurve*¹⁾, Fig. 248). Schräg aufsteigende Wasserstrahlen bieten eine gute Veranschaulichung der Wurfbahn. Bei Geschossen übt sowohl deren Form, als auch die Art ihrer Bewegung einen Einfluss auf die Gestalt der Flugbahn aus (Achsendrehung der Spitzkugeln gezogener Geschütze).



Die genaue Kenntnis der Flugbahn der Geschosse ist besonders für die Artillerie sehr wichtig.

Übungsstoff. 1. Die Wurfgeschw. der beiden K., deren Bahnen in Fig. 246 und 247 dargestellt sind, sei 400 m. Wievielmals so lang würde dann ab als ae sein müssen, wenn die Verhältnisse dieser Linien der Wirklichkeit entsprechen sollten? — 2. Welchen Einfluss übt die Größe der Kraft, mit welcher eine Feuerspritze in Thätigkeit gesetzt wird, bei gleicher Richtung des Mundstückes auf Länge und Gestalt des Strahles aus? — 3. Vgl. die Bahn einer wagerechten oder schräg abgeschossenen Kugel mit der Richtung der Achse des Geschützes? — 4. Vgl. beide mit der Richtung der Visierlinie für den Fall, daß bei aufgeschlagenem Visier gezielt wurde? Wo ist das Visier angebracht, u. w.? — 5. Warum wendet man bei Gewehren für verschiedene Entfernungen Visiere von verschiedener Höhe an, und warum sind bei geringen Entfernungen Visiere unnötig? — 6. Können die wirklichen Bahnen zweier Geschosse verschieden ausfallen, wenn die Pulverkraft und die Richtung der Achse des Geschützrohres dieselbe ist? Grund! — 7. Nach wv. Sek. ist eine schräg aufwärts geschossene Kugel 20 m unter die Schußlinie herabgesunken? — 8. Eine Kugel werde mit einer Anfangsgeschw. von 300 m unter 45° aufwärts geschossen. Wv. Meter würde sie dann nach 4 Sek. in wagerechter Richtung sich entfernt haben und wv. m gestiegen sein, wenn die Luft keinen Widerstand leistete?

§ 75. Die Centralbewegung und die Centrakraft (Centripetalkraft).

Bei einem wagerecht oder schräg geworfenen Körper ist der ganze zurückgelegte Weg im Vergleich zu der Entfernung des Anziehungs-Mittelpunktes (Mittelpunkt der Erde), nach welchem hin die Ablenkung erfolgt, sehr klein. Die Linien ba_1, ca_2, da_3 (Fig. 247), welche die Ablenkungsrichtung angeben, können daher als parallel angesehen werden. Liefse sich die Wurfgeschwindigkeit beliebig steigern, so würden bei der zunehmenden Größe des zurückgelegten Weges jene Linien mehr und mehr als Schenkel meßbarer Winkel betrachtet werden

winkels in der Gleichung $y = \frac{a^2 \sin^2 w}{g}$ zwei gleiche Werte, da die doppelten Winkel sich zu zwei $2R$ ergänzen und ihre Sinus also gleich sind. — Da der geworfene Körper in der 1. Hälfte seiner Bahn ebenso steigt, wie er in 2. Hälfte fällt, so ergibt sich die größte Höhe, wenn man nach (3) für t die Hälfte jenes Wertes, nämlich $\frac{a \sin w}{g}$ in (2) einsetzt: $x = \frac{a^2 \sin^2 w}{2g}$.

¹⁾ βάλλειν (bállein), werfen und curvus, krumm.

müssen, deren Scheitelpunkte im Mittelpunkte der Erde lägen. Bei genügender Geschwindigkeit würde dann der geworfene Körper, da die Erde kugelförmig ist, den Erdboden überhaupt nicht wieder erreichen, sondern nach Art eines Himmelskörpers die Erde unaufhörlich umkreisen, vorausgesetzt daß nicht etwa Bewegungshindernisse hemmend auf die Bewegung einwirkten.

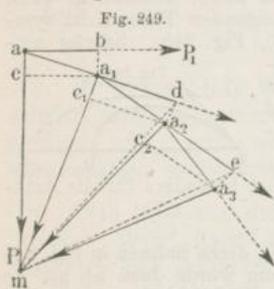
Fig. 249 stelle eine derartige Bewegung, welche man **Centralbewegung**¹⁾ nennt, dar. Einem in a befindlichen Körper sei durch irgend eine Kraft eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit mitgeteilt, so daß er infolge seiner Trägheit in gleichförmiger Bewegung fortzugehen bestrebt ist und im 1. Zeiteilchen den Weg ab zurücklegt. Würde dann der Körper zugleich durch eine stetig wirkende Kraft (P) so stark nach m hingezogen, daß er dieser Kraft allein folgend, im 1. Zeiteilchen von a nach c gelangte, so ist der Ort, an welchem er am Ende des 1. Zeiteilchens in Wirklichkeit ankommen muß, die seinem Ausgangspunkte gegenüberliegende Ecke a_1 des Bewegungsparallelogramms aca_1b .

Der vom Körper während dieses Zeiteilchens zurückgelegte Weg kann, da die anziehende Kraft (P) beständig wirkt, nicht geradlinig sein, er muß aber um so mehr mit der Diagonale aa_1 zusammenfallen, je kleiner man das Zeiteilchen annimmt. Wäre das Zeiteilchen, in welchem der Körper von a nach a_1 gelangt, so klein, daß der Weg als geradlinig angesehen werden könnte, so würde der Körper vermöge der Trägheit seine Bewegung in der Richtung der Diagonale aa_1 fortsetzen und in dem folgenden ebenso großen Zeiteilchen den Weg $a_1d = aa_1$ zurücklegen, wenn er nicht durch die in der Richtung nach m hin wirkende Kraft von der Linie a_1d abgezogen würde. Ist nun a_1c_1 die Strecke, um welche der Körper während dieses Zeiteilchens von seiner Richtung abgelenkt wird, so erhält man den Ort a_2 , an welchem der Körper nach Ablauf des 2. Zeiteilchens ankommt, wiederum durch das Bewegungsparallelogramm und den zurückgelegten Weg durch die Diagonale desselben a_1a_2 . Setzt man diese Betrachtung für die folgenden, immer als gleich großen angenommenen Zeiteilchen weiter fort, so ergibt sich für den vom Körper zurückgelegten Weg die gebrochene Linie $aa_1a_2a_3 \dots$. In Wirklichkeit ist wegen der stetigen Wirkung der ablenkenden Kraft *der Weg des Körpers eine gesetzmäßig gekrümmte Linie*, von der nur die in unendlich kleinen Zeiteilchen zurückgelegten Strecken als geradlinig angesehen werden können.

Durch folgenden Versuch läßt sich veranschaulichen, wie durch Zusammenwirken eines einmaligen Stofses und einer beständig nach einem festen Mittelpunkte hin wirkenden Kraft eine Centralbewegung zu Stande kommt.

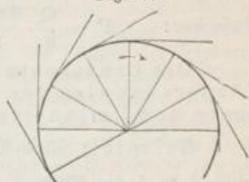
Einer an einem langen Faden schwingenden Pendelkugel erteilt man, wenn sie sich eben an der Stelle ihrer größten Ausweichung be-

¹⁾ centrum, Mittelpunkt.



findet, einen seitlichen Stofs. Die Kugel beschreibt sodann eine krummlinige Bahn um den festen Punkt ihrer Gleichgewichtslage (Aufhängepunkt des Pendels). Die Form der Bahn ist von der Stärke des Stofses abhängig; ein schwacher Stofs bewirkt, dafs das Pendel in einer Ellipse schwingt, bei bestimmter Stärke des Stofses wird die Bewegung kreisförmig. Brennt man den Faden während der Bewegung ab, so fliegt die Pendelkugel in der Richtung der Tangente fort (Fig. 250); sich selbst überlassen, kommt sie allmählich in Folge des Luftwiderstandes und der Reibung am Aufhängepunkt des Fadens zur Ruhe.

Fig. 250.



Wenn ein Körper, welcher das Bestreben hat, sich in bestimmter Richtung gleichförmig zu bewegen, von einem nicht in dieser Richtung liegenden Punkte aus beständig angezogen wird, so entsteht eine krummlinige Bewegung: **Centralbewegung.**

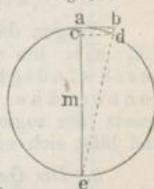
Die Anziehungskraft, welche den bewegten Körper beständig von seiner Bewegungsrichtung ablenkt, heisst **Centralkraft oder Centripetalkraft** ¹⁾ — Jede vom Mittelpunkte einer Centralbewegung nach einem beliebigen Punkte der Bahn gezogene Gerade heisst **Leitstrahl oder Radiusvector** ²⁾

Die Geschwindigkeit, mit welcher der bewegte Körper von irgend einem Punkte seiner Bahn aus seine Bewegung geradlinig fortzusetzen strebt, wird **Tangential-Geschwindigkeit** genannt.

Die Gröfse der Centralkraft (Centripetalkraft) läfst sich unter der Annahme einer gleichförmigen Bewegung in kreisförmiger Bahn durch eine einfache Rechnung nachweisen.

Man stelle sich vor, ein Körper vom Gewichte Q lege von dem Kreiswege Fig. 251, in einem sehr kleinen Zeittheilchen, etwa in 1 Sek., die Strecke ad , in t Sek. den ganzen Kreisweg zurück. Denkt man sich dann diese kurze Strecke geradlinig und in die beiden Seitenwege ac und ab zerlegt, von denen ab eine Tangente und ac einen Teil des Durchmessers bildet, so stellt ac diejenige Strecke dar, um welche der Körper, wenn er der Centripetalkraft (P) allein folgte, sich in 1 Sek. dem Anziehungspunkte m nähern würde. Mit dem freien Falle verglichen, entspricht die letztere Strecke offenbar dem Fallraume der 1. Sek.,

Fig. 251.



den wir mit $\frac{g}{2}$ bezeichnen. Da nun die Gröfsen zweier Kräfte im Verhältnis ihrer Wirkungen zu einander stehen, so ergibt sich die Proportion $P : Q = ac : \frac{g}{2}$, also $P = 2 \cdot \frac{Q}{g} \cdot ac = 2 \cdot \frac{Q}{g} \cdot \frac{(ad)^2}{2r} = \frac{Q}{g} \cdot \frac{(ad)^2}{r}$, denn $ac = \frac{(ad)^2}{2r}$, da $\triangle acd \sim \triangle ade$, also $ac : ad = ad : 2r$. Indem man (nach § 59) den Quotienten $\frac{Q}{g}$ als Ausdruck für die Masse des Körpers ansieht, läfst sich die für die Centripetalkraft aufgestellte Formel ($P = \frac{Q}{g} \cdot \frac{(ad)^2}{r}$) so aussprechen: Die Centripetalkraft steht im geraden Verhältnis zur Masse und zum Quadrat der Geschwindigkeit des bewegten Körpers und im umgekehrten Verhältnis zum Halbmesser der Bahn.

1) petëre, streben. — 2) radius, Strahl und vector, Träger.

Da die Geschwindigkeit aus der Länge der Kreisbahn ($2r\pi$) und der Umlaufzeit (t) berechnet werden muß, so ist es für die Anwendung der Gleichung zweckmäßiger, für a den Wert $\frac{2r\pi}{t}$ einzusetzen. Dies ergibt $P = \frac{Q}{g} \cdot \frac{4r^2 \cdot \pi^2}{t^2 r}$ oder einfacher: $P = \frac{Q}{g} \cdot \frac{4r\pi^2}{t^2}$.

Die Centripetalkraft eines gleichförmig im Kreise bewegten Körpers ist also der Masse und dem Halbmesser direkt, dem Quadrate der Umlaufzeit umgekehrt proportional.

Beispiel: Eine Kugel von 0,5 kg werde an einer 0,8 m langen Schnur geschleudert, jeder Umlauf dauere $\frac{1}{10}$ Sek; dann ist $P = \frac{0,5}{10} \cdot \frac{4 \cdot 0,8 \cdot 3,14^2}{0,5^2} = 6,31$ kg.

Wie groß würde die Centrifugalkraft sein, wenn a. die Kugel das doppelte Gewicht hätte, b. die Schnur doppelt so lang, c. die Umlaufzeit halb so groß wäre?

Die großartigsten Centralbewegungen sind die Bewegungen der Himmelskörper. Von besonderer Wichtigkeit für uns sind die Bewegungen der Planeten um die Sonne als ihren Centralkörper und die Bewegungen der Monde um die Planeten als ihre Centralkörper. Bis zum 16. Jahrhundert war man der Meinung, daß die Erde im Weltraume stillstehe und Sonne und Gestirne sich um sie bewegten. Erst Kopernikus (geb. 1473 in Thorn, gest. 1543) wies nach, daß die Erde und die übrigen Planeten sich um die Sonne bewegen. Während Kopernikus aber die Bahnen der Planeten noch für Kreise hielt, wurde von Kepler die wirkliche Gestalt der Planetenbahnen entdeckt. Auf Grund langjähriger Beobachtungen und mühsamer Berechnungen stellte er (1610) über die Planetenbewegung folgende Gesetze auf:

1. Die Bahnen, in welchen die Planeten sich um die Sonne bewegen, sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht.

Die Gestalt der Planetenbahnen weicht von der Kreisform so wenig ab, daß sie in vielen Fällen als kreisförmig betrachtet werden kann.

2. Die Leitstrahlen der Planeten beschreiben in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume.

Beweis. (Fig. 249). $\triangle a_1 m a_2 = \triangle a_1 m d$, weil beide gleiche Grundlinie ($a_1 a_2 = a_1 d$) und gleiche Höhe haben.

$\triangle a_1 m d = \triangle a_1 m a_3$ aus demselben Grunde ($a_1 m = a_1 m$ und $d a_2 \parallel a_1 m$); folglich

$\triangle a_1 m a_2 = \triangle a_1 m a_3$. Ebenso folgt, daß $\triangle a_1 m a_2 = \triangle a_2 m a_3$ ist u. s. w.

Wegen der Inhaltsgleichheit der Flächenräume müssen die Bahnstrecken $a_1 a_2$, $a_1 a_3$, $a_2 a_3$ um so größer sein, je geringer ihr Abstand von m ist. Die Bahngeschwindigkeit eines Planeten ist daher am größten in der Sonnennähe, am kleinsten in der Sonnenferne. — Das 2. Keplersche Gesetz (der sogen. Flächensatz) hat für jede Art der Centralbewegung Gültigkeit und läßt sich auch umkehren.

3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die Kubikzahlen ihrer mittleren Entfernungen von der Sonne.

Beweis. Nach dem Gravitationsgesetze (§ 56) ist $P : P_1 = \frac{1}{r^2} : \frac{1}{r_1^2}$; ferner ist $P : P_1 = \frac{r}{t^2} : \frac{r_1}{t_1^2}$. Hieraus folgt $\frac{1}{r^2} : \frac{1}{r_1^2} = \frac{r}{t^2} : \frac{r_1}{t_1^2}$ oder, wenn man die Vorderglieder mit $r^2 \cdot t^2$ und die Hinterglieder mit $r_1^2 \cdot t_1^2$ multipliziert, $t^2 : t_1^2 = r^3 : r_1^3$.

Newton gelang es (1682), die Bewegungen der Planeten auf die Wirkung der allgemeinen Massenanziehung oder Gravitation zurückzuführen und damit auch ihre scheinbaren Unregelmäßigkeiten zu erklären.

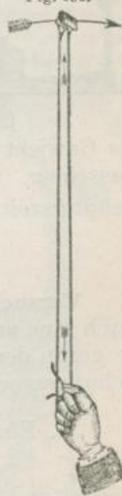
Übungsstoff. 1. Schnell umlaufende Schleifsteine und Wagenräder zeigen sehr häufig Erschn., aus denen hervorgeht, daß die sich bewegenden Teile das Be-

streben haben, in tangentialer Richtung ihre Bewegung fortzusetzen, welche? — 2. In welchem Augenblicke muß man die Schnur einer Schleuder (Fig. 252) loslassen, um das Ziel zu treffen? — 3. Wie ist es zu erreichen, daß ein schwingendes Fadenpendel seine Schwingungsebene verläßt und eine andere Bahn beschreibt? — 4. Wie hat man zu verfahren, wenn die Bahn des Pendels eine Ellipse mit sehr kurzer kleiner Achse werden soll? — 5. Wie ferner, wenn die Länge der letzteren bei wiederholten Versuchen sich mehr und mehr der Länge der großen Achse nähern soll? — 6. Welchen Erfolg hat eine weitere Zunahme der ablenkenden Kr.? — 7. Für welche der beiden hierbei möglichen Bahnformen ist ein bestimmtes Verhältnis zwischen den zusammenwirkenden Kräften erforderlich? — 8. Welche Form wird bei derartigen Versuchen daher am meisten vorkommen? — 9. Anwendung auf die Bahnen der Planeten und anderer Himmelskörper! (Im Weltraume kommen auch nicht geschlossene Bahnen vor.) — 10. Newton prüfte sein aus den Planetenbewegungen abgeleitetes Gravitationsgesetz zuerst an der Bewegung des Mondes, indem er die Anziehungskraft der Erde als die auf den Mond wirkende Centripetalkraft ansah. Nach jenem Gesetze muß der Fallraum der 1. Sek. in der mittleren Entfernung des Mondes (= 60 Erdhalbmesser) den 3600. Teil vom Fallraum der 1. Sek. ($4,9 : 3600 = 0,00136$) betragen, w.? Dieser Fallraum ist in Fig. 249 und 251 durch ac dargestellt, wenn m die Erde, aa_1 (Fig. 249) oder ad (Fig. 251) den in 1 Sek. zurückgelegten Teil der Mondbahn bedeutet. Nach Fig. 251 läßt sich dieselbe Strecke ac auch aus ad und dem Durchmesser ae der nahezu kreisförmigen Mondbahn berechnen, indem man die Proportion anwendet: $ac : ad = ad : ae$, denn sieht man ad als geradlinig an, so bilden adc und ade rechtwinklige Dreiecke. Der mittlere Halbmesser am der Mondbahn = 384 436 000 m. Die in 1 Sek. zurückgelegte Strecke ad läßt sich aus der ganzen Bahnlänge und der Umlaufzeit (= 2360 000 Sek.) berechnen. Führt man die Rechnung aus, so ergibt sich $ac = 0,00136$ m, welche Zahl mit dem vorher angegebenen Fallraum übereinstimmt.

§ 76. Versuche über die Centrifugalkraft (Schwungkraft).

Die einfachste aller Centralbewegungen ist diejenige, bei welcher eine kreisförmige Bahn mit gleichförmiger Geschwindigkeit durchlaufen wird. Ein sehr bekanntes Beispiel einer solchen ist die Bewegung, welche ein Stein ausführt, wenn man ihn in einer Schleuder (Fig. 252) rasch im Kreise schwingt. Hierbei stellt der von der Hand ausgeübte Zug die Centripetalkraft dar. Indem der Stein den Kreisweg zurücklegt, fühlt man in der Hand einen nach außen gerichteten Zug, welcher um so mehr zunimmt, 1) je schneller man schleudert, 2) je größer das Gewicht des Steines ist und 3) je länger bei gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit die Schnur ist. Dünne Fäden zerreißen dabei leicht, elastische Schnüre oder schraubenförmig gewundene Drähte strecken sich. Der Stein übt demnach während seiner Bewegung eine Rückwirkung auf die Hand aus, ähnlich wie etwa eine elastische Feder einen Gegendruck oder Zug gegen die Hand ausübt, welche die Feder spannt (Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, § 59).

Fig. 252.



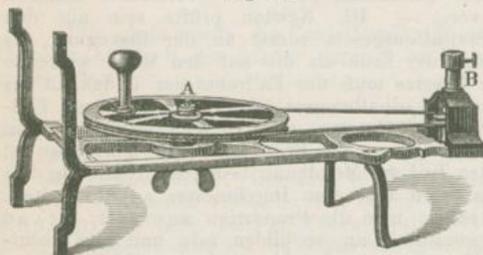
Die Gegenwirkung, welche ein Körper bei einer Kreisbewegung ausübt, wird als Centrifugalkraft¹⁾ oder Schwungkraft bezeichnet. Sie ist der Centripetalkraft an Größe gleich.

¹⁾ fugere, fliehen.

Bem. Die Centrifugalkraft ist nichts anderes, als der Widerstand, welchen das Beharrungsvermögen eines im Kreise bewegten Körpers der Centripetalkraft entgegensetzt; denn indem der Körper gezwungen wird, sich im Kreise zu bewegen, statt in der Richtung der Tangente fortzugehen, wozu ihn die Beharrung antreibt, wirkt er der nach dem Centrum hinziehenden Kraft entgegen. Diese Wirkung ist also lediglich eine Folge des Beharrungsvermögens; die Annahme einer besonderen Kraft, welche den Körper in der Richtung des Radius nach außen treibt, ist nicht zulässig.

Durch Versuche mit dem Centrifugalapparate (der Schwungmaschine) läßt sich die Abhängigkeit der Centrifugalkraft von der Masse,

Fig. 253.

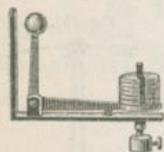


der Bahnweite und der Umlaufzeit eines kreisförmig bewegten Körpers ermitteln und somit das im vorigen Paragraphen entwickelte Gesetz bestätigen. Die Schwungmaschine (Fig. 253) besteht aus einem gusseisernen Gestell, auf welchem eine kleine Triebrolle (B) durch ein Schwungrad (A) in sehr schnelle Umdrehung versetzt werden kann.

1. Einfluss der Umdrehungszeit.

Versuch a. Als Hilfsapparat läßt sich ein sehr leicht drehbarer Winkelhebel (Fig. 254) anwenden, dessen senkrechter Arm in eine Metallkugel und dessen wagerechter Arm in einen Metallring endigt, auf welchen zum Zwecke der Belastung durchbohrte Metallscheiben gelegt werden können. Die

Fig. 254.



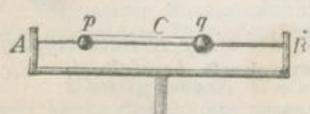
zunächst aufgelegte Metallscheibe habe ein solches Gewicht, daß die Kugel gegen den Rahmen schlägt, wenn man das Schwungrad einmal in einer Sekunde umdreht. Belastet man dann den Ring so stark, daß das Gewicht 4- oder 9mal so groß ist als vorhin, so erfolgt ein Ausschlag, wenn man 2- oder 3mal so schnell dreht, sodaß die Umdrehungszeit also nur noch $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{3}$ Sekunde beträgt.

2. Einfluss der Masse.

Versuch b. Wird die Kugel des aufrechten Hebelarmes (Fig. 254) durch eine andere von 2- oder 3fachem Gewichte ersetzt, so schlägt sie gegen den Rahmen, wenn der wagerechte Hebelarm bei derselben Umdrehungsgeschwindigkeit 2- oder 3mal so stark als vorhin belastet ist.

3. Einfluss der Größe des Umdrehungshalbmessers.

Fig. 255.



Versuch c. Läßt man auf dem Centrifugalapparate einen Rahmen (Fig. 256), welcher auf einem wagerecht ausgespannten Drahte 2 leicht verschiebbare Kugeln enthält, immer schneller umlaufen, so ändern

letztere ihre Lage nicht, wenn ihre Abstände von der Drehungsachse sich umgekehrt verhalten, wie ihre Gewichte, also wenn $p = \frac{1}{2}q, \frac{1}{3}q, \frac{1}{4}q \dots$, und 2-, 3-, 4mal so weit von der Drehungsachse entfernt ist als q .

Bei einer kreisförmigen Centralbewegung wächst die Centrifugalkraft oder Schwungkraft unter sonst gleichen Umständen 1) umgekehrt wie das Quadrat der Umdrehungszeit, 2) ebenso wie die Masse des bewegten Körpers, und 3) wie der Halbmesser der Bahn.

In Zeichen: 1) $P:P_1 = t_1^2:t^2$, 2) $P:P_1 = M:M_1$, 3) $P:P_1 = R:R_1$.

Anwendung der Gesetze der kreisförmigen Centralbewegung.

Abplattung der Erde und Abnahme der Schwerkraft durch die Achsendrehung. Wird ein Kugelgerippe (Fig. 256) oder ein Öltropfen (letzterer in einer Flüssigkeit von gleichem spec. Gewicht schwebend) immer schneller um seine Achse gedreht, so tritt eine immer stärkere Abplattung ein. (Erkl.!) Diese Wirkung der Centrifugalkraft macht es höchst wahrscheinlich, daß auch die einst feurig flüssige Erde durch die Achsendrehung ihre abgeplattete Gestalt erhielt. (Die Abplattung beträgt ungefähr $\frac{1}{289}$ vom Durchmesser des Äquators, letzterer ist 42,64 km länger als die Erdachse.) — Die Achsendrehung der Erde bewirkt ferner eine Abschwächung der Schwerkraft und zwar mittelbar durch die Abplattung nach dem Newtonschen Gravitationsgesetze, unmittelbar durch die Centrifugalkraft, da infolge der Achsendrehung jeder Körper auf der Erdoberfläche ein um so größeres Bestreben hat, sich von der Erde zu entfernen, je größer sein Abstand von der Erdachse ist. Nur an den von der Erde zu entfernen, je größer sein Abstand von der Erdachse ist. Nur an den Polen kann daher die Schwerkraft voll zur Wirkung kommen, während ihre Abschwächung durch die Schwungkraft von den Polen nach dem Äquator hin zunimmt und am Äquator selbst am meisten beträgt. Hier wirkt die Schwungkraft der Schwerkraft gerade entgegen, sodafs letztere um den vollen Betrag der Schwungkraft ($\frac{1}{289}$ der Erdanziehung) geringer ist, als sie sonst sein würde. Drehte sich die Erde 17mal so schnell, also in 1 Stunde 25 Min. einmal um ihre Achse ($17^2 = 289$), so würde die Schwerkraft durch die Schwungkraft vollständig aufgehoben werden. Zwischen Pol und Äquator bilden die Richtungen dieser beiden Kräfte einen Winkel miteinander, von dessen Größe jene abschwächende Wirkung der Schwungkraft abhängig ist.

Im praktischen Leben findet die Schwungkraft vielfache Anwendung. Fig. 257 stellt eine zum schnellen Heben von Wasser dienende **Centrifugalpumpe** dar, welche dadurch wirkt, daß in einem kapselförmigen eisernen Gehäuse ein kleines Schaufelrad (gewöhnlich durch eine Dampfmaschine) in sehr schnelle Umdrehung versetzt wird, sodafs die Luft aus dem seitlich einmündenden Saugrohre entweicht. Letzteres hat zur Folge, daß das Wasser in das Gehäuse eindringt und von den Schaufeln im Steigrohre hinaufgeworfen wird, aus welchem es oben ausfließt. Ähnliche Vorrichtungen dienen zur Erzeugung eines kräftigen Luftstromes (Ventilatoren).

Bei Dampfmaschinen regelt man mittelst des **Centrifugal-Regulators** (Fig. 258, folg. Seite) den Zutritt des Dampfes zum Cylinder. — Bei der Zucker-

Fig. 256.

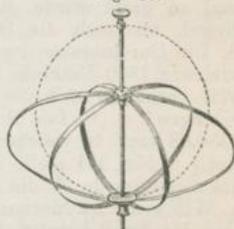
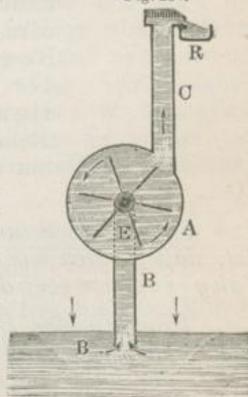
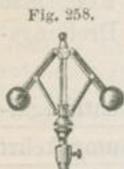


Fig. 257.



fabrikation wird die aus Rüben gewonnene Zuckermasse (Melasse) durch die Schwingkraft von den nicht krystallisierten, flüssigen Bestandteilen in weiten metallenen Trommeln (*Centrifugen*), deren Wand fein durchlöchert ist, gereinigt (1000—1500 Umdrehungen in der Minute). — In ähnlicher Weise dient die Schwingkraft zum Ausschleudern des Honigs aus den Bienenwaben, zur Gewinnung der Butter aus der Milch, des Stärkemehls aus dem Gereibsel der Kartoffeln u. s. w.



Übungsstoff. 1. Ein kugelförmiges, mit W. und Qu. gefülltes Gefäß werde mittelst der Schwungmaschine schnell wie ein Kreisel gedreht. Wie werden sich dann die Flgkn. im Gefäße ordnen? (sogen. Quecksilbergürtel.) — 2. Warum liegen bei Eisenbahnkurven die äußeren Schienen höher als die inneren? — 3. Kunstreiter können sich auf einem galoppierenden Pferde an der nach dem Mittelpunkte der Bahn gerichteten Seite desselben ohne festen Sitz hängend erhalten. Erkl.! — 4. Bei den (in Spielwarenhandlungen käuflichen) sogen. Centrifugalbahnen rollt ein kleiner Wagen auf einer geneigten Bahn herab und durchläuft sodann mit den Rädern nach oben eine kreisförmige Schlinge. Erkläre dies! — 5. Eine Kugel werde an einer a. 40, b. 60, c. 80 cm langen Schnur im Kreise geschleudert. Verhältnis der Schwingkräfte? — 6. Einfluß a. des 2- oder 3fachen Gew. der Kugel, b. einer 2- oder 3mal so großen Geschw.? — 7. Wievielmals so groß würde die Schwingkraft werden, wenn man sowohl das Gew. der Kugel, als auch die Geschw. in der vorhin angegebenen Weise vergrößerte? — 8. Die Durchmesser zweier Centrifugen verhalten sich wie 4:5; während aber die kleinere 1500 Umläufe in 1 Min. macht, führt die größere nur 1200 Umläufe aus. Wie verhalten sich die Schwingkräfte, welche gleiche Massen in den Centrifugen erlangen? — 9. Der Halbmesser des Erdäquators ist 6377,4 km, die halbe Erdachse 6356,08 km. In welchem Verhältnis ist hiernach die Erde abgeplattet? — 10. Der Kreis in Fig. 251 stelle den Äquator der Erde dar, ad die Strecke, welche ein Punkt des Äquators durch die Achsendrehung der Erde in 1 Sek. zurücklegt ($ad = 464$ m). a. Wie groß ist hiernach ac? ($ac : ad = ad : ae$, vgl. Frage 10, § 75). b. Welchen Bruchteil beträgt diese Strecke vom Fallraume der 1. Sek. am Äquator (4,89 m)? Denselben Bruchteil von der Erdschwere muß die Schwingkraft am Äquator tragen; um den gleichen Bruchteil muß demnach auch das Gew. der K. am Äquator geringer erscheinen, als wenn die Erde stillstände.

§ 77. Die Pendelbewegung.

Fig. 259.



Die Pendelbewegung entsteht, wenn ein an einem Faden oder dünnen Drahte (Fig. 259) frei aufgehängter Körper (Bleilot) aus seiner Gleichgewichtslage gebracht und dann sich selbst überlassen wird. Eine aufmerksame Beobachtung lehrt, daß diese Bewegung um so schneller erfolgt, je kürzer der Aufhängefaden ist, und daß die Geschwindigkeit der Bewegung mit der Annäherung an die Gleichgewichtslage zunimmt und mit der Entfernung von derselben wieder abnimmt.

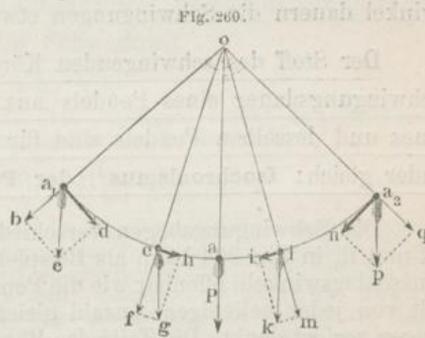
Jeder Körper, welcher in einem nicht mit seinem Schwerpunkte zusammenfallenden Punkte so aufgehängt ist, daß er sich um diesen Punkt frei bewegen kann, wird *Pendel* (physisches Pendel) genannt.

Eine einzelne Bewegung aus der äußersten Lage der einen Seite in die entgegengesetzte (von a_1 nach a_2 oder umgekehrt) heißt *Schwingung*, die dazu erforderliche Zeit *Schwingungsdauer*. — Der Winkel, um welchen das Pendel aus seiner senkrechten Lage sich entfernt, wird als *Ausschlagswinkel* bezeichnet ($\sphericalangle a_1 o a$ und $a o a_2$).

Vom physischen (zusammengesetzten) Pendel unterscheidet man das mathematische (einfache) Pendel. Bei letzterem, welches in Wirklichkeit nicht vorhanden ist und sich nur annähernd durch eine an einem dünnen Faden hängende Metallkugel darstellen läßt, hat man sich den Pendelfaden gewichtslos und das Gewicht des aufgehängten Körpers in einem Punkte vereinigt zu denken.

1. Einfaches (mathematisches) Pendel (Gesetze der Pendelbewegung).

Denkt man sich den Schwingungsbogen eines Pendels ($a_1 a_2$, Fig. 260) aus zahlreichen kleinen geraden Linien zusammengesetzt, so läßt sich die Pendelbewegung als ein abwechselndes Fallen und Steigen eines Körpers auf schiefen Ebenen betrachten, deren Neigungswinkel gleich den Ausschlagswinkeln des Pendels sind, wie sich leicht ergibt, wenn man die durch a_1 gezogene Tangente bis zum Schnitt mit der Verlängerung von oa verlängert und durch diesen Punkt eine Horizontale legt. Zerlegt man nun die auf den pendelnden Körper einwirkende Schwerkraft für



irgend eine schräge Lage des Pendels, z. B. für a_1 , durch das Parallelogramm der Kräfte in zwei Seitenkräfte, von denen die eine ($a_1 b$) mit dem Pendelfaden, die andere ($a_1 d$) mit der betreffenden schiefen Ebene gleich gerichtet ist, so giebt erstere die Spannung des Fadens, letztere die Richtung und Größe der Kraft an, mit welcher der Körper an diesem Punkte in seine Gleichgewichtslage zurückzufallen strebt. Je näher das Pendel seiner Gleichgewichtslage kommt, um so größer ist die Seitenkraft, welche den Faden spannt, um so kleiner dagegen die bewegende Kraft. In der Gleichgewichtslage selbst ist letztere gleich Null. Wie sich nun die bewegenden Kräfte zu einander verhalten, ebenso müssen sich auch die Beschleunigungen verhalten. Bis zur Gleichgewichtslage nimmt daher die Geschwindigkeit stetig, aber um immer weniger zu. Von da ab setzt das Pendel seine Bewegung nur noch zufolge der Trägheit weiter fort. Da die Schwerkraft während des Steigens in demselben Verhältnis hemmend auf die Bewegung einwirkt, wie sie vorher beschleunigend wirkte, so muß die Geschwindigkeit auch ebenso abnehmen, wie sie vorher zunahm.†) Hieraus folgt:

Die Pendelbewegung ist während des Fallens ungleichmäÙig beschleunigt, während des Steigens ungleichmäÙig verzögert.

Da die Beschleunigung der Schwere für alle frei fallenden Körper dieselbe ist, so müssen auch alle Körper, gleichviel aus welchem Stoffe sie bestehen, auf derselben schiefen Ebene ohne Bewegungshindernisse

†) Trigonometrisch: Die Seitenkräfte sind $P \cdot \sin w$ und $P \cdot \cos w$, wenn w den Ausschlagswinkel bezeichnet; die Beschleunigung $= g \cdot \sin w$.

gleichschnell fallen, folglich an gleichlangen Pendeln bei gleichen Ausschlägen auch gleichschnell schwingen. Obwohl nun die bewegenden Kräfte (nach Fig. 260) mit der Größe der Ausschläge zunehmen, so können doch die Schwingungszeiten nicht für alle Ausschlagswinkel einander genau gleich sein. Denn denkt man sich des besseren Vergleiches wegen z. B. die beiden Dreiecke efg und a_1bc so verschoben, daß eg und a_1c von o aus auf oa fallen, und stellt man sich vor, um o sei mit eg ($= a_1c$) ein Kreisbogen geschlagen, so ist ersichtlich, daß das Wachstum der Kraft bei vergrößertem Ausschlagswinkel hinter dem Wachstum des Schwingungsbogens zurückbleibt.†) Bei größeren Ausschlagswinkeln müssen demnach die Pendelausschläge etwas länger dauern als bei kleinen Winkeln. Bestätigung g:

Versuch a. Läßt man mehrere kleine Kugeln, welche aus verschiedenen Stoffen (Metall, Holz, Glas) bestehen, an möglichst dünnen und 1 m langen Fäden nebeneinander schwingen, so dauert jede Schwingung bei kleinen Ausschlägen nahezu 1 Sek. Bei größerem Ausschlagswinkel dauern die Schwingungen etwas länger.

Der Stoff des schwingenden Körpers übt keinen Einfluss auf die Schwingungsdauer eines Pendels aus. — Die Schwingungszeiten eines und desselben Pendels sind für sehr kleine Ausschlagswinkel einander gleich: Isochronismus¹⁾ der Pendelschwingungen.

Die Schwingungsbogen verschiedener Pendel von ungleicher Länge (R und R_1 in Fig. 264 kann als Beispiel dienen) verhalten sich bei gleichen Ausschlagswinkeln offenbar wie die Pendellängen ($ea : db = R : R_1$); dasselbe gilt von jeder beliebigen Anzahl gleicher Teile, in welche man sich die Bogen zerlegt denkt. Die Teile des Bogens ea bilden sodann mit der Horizontalen dieselben Winkel, wie die gleichliegenden Teile des Bogens db , mithin wirken auf diesen einander entsprechenden Teilen auch gleich große beschleunigende Kräfte auf das Pendel ein. Da sich nun die Fallzeiten wie die Quadratwurzeln der Fallräume verhalten (§ 73), so müssen sich auch die Zeiten, in denen einander entsprechende Bogen-
teilchen durchlaufen werden, ebenso verhalten wie die Quadratwurzeln aus den Teilchen selbst oder, nach dem Vorhergehenden, wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen. Durch den Versuch bestätigt man dies, indem man die Schwingungszeiten verschieden langer Pendel vergleicht.

Versuch b. Läßt man mehrere Pendel schwingen, deren Längen sich wie 1 : 4 : 9 u. s. w. verhalten, so verhalten sich ihre Schwingungszeiten wie 1 : 2 : 3 u. s. w.

¹⁾ *ἴσος* (isos), gleich und *χρόνος* (chronos), Zeit.

†) Trigonometrisch: Die beschleunigenden Kräfte wachsen wie die Sinus der Ausschlagswinkel, also langsamer als die Schwingungsbogen; nur bei sehr kleinen Ausschlägen (etwa bei 5°) verhalten sie sich demnach ebenso wie die Schwingungsbogen, also auch wie die Ausschlagswinkel selbst.

Bei Pendeln von verschiedener Länge verhalten sich die Schwingungszeiten (t und t_1) wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen (l und l_1).

In Zeichen: $t : t_1 = \sqrt{l} : \sqrt{l_1}$.

Die Schwingungsdauer eines Pendels von bestimmter Länge nimmt, genauen Beobachtungen zufolge, vom Äquator nach den Polen hin etwas ab. Die Länge des Sekundenpendels, welches in der Sek. eine Schwingung (einen Hingang oder Hergang) ausführt, ist für die Äquatorgegend annähernd 991 mm, unter 45° geogr. Breite 993,5 mm, für Berlin 994,3 mm; sie beträgt an den Polen ungefähr 5 mm mehr als am Äquator. Genaue Beobachtungen der Pendelschwingungen in verschiedener geographischer Breite, auf hohen Bergen und in tiefen Bergwerken haben zu dem Gesetze geführt:

Die Schwingungszeiten eines Pendels, welches an verschiedenen Orten der Erde schwingt, stehen im umgekehrten Verhältnis zur Quadratwurzel aus der Beschleunigung der Schwerkraft.

In Zeichen: $t : t_1 = \sqrt{g_1} : \sqrt{g}$.

Bedeutet n und n_1 die Anzahl der Schwingungen, welche dasselbe Pendel an verschiedenen Orten in gleichen Zeiten ausführt, so ist demnach:

$$n : n_1 = \sqrt{g} : \sqrt{g_1} \text{ oder} \\ g : g_1 = n^2 : n_1^2 \text{ (in Worten?)}$$

Galilei, der durch die Beobachtung der Schwingungen einer herabhängenden Lampe im Dom zu Pisa auf die Untersuchung der Pendelbewegung geführt worden sein soll, hat die Pendelgesetze zuerst ausgesprochen (1602). Huyghens (spr. Heuchens) setzte Galileis Untersuchungen fort, bestimmte die Länge des Sekundenpendels und machte eine sehr wichtige Anwendung vom Pendel zur Regulierung des Ganges der Räderuhren (1657). Auch berechnete er aus den Pendelschwingungen die Schwerkraft der Erde. Dafs ein und dasselbe Pendel nicht an allen Orten der Erde gleichschnell schwingt, wurde zuerst von dem französischen Astronomen Richer (1672) beobachtet, der eine Reise nach Cayenne (5° n. Br.) unternommen hatte, um diese und noch andere wissenschaftliche Fragen zu untersuchen. Er fand, dafs das Pariser Sekundenpendel in Cayenne sich langsamer bewegte und um $1\frac{1}{2}$ Linie verkürzt werden mußte, damit es wieder Sekunden schlage. Damit war ein sicherer Beweis für die Abnahme der Schwerkraft nach dem Äquator hin geliefert. Die wichtigsten Pendelbeobachtungen dieser Art verdankt man Sabine (spr. Säbbin), der von Bahia bis Spitzbergen (13° s. bis 80° n. Br.) genaue Versuche ausgeführt hat.

2. Zusammengesetztes (physisches) Pendel.

Beim wirklichen Pendel stellen genau genommen alle mit dem Aufhängepunkte fest verbundenen Massenteilchen des Pendels mathematische oder einfache Pendel dar, von denen jedes unabhängig vom anderen um so schneller schwingen würde, je näher es dem Aufhängepunkte liegt. Man kann daher jedes physische Pendel als aus zahlreichen einfachen Pendeln bestehend betrachten und aus diesem Grunde als zusammengesetztes Pendel bezeichnen.

Die Schwingungen der dem Aufhängepunkt näher gelegenen Teilchen werden durch die entfernteren verzögert, die Schwingungen der ent-

fernteren dagegen durch die näheren beschleunigt. Demnach muß es in jedem physischen Pendel einen Punkt geben, dessen Schwingungen durch die übrige Masse des Pendels nicht beeinflusst werden, der also wie ein einfaches Pendel schwingt.

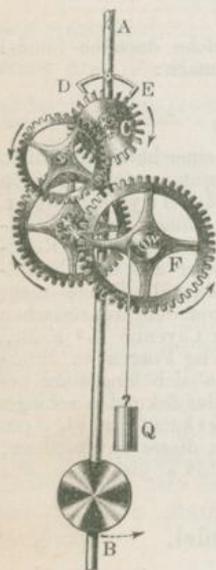
Derjenige Punkt eines zusammengesetzten Pendels, welcher wie ein einfaches (mathematisches) Pendel schwingt, wird Schwingungspunkt des Pendels genannt. Er liegt etwas tiefer als dessen Schwerpunkt.

Man erhält den Schwingungspunkt eines zusammengesetzten Pendels dadurch, daß man die Länge eines ebenso schnell schwingenden einfachen Pendels auf dem zusammengesetzten vom Aufhängepunkte aus abträgt (reducierte Länge des physischen Pendels). Aufhängepunkt und Schwingungspunkt lassen sich bei einem solchen Pendel vertauschen, ohne daß sich die Schwingungszeit ändert: **Umdrehungs- oder Reversionspendel**. Mittelst des Reversionspendels läßt sich die genaue Länge des Sekundenpendels für einen bestimmten Ort praktisch finden, woraus dann die Beschleunigung der Schwere für den Ort berechnet werden kann.†)

Anwendungen des Pendels.

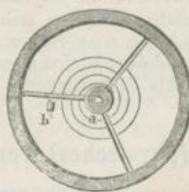
Die allgemeinste und nützlichste Anwendung findet das zusammengesetzte Pendel zur **Regulierung des Ganges der Räderuhren** (Fig. 261). Diese werden dadurch in Bewegung gesetzt, daß ein Gewicht (Q) oder eine Feder am Umfange einer Welle (w) einen Zug ausübt. Damit das Räderwerk dadurch nicht in eine beschleunigte Umdrehung gerät, greifen in die Zahn-lücken des obersten Rades, des sogen. Hemmungs- oder Steigrades (C), die beiden hakenförmigen Enden eines Ankers (DE) ein, welcher sich mit einem Pendel (AB) hin- und herbewegt und bei jedem Hin- und Hergange das Steigrad um einen Zahn vorrücken läßt (Ankerhemmung). Da nun die Pendelschwingungen von gleicher Dauer sind, so erfolgt der Umlauf des Räderwerkes gleichmäßig. Das Pendel regelt somit die Bewegung und bildet also den *Regulator der Uhr*. Um den Einfluß, welchen die Wärme auf die Pendellänge ausübt, für den Gang der Uhr auszugleichen, wendet man Kompensationspendel an (§ 115).

Fig. 261.



Da Pendel nur an größeren feststehenden Uhren angebracht werden können, so hat man für Taschenuhren besondere Regulatoren (Unruhen) erfunden. Diese bestehen aus sehr kleinen Schwungrädern. Die Achse eines solchen Rades ist mit einem cylindrischen oder ankerförmigen Hemmapparate versehen, welcher ähnlich wie bei einer Pendeluhr auf die Bewegung eines Steigrades einwirkt und das Ticken der Uhr hervorruft. Das gesamte Räderwerk wird durch kleine Spiralfedern in Bewegung gesetzt (Fig. 262).

Fig. 262.



†) Für die Schwingungsdauer eines Pendels (einfache Schwingung) gilt bei sehr kleinen Ausschlagswinkeln die Gleichung $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$. Hieraus folgt: $g = \frac{\pi^2 \cdot l}{t^2}$ und wenn man für t die Zahl 1 (1 Sek.) setzt: $g = \pi^2 \cdot l$, wonach sich die Beschleunigung der Schwere für diejenigen Orte der Erde berechnen läßt, für welche die Länge des Sekundenpendels durch den Versuch ermittelt worden ist. Ein hinreichend genaues Resultat erhält man auch, indem man die Schwingungen zählt, welche ein Pendel von gemessener Länge in einer bestimmten Zeit, z. B. in der Minute, ausführt und dann die Formel $g = \frac{\pi^2 \cdot l}{t^2}$ anwendet.

Durch Foucault in Paris (1851) ist die Pendelbewegung zu einem Beweise für die Achsendrehung der Erde benutzt worden. Läßt man nämlich ein sehr langes Pendel mit ziemlich schwerem Pendelkörper etwa in der Richtung des Meridians schwingen, so ist nach einiger Zeit eine auffällige und um so größere Änderung in der Lage der Schwingungsebene zu den Gegenständen der Umgebung erkennbar, je weiter der Beobachtungsort vom Äquator entfernt liegt. Da nun beim Schwingen eines Pendels die Schwingungsebene infolge der Trägheit der schwingenden Masse ihre Richtung nicht ändert, wenn der Aufhängepunkt des Pendels eine Drehung erleidet (Drehung der Scheibe, Fig. 263), so muß jene scheinbare Drehung der Schwingungsebene durch eine wirkliche Drehung der Erde hervorgerufen werden. — Denkt man sich etwa über dem Nordpole der Erde ein Pendel aufgehängt, so würde die geradlinige Verlängerung des ruhenden Pendels mit der Erdachse zusammenfallen. Ein seitlich vom Pendel in der Schwingungsebene stehender Beobachter würde demnach mit der (durch die drehbare Scheibe, Fig. 263, veranschaulichten) Erdoberfläche innerhalb 24 Stunden von W. nach O. einen vollen Kreis beschreiben; dagegen dreht sich scheinbar in derselben Zeit die Schwingungsebene des Pendels von O. nach W. um 360° . Wendete der Beobachter dem Pendel den Rücken zu, so würde die Schwingungsebene für ihn nach rechts abgelenkt erscheinen, am Südpole nach links. Ein am Äquator aufgehängtes Pendel bildet in seiner Ruhelage mit der Erdachse einen rechten Winkel. Die in der Schwingungsebene gelegenen Punkte der Erdoberfläche müssen also ihre Lage gegen diese Ebene unverändert beibehalten. Für alle Orte, welche zwischen Pol und Äquator liegen, kann man sich die Sache so vorstellen, ab ob eine um so geringere Drehung um eine senkrechte Achse erfolgte, je weiter der Ort vom Pole entfernt liegt.

Fig. 263.

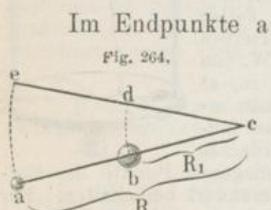


Übungsstoff. 1. Warum kann die Schwingungsweite eines Uhrpendels nicht immer genau dieselbe sein? — 2. Warum werden demnach Uhren, welche sehr genau gehen sollen, so eingerichtet, daß das Pendel möglichst kleine Ausschläge macht? — 3. Wie läßt sich der Gang einer Pendeluhr durch das Pendel a. verlangsamen, b. beschleunigen? — 4. Wird es einen Einfluss auf den Gang einer in unserer Gegend richtig gehenden Pendeluhr ausüben, wenn die Uhr an einem weiter nach N., S., O. oder W. gelegenen Orte aufgehängt wird; inwiefern? — 5. Welchen Einfluss hat die Aufstellung einer Pendeluhr auf einem sehr hohen Berge oder in einem sehr tiefen Schachte auf den Gang derselben? (§ 56.) — 6. Einfluss der Wärme auf den Gang gewöhnlicher Pendeluhren? — 7. Welche auf die Pendelbewegung bezügliche Thatsache ist eine Bestätigung des Gesetzes, daß alle K. gleichschwer sind? — 8. Bei welcher Länge des einfachen Pendels ist die Schwingungsdauer a. $\frac{1}{2}$, b. 2 Sek. (annähernd)? — 9. Verhältnis der Schwingungszeiten zweier Pendel, von denen das eine 2,5, das andere 1,6 m lang ist? — 10. Wie verhalten sich die Pendellängen a. zu den Schwingungszeiten, b. zu den Schwingungszahlen? — 11. Von zwei Pendeln mache das eine 100, das andere 120 Schwingungen in 1 Min. Wie verhalten sich ihre Längen? — 12. Warum muß zum Foucaultschen Pendelversuche ein sehr langes Pendel mit ziemlich schwerem Pendelkörper benutzt werden? (Foucault benutzte ein Pendel von 28 kg Gew., welches an einem Draht von 67 m Länge hing.)

§ 78. Trägheitsmoment. Bei unseren früheren Betrachtungen über die Bewegungen der Körper konnten wir uns in allen denjenigen Fällen, in denen eine bloße Verschiebung der Masse, d. h. eine solche Bewegung stattfand, bei welcher alle Massenteilchen des Körpers mit gleicher Geschwindigkeit parallele Strecken zurücklegen, die ganze Masse des bewegten Körpers in seinem Schwerpunkte vereinigt denken und diesen Punkt als Angriffspunkt der Kräfte ansehen. Die

Lehre von der Pendelbewegung hat nun bereits gezeigt, daß sich dies auf einen Körper, welcher sich um eine feste Achse dreht, aus dem Grunde nicht anwenden läßt, weil die lineare Geschwindigkeit der Teile des Körpers in verschiedenen Abständen von der Drehungsachse verschieden, die Winkelgeschwindigkeit aber für alle Teile gleich ist. Eine andere Bewegung, für welche dasselbe gilt, ist die Drehung von Schwungrädern.

Der Einfachheit wegen soll in folgendem nur die Frage erörtert werden, welche Massen einander bei der Drehung um eine feste Achse in beliebigen Entfernungen von der Achse ersetzen können, ohne daß die Winkelgeschwindigkeit sich dadurch ändert. Die Bestimmung des Punktes, in welchem man sich sämtliche Massenteilchen eines sich drehenden Körpers ohne Änderung der Bewegung vereinigt denken kann, bleibt demnach unberücksichtigt.



Im Endpunkte a (Fig. 264) des gewichtslos gedachten Stabes ac sei eine Masse M angebracht; diese werde durch Drehung des Stabes von a nach e bewegt. Die Kraft wirke dabei in der Drehungsebene rechtwinklig zum Stabe und zwar so auf den Körper, daß dieser dadurch eine bestimmte lineare Geschwindigkeit erlange. Würde dann die Masse M von a nach der Mitte b des Stabes verlegt und der Stab abermals um denselben Winkel gedreht, so brauchte die Kraft, wenn sie zunächst wieder wie vorhin unmittelbar auf den Körper einwirkte, bei gleicher Geschwindigkeit des Stabes nur halb so groß zu sein, denn die lineare Geschwindigkeit, welche der Körper in derselben Zeit erlangt, ist auch nur halb so groß als vorher ($bd = \frac{1}{2}ae$). Ganz dieselbe Wirkung kann von a aus nach dem Hebelgesetze schon durch $\frac{1}{4}$ der Kraft hervorgebracht werden. Denken wir uns nun nicht die Kraft, sondern die Masse veränderlich, so folgt, daß die ganze Kraft von a aus einer 4 mal so großen, in b befindlichen Masse die gleiche Winkelgeschwindigkeit zu erteilen vermag. Wäre $bd = \frac{1}{3}ae$ oder $\frac{1}{4}ae$, so könnte die Masse aus denselben Gründen 9- oder 16 mal so groß sein, ohne daß die Winkelgeschwindigkeit sich änderte. Umgekehrt würde die Masse, wenn sie um die 2-, 3-, 4...fache Länge des Drehungsradius der Kraft von der Drehungsachse entfernt wäre, nur $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{16}$... so groß als im einfachen Abstände sein dürfen, wenn an der Winkelgeschwindigkeit nichts geändert werden sollte. Hieraus folgt:

Die Massen, welche sich bei der Drehung um eine feste Achse ersetzen können, ohne daß ihre Winkelgeschwindigkeit sich ändert, verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate ihrer Abstände vom Drehpunkte.

In Zeichen: $M : M_1 = R_1^2 : R^2$, folglich $MR^2 = M_1R_1^2$; in Worten?

Die Produkte aus den Massen in die Quadrate ihrer Entfernungen vom Drehpunkte werden die **Trägheitsmomente** dieser Massen genannt.

Auf der Veränderung des Trägheitsmomentes eines schwingenden Pendels beruht der Taktmesser (Metronom) zur Messung der Taktgeschwindigkeit von Musikstücken.

Besonders wichtig ist die Kenntnis des Trägheitsmomentes für die Beurteilung der Wirkung von Schwungrädern. Diese sind gewöhnlich so eingerichtet, daß an ziemlich langen und verhältnismäßig leichten Armen ein sehr schwerer Reifen (Schwungring) befestigt ist. Man kann sich daher die Masse eines Schwungrades ohne großen Fehler im Schwungringe vereinigt denken. Je größer somit bei gleichem Gewichte der Radius des Schwungrades ist, desto mehr Kraft ist dazu nötig, dem Schwungrade eine gewisse Geschwindigkeit zu erteilen, desto mehr Kraft ist aber auch erforderlich, diese Geschwindigkeit wieder aufzuheben. Denn wie sich die treibenden Kräfte zu einander verhalten müssen, um gleichen, aber in verschiedenen Entfernungen von der Drehungsachse befindlichen Massen dieselbe Winkelgeschwindigkeit zu erteilen, ebenso müssen sich auch bei unveränderten Angriffspunkten die hemmenden Kräfte zu einander verhalten, wenn die erlangte Geschwindigkeit in derselben Zeit wieder aufgehoben werden soll. Die Fähigkeit der Schwungräder, Bewegungswiderstände zu überwinden, ist demnach bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ungefähr 4-, 9-, 16-... mal so groß, wenn der Radius 2-, 3-, 4-... mal so lang, das Gewicht aber dasselbe ist.

Läuft sich bei der Drehung um eine Achse die Richtung der Achse während der Drehung ändern (z. B. bei einem Kreisel), so giebt sich die Trägheit der bewegten Masse noch in besonderer Weise zu erkennen, indem nämlich eine merkliche Kraft dazu gehört, die Achse während der Drehung aus ihrer Lage zu bringen. Alle Massenteilchen des Körpers haben das Bestreben, in ihrer Drehebene zu bleiben; demgemäß sucht der rotierende Körper seine Drehungsachse unverändert beizubehalten und setzt jeder Kraft, welche die Achse aus ihrer Richtung zu bringen sucht, einen Widerstand entgegen. Ist die Achse des rotierenden Körpers eine sogen. freie Achse, d. h. eine solche, welche in ihrer Lage nicht festgehalten wird, so nimmt sie unter der Einwirkung einer Kraft allmählich eine Richtungsänderung an und beschreibt einen Kegelmantel (z. B. die Achse eines Kreisels oder des Bohnenbergerschen Apparates). Die Gesetze der freien Achsen finden Anwendung auf die Richtungsänderung der Erdachse im Weltraume und dienen zur Erklärung der Präzession (Vorrücken der Nachtgleichenpunkte).

Übungsstoff. 1. Wie muß sich das Trägheitsmoment eines Wagebalkens durch die Belastung der Wage ändern? — 2. Wird demnach vor oder nach der Belastung durch ein Übergewicht leichter ein Ausschlag erfolgen, u. w.? — 3. Inwiefern stimmen Schwungräder hinsichtlich der Verteilung ihrer Masse meist überein, und welchen Vorteil gewährt diese Einrichtung? — 4. Ein Schwungrad von der beschriebenen Einrichtung wiege 2000, ein anderes 4000 kg; beide seien gleichgroß. Wie verhalten sich die Wirkungen derselben bei gleicher Umdrehungsgeschw.? — 5. Wie aber, wenn beide gleiches Gew. hätten und das eine doppelt so groß wäre als das andere? — 6. Die Gewichte zweier Schwungräder mit leichten Armen und schweren Reifen verhalten sich wie 2:3, ihre Halbmesser wie 3:2; wie verhalten sich ihre Wirkungen? — 7. Wie würden sie sich verhalten, wenn ihre Gew. sich wie 3:2 und ihre Halbmesser sich wie 2:3 verhielten? — 8. Inwiefern ist das Vorhandensein eines Schwungrades bei Beginn der Bewegung mit einem Verlust an Nutzarbeit verbunden? — 9. Warum ist dieser Verlust in Wirklichkeit nur ein scheinbarer? — 10. Warum fällt ein sich schnell drehender Kreisel nicht leicht um?

B. Von den flüssigen Körpern.

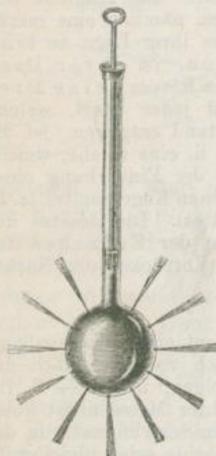
(Siehe §§ 15—17.)

§ 79. Gleichmäßige Fortpflanzung eines äußeren Druckes. Hydraulische Presse. Meißel, Stemmeisen und ähnliche Werkzeuge kann man mit der Hand halten, ohne den auf sie ausgeübten Schlag zu fühlen; dieser pflanzt sich nur in seiner

Richtung fort. Beständen die Handgriffe solcher Werkzeuge aus einem weichen, leicht dehnbaren Stoffe, so würde der Schlag fühlbar sein. Säcke, welche mit Mehl oder Sand gefüllt sind, dehnen sich in die Breite aus, wenn sie von oben einen starken Druck erleiden. Hieraus geht hervor, daß ein äußerer Druck sich nach verschiedenen Richtungen fortpflanzen kann, wenn die Teilchen des gedrückten Körpers leicht verschiebbar sind. Dies muß daher namentlich bei flüssigen und luftförmigen Körpern der Fall sein und zwar bei ersteren ohne merkliche Verkleinerung des von ihnen eingenommenen Raumes, da Flüssigkeiten sich auch durch starken Druck nur sehr wenig zusammenpressen lassen.

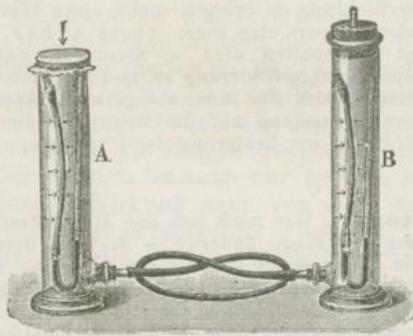
Versuch a. Wird in einem Glasgefäße mit cylindrischem Ansatzrohre (Fig. 265) Wasser dem Drucke eines hineingeschobenen Kolbens ausgesetzt, so spritzt es nach allen Seiten durch die feinen Wandöffnungen. (Druck nach außen.)

Fig. 265.



***Versuch b.** Zwei ganz mit Wasser gefüllte Cylinder seien durch einen ziemlich langen, dickwandigen Gummischlauch zu kommunizierenden Gefäßen miteinander verbunden (Fig. 266) und der eine derselben durch einen Stöpsel, der andere durch eine elastische Haut verschlossen;

Fig. 266.



in jedem stehe ein U förmiges Manometer, auf dessen kurzem Schenkel ein am freien Ende verschlossener, dünnwandiger Gummischlauch befestigt ist. Übt man dann auf die elastische Haut einen Druck aus, so zeigen die beiden Manometer an, daß der Druck sich durch das Wasser nach allen Richtungen fortpflanzt. (Druck nach innen.)

Da die Teilchen der Flüssigkeiten vollkommen leicht verschiebbar sind, d. h. nach allen Richtungen mit gleicher Leichtigkeit ausweichen, wenn der geringste äußere Druck auf sie ausgeübt wird, so muß folgendes Gesetz Gültigkeit haben, dessen Richtigkeit alle Erfahrungen bestätigen:

Eingeschlossene Flüssigkeiten pflanzen einen äußeren Druck nach allen Richtungen gleichmäÙig fort, d. h. jede Fläche, welche so groß ist wie die gedrückte, erleidet einen gleichen Druck.

In Zeichen: $D : D_1 = F : F_1$,

wenn D und D_1 den ausgeübten Druck, F und F_1 die gedrückten Flächen bezeichnen.

Auf dieser gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes beruht die Wirkung der hydraulischen Pressen,¹⁾ d. h. der Vorrichtungen zur Ausübung eines bedeutenden Druckes unter Anwendung einer Flüssigkeit. Eine sehr einfache Vorrichtung dieser Art zeigt Fig. 267. Zwei Hohlzylinder (A und B) von sehr ungleicher Weite, von denen der engere in einen Wasserbehälter hinabreicht, sind miteinander durch eine Röhre verbunden und mit Wasser gefüllt. Jeder Cylinder enthält einen verschiebbaren Kolben. Der engere Cylinder (A) bildet den Stiefel einer Saugdruckpumpe, welche das Wasser durch die Verbindungsröhre in den weiten Cylinder (B) treibt, sodass der Kolben desselben gehoben wird —

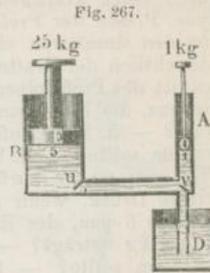
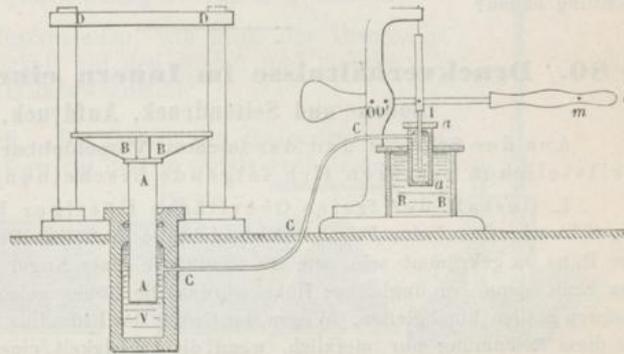


Fig. 265.

Fig. 268 stellt eine zum praktischen Gebrauch (für den Handbetrieb) eingerichtete hydraulische Presse dar. Erkläre die Figur!



Beispiel: Ist in Fig. 268 der Kraftarm des Hebels 6mal so lang als der Lastarm und die Kraft gleich 20 kg, so ist der Druck des Pumpenkolbens $6 \times 20 = 120$ kg. Ist ferner der Durchmesser des Presskolbens 10mal so groß als der des Pumpenkolbens, die gedrückte Fläche also 100mal so groß, so erleiden die zu pressenden Gegenstände einen Druck von $100 \times 120 = 12000$ kg, mithin einen Druck, welcher 600mal so groß ist, als der von der Kraft ausgeübte Druck.

Bei der hydraulischen Presse ist wie bei allen anderen Maschinen mit dem mechanischen Vorteil ein mechanischer Nachteil verbunden; denn wenn z. B. in dem angeführten Falle der Pumpenkolben um 10 cm niedergedrückt ist, so hat sich der Presskolben erst um 1 mm gehoben, die am Hebel wirkende Kraft aber hat in der Richtung des von ihr ausgeübten Druckes schon einen Weg von 60 cm zurückgelegt. Der Weg der Kraft ist also 600mal so groß als der Weg der Last. (Arbeit der Kraft = Arbeit der Last, also keine Ersparnis an Arbeit.)

Hydraulische Pressen finden eine mannigfache Anwendung, z. B. zum Pressen von Baumwolle, Heu u. s. w., zum Krümmen der Schiffspanzer, zum Prüfen der Haltbarkeit von Wasserleitungsröhren, Ankerketten u. dgl., zum Heben sehr bedeutender Lasten in sogen. Hebetürmen (Trajekten). In ähnlicher Weise wird das Probieren der Dampfkessel ausgeführt, indem man den Kessel zunächst ganz mit Wasser füllt und die dazu benutzte Speisepumpe (Druckpumpe, welche mit dem Kessel verbunden ist) solange in Thätigkeit erhält, bis das Manometer den gesetzmäßigen Druck (etwas mehr als der Druck beim Betriebe der Maschine betragen darf) anzeigt, oder das Wasser an dem entsprechend belasteten Sicherheitsventile hervordringt.

¹⁾ ὑδραυλος (hydraulos), Wasserorgel (ein von den Griechen erfundenes musikalisches Instrument).

Übungsstoff. 1. Eine ganz mit Flgk. gefüllte Flasche zerspringt leicht durch einen kräftigen Schlag auf den Kork. Erkl.! — 2. Warum muß bei einer hydr. Presse der Presscylinder weiter sein als der Pumpencylinder? — 3. Welche von den drehbaren einfachen Maschinen kommt bei ihrer praktischen Anwendung hinsichtlich der Kraftersparnis der hydr. Presse wohl am nächsten? — 4. Der Querschnitt des Presskolbens einer hydr. Presse sei 120 mal so groß als der des Pumpenkolbens, die Hebelarme verhalten sich wie 5:1. Welche Druckvergrößerung findet statt? — 5. Wie groß müßte die Kr. sein, wenn ein Druck von 18000 kg ausgeübt werden sollte? — 6. Um wv. müßte der Presskolben sich heben, wenn die Kr. einen Weg von 60 cm zurücklegte? — 7. Wie groß ist der durch die hydr. Presse bewirkte Druck, wenn der Querschnitt des Presskolbens 800 qcm, der des Pumpenkolbens 5 qcm, der Hebelarm der Kr. 90 cm, der Hebelarm der L. 15 cm und die Kr. 24 kg beträgt? — 8. Wie groß müßte die Kr. sein, wenn der Druck 15000 kg betragen sollte? — 9. Wie verhalten sich die Wege zu einander, welche beide Kolben gleichzeitig zurücklegen? — 10. In Fig. 268 deuten O und O₁ zwei Durchbohrungen für die Drehungsachse des Hebels an. Welchen Zweck mag diese Einrichtung haben?

§ 80. Druckverhältnisse im Innern einer Flüssigkeit. Boden- und Seitendruck, Aufdruck.

Aus der Schwere und der leichten Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsteilchen erklären sich folgende Erscheinungen:

1. Gestalt der freien Oberfläche flüssiger Körper. Wenn nur die Schwerkraft auf eine Flüssigkeit einwirkt, so muß ihre Oberfläche im Zustande der Ruhe so gekrümmt sein, wie die Oberfläche einer Kugel mit dem Halbmesser der Erde, denn bei ungleicher Höhe würden die höher gelegenen Teilchen in die tieferen Stellen hinabgleiten. Wegen der Größe des Erdradius (annähernd 6366 km) ist diese Krümmung nur merklich, wenn die Flüssigkeit eine bedeutende Ausdehnung hat (Meeresspiegel); die Oberfläche kleinerer Flüssigkeitsmengen bildet im Ruhezustande eine wagerechte Ebene.

2. Allseitiger Druck im Innern der Flüssigkeit. Im Innern einer Flüssigkeit erleidet jedes Flüssigkeitsteilchen durch das Gewicht der senkrecht über ihm liegenden Teilchen einen Druck, der um so stärker sein muß, je größer die Anzahl der Flüssigkeitsteilchen ist, welche über den gedrückten Teilchen liegen, je tiefer also das Teilchen unter dem Flüssigkeitsspiegel liegt. Diesem Drucke würden die Teilchen bei ihrer leichten Verschiebbarkeit offenbar nach allen Richtungen mit gleicher Leichtigkeit ausweichen, wenn nicht die benachbarten Teilchen oder die Wand des Gefäßes einen gleichen Widerstand leisteten. Der in der Flüssigkeit vorhandene senkrechte Druck nach unten wird demnach durch die leichte Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsteilchen zu einem allseitigen (§ 16) und ein ruhiger Gleichgewichtszustand derselben ist nur dann möglich, wenn der Druck von allen Seiten her der gleiche ist.

3. Stand einer Flüssigkeit in leitend verbundenen Gefäßen. Stellt man sich vor, in der Verbindungsröhre solcher Gefäße (siehe Fig. 47) sei die Flüssigkeit durch eine leicht verschiebbare Querwand geteilt, so kann letztere sich offenbar nur dann in Ruhe befinden, wenn der Druck, welchen sie in jedem Punkte durch die Flüssigkeit erleidet, von beiden Seiten gleich ist. Dies ist nach dem Vorigen (2.) aber nur dann möglich, wenn die Flüssigkeit in beiden Schenkeln des Gefäßes gleichhoch steht, d. h. wenn die Oberflächen in derselben Horizontalebene liegen.

Werden zwei kommunizierende Gefäße mit Flüssigkeiten von verschiedenem spezifischen Gewicht gefüllt, so verhalten sich die Höhen der im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeitssäulen umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte. Die Form und Stellung der Röhre ist ohne Einfluss auf die Höhe der Flüssigkeitssäulen.

Bestätigung durch den Versuch:

Versuch. Verbindet man den einen Schenkel einer Uförmig gebogenen und ungefähr zur Hälfte mit Quecksilber gefüllten Glasröhre (Fig. 269) mittelst eines Gummischlauches nacheinander mit mehreren Glasröhren von verschiedener Form und Weite und füllt jedesmal Schlauch und Röhren bis zu derselben Höhe mit Wasser, so steigt das Quecksilber im anderen Schenkel bei jeder Stellung der Röhren gleichhoch.

Es ist nun festzustellen, wie groß der Druck ist, den eine Flüssigkeit auf den Boden und auf die Seitenwände eines Gefäßes ausübt.

1. Bodendruck. Die Größe des Bodendruckes im Verhältnis zum Gewicht der im Gefäß enthaltenen Wassermasse er-

gibt sich durch folgende Überlegung: In dem Gefäß mit senkrechten Wänden (A, Fig. 270)

heben sich die auf dieselben gerichteten Druckkräfte (in der Figur durch Pfeile angedeutet) auf; es kommt also für den Bodendruck nur die nach unten gerichtete Druckwirkung in Betracht, welche dem Gewicht der Wassermasse entsprechen muß.

Bei dem nach oben erweiterten Gefäß (B) wirkt der Wasserdruck auf die Seitenwände schräg nach unten; dieser Teil des Druckes wird aber durch den Widerstand der Wände aufgehoben, sodafs für die Bodenfläche wiederum nur der Druck der senkrecht über derselben stehenden Wassersäule in Betracht kommt. Bei dem nach oben enger werdenden Gefäß (C) wirkt der Seitendruck schräg nach oben und sucht also das Gefäß zu heben, während die Bodenfläche, da sie ebenso groß ist und das Wasser gleichhoch steht, denselben Druck erleidet, wie in den beiden anderen Gefäßen.

Der Bodendruck ist also in jedem Fall gleich dem Gewicht der senkrecht über dem Boden stehenden Wassersäule; von der Form der Gefäße ist er unabhängig und kann also auch kleiner oder größer sein als das Gewicht des im Gefäße enthaltenen Wassers. Diese Folgerung hat man, weil sie einen Widerspruch zu enthalten scheint, das **hydrostatische Paradoxon**¹⁾ genannt. Ihre Richtigkeit läßt sich indes leicht

1) Hydrostastik, Lehre vom Gleichgewicht der Flüssigkeiten.

Fig. 269.

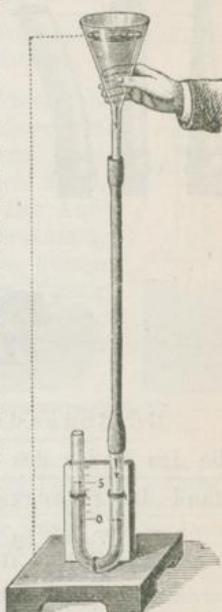
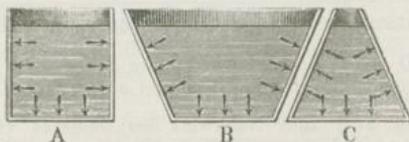
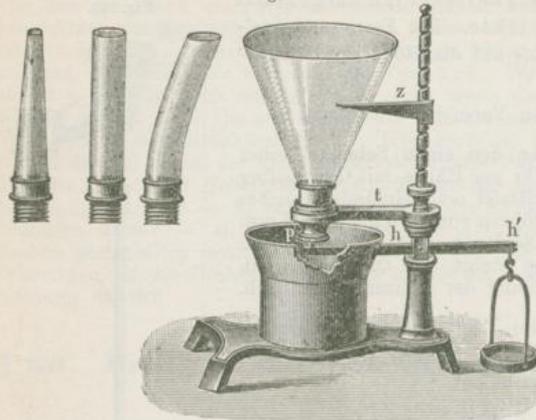


Fig. 270.



nachweisen mittelst einer Wage, deren eine Wagschale als beweglicher Boden verschiedener Gefäße dient, welche man nacheinander auf das Gestell

Fig. 271.



aufschraubt (Pascalscher Apparat, Fig. 271). Bei gleicher Höhe der Wassersäulen bleibt der Bodendruck beim Aufschrauben der verschiedenen Gefäße unverändert derselbe, so daß man also dasselbe Gewicht auf die andere Wagschale legen muß, um dem Druck gegen die bewegliche Bodenplatte das Gleichgewicht zu halten.

Bestätigung durch den Versuch.

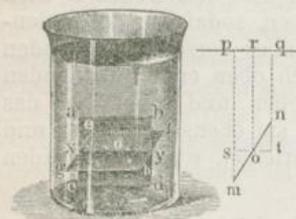
Der Bodendruck ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, die den Boden des Gefäßes zur Grundfläche und den senkrechten Abstand des Flüssigkeitsspiegels vom Boden zur Höhe hat.

Für Wasser ist $D = G \cdot h$; für jede andere Flüssigkeit $D = G \cdot h \cdot s$, wenn D den Druck, G die Grundfläche, h die Höhe und s das spec. Gewicht bezeichnet.

Der Apparat (Fig. 271) zum Nachweis des Gesetzes vom Bodendruck hat seinen Namen nach Pascal, der (um 1653) die Gesetze vom Gleichgewichtszustande der Flüssigkeiten in scharfsinniger Weise begründet hat; das Verdienst, dieselben zuerst aufgefunden zu haben, gebührt dem Holländer Stevin (um 1586).

2. Seitendruck. Zur Bestimmung des Seitendruckes sei eine etwa 5 cm breite quadratische Platte 10 cm tief in eine Flüssigkeit eingetaucht und in verschiedene Lagen gebracht (Fig. 272). Die Platte liege

Fig. 272.



zunächst wagerecht. Wie groß ist dann der Druck, welchen die Flüssigkeit von oben auf sie ausübt? Wird die Platte darauf um eine durch ihren Schwerpunkt (o) gehende wagerechte Gerade (xy) gedreht, so behalten nur diejenigen Punkte ihre ursprüngliche Entfernung vom Flüssigkeitsspiegel, welche in dieser Geraden liegen; für diese Punkte bleibt demnach der Druck unverändert. Alle übrigen Punkte aber kommen entweder in eine höhere oder tiefere Lage.

Da nun hierbei jedem höher gelegenen Punkte ein Punkt entspricht, welcher um ebensoviel tiefer liegt (siehe die Figur rechts), so wird der Druck auf die ganze Fläche durch diese Änderung der Lage weder kleiner noch größer. Ähnliche Betrachtungen lassen sich für jede anders geformte Fläche anstellen, mag diese im Innern der Flüssigkeit liegen, oder mit der Wand des Gefäßes zusammenfallen. Hieraus folgt der allgemeinere Satz:

Der Seitendruck einer Flüssigkeit ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, welche die gedrückte Fläche zur Grundfläche und die Entfernung ihres Schwerpunktes vom Flüssigkeitsspiegel zur Höhe hat.

Von der Größe des Seitendruckes ist die Ausflugschwindigkeit eines Wasserstrahles, sowie der Rückstoß ausfließenden Wassers (§ 16) abhängig.

3. Aufdruck. Der Druck im Innern einer Flüssigkeit muß sich nach dem Gesetze der allseitigen Fortpflanzung desselben auch in der Richtung von unten nach oben äußern. Das Vorhandensein dieses sogen. Aufdruckes läßt sich durch einen Versuch (nach Fig. 273) leicht bestätigen. Der Aufdruck trägt das Gewicht der Platte p und der Wassersäule q , welche von oben in den Cylinder gegossen wird (am besten gefärbtes Wasser). Die Platte p fällt erst ab, wenn das Wasser im Cylinder fast ebenso hoch steht, wie außerhalb desselben; inwiefern ist die Höhe des Wassers im Cylinder vom Gewicht der Platte abhängig?

Fig. 273.



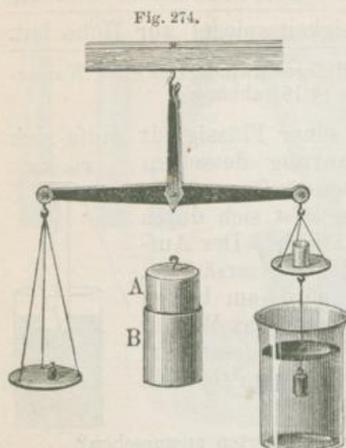
Wie läßt sich das Gesetz über den Aufdruck in Worten aussprechen?

Übungsstoff. 1. Welcher Widerspruch scheint in dem Gesetze über den Bodendruck zu liegen? — 2. Mit W. gefüllte Gefäße von der Form der 3 Gefäße A, B und C (Fig. 270) sollen auf dem Kopfe getragen werden. Hat der Kopf dann den Bodendruck oder das Gew. des W. zu erleiden? — 3. Wie würde sich der Druck auf die Bodenplatte ändern, wenn man das W. in den Pascalschen Vasen (Fig. 271) gefrieren ließe? — 4. Warum darf ein Regenfaß, in dessen Deckel das Rohr einer Dachrinne mündet, oben nicht dicht verschlossen sein? — 5. Wv. würde bei dichtem Verschluss der Druck auf den Boden des Fasses betragen, wenn dieser 80 cm breit wäre und das W. bei einem starken Regen 5 m hoch in der Röhre stände (vom Boden ab)? — 6. Ein nach oben sich erweiterndes Gefäß enthalte 8 Liter W. Wäre es überall gleichweit, so würden bei gleicher Höhe des Wasserstandes 2 Liter weniger darin sein. a. Welches Gew. hat das W.? b. Wie groß ist der Druck des W. auf den Boden des Gefäßes? — 7. Ein anderes, nach oben sich verengendes Gefäß mit gleicher Bodenfläche enthalte bei derselben Wasserhöhe nur 4 Liter W. Wie groß ist in diesem Falle der Bodendruck und das Gew. des W.? — 8. Welchen Druck erleidet 1 qm der Seitenfläche eines Deiches, wenn der Schwerpunkt der Fläche 60 cm unter dem Wasserspiegel liegt? — 9. Wie groß ist der Druck des W. gegen ein Schleusenthor von 6 m Breite und 4 m Höhe, wenn das W. bis zur Mitte desselben steht? — 10. In welcher Weise kann man den Druck, welchen W. in kommun. Röhren (Wasserleitungen) ausübt, als hebende Kraft verwenden? (sogen. hydraulische Aufzüge.)

§ 81. Gewichtsverlust fester Körper in Flüssigkeiten. Die tägliche Erfahrung lehrt, daß ein Körper in Wasser eingetaucht leichter erscheint als außerhalb desselben (Beispiele!) Es bleibt zu untersuchen, wovon die Größe dieses Gewichtsverlustes abhängig ist.

Versuch. Man hänge an das eine Ende eines Wagebalkens an Stelle der einen Wagschale zwei kleine Messingcylinder (A und B, Fig. 274, folg. Seite), von denen der eine hohl, der andere massiv und genau so groß ist, daß er den hohlen Cylinder ausfüllt, oder man hänge die eine Schale kürzer auf und verfähre, wie in der Figur angegeben ist. Darauf werde Gleichgewicht hergestellt. Taucht man dann den unteren

Cylinder ganz in Wasser ein, so wird das Gleichgewicht aufgehoben; es ist jedoch wieder hergestellt, sobald man den hohlen Cylinder vollständig mit Wasser füllt. Versuche mit anderen Flüssigkeiten ergeben dasselbe. Hieraus folgt:



Ein Körper, welcher in eine Flüssigkeit eingetaucht und überall von ihr umgeben ist, verliert (scheinbar) von seinem Gewichte soviel, als die Flüssigkeit wiegt, welche er verdrängt: **Archimedisches Prinzip.**



Erklärung: Da der untergetauchte Körper (Fig. 275) in allen gleich tief unter dem Flüssigkeitsspiegel liegenden Punkten seiner Oberfläche den gleichen

Druck erleidet, so heben sich die Seitendrucke gegenseitig auf. Anders verhält es sich mit den auf beiden Endflächen wirkenden Druckkräften. Da die untere Fläche um die Höhe (s) des Cylinders tiefer liegt als die obere Fläche, so ist der Druck, welchen sie von unten erleidet, auch um das Gewicht der vom Cylinder verdrängten Flüssigkeitssäule größer als der Druck auf die obere Fläche. Dieser Druckunterschied entspricht dem Gewichtsverlust.

An Stelle eines unregelmäßig gestalteten Körpers kann man sich eine gleichgroße Wassermasse denken und zwar im erstarrten Zustande. Da letztere vom umgebenden Wasser schwebend erhalten wird, so muß von dem Gewichte des Körpers ebensoviel getragen werden.

Der Überdruck, welchen ein Körper durch eine ihn umgebende Flüssigkeit von unten über den Druck von oben erleidet, wird Auftrieb genannt. Der Auftrieb ist gleich dem Gewichtsverluste des untergetauchten Körpers.

Übungsstoff. 1. Eine Waage werde durch ein bis an den Rand mit W. gefülltes Gefäß belastet und es sei Glgew. hergestellt. Wie wird sich die Waage verhalten, wenn man einen K. in das W. eintaucht und das überfließende W. entfernt? — 2. Wie aber, wenn das Gefäß nur soviel W. enthält, daß dasselbe beim Eintauchen des K. nicht überfließen kann? — 3. Wv. Kraft ist erforderlich, um a. mittelst einer festen, b. mittelst einer losen Rolle einen im W. untergetauchten Stein im Glgew. zu halten, welcher in der Luft 120 kg wiegt und 50 Liter W. verdrängt? — 4. Wv. wiegt ein K. von 36 cdm außerhalb des W., wenn er im W. bei Anwendung einer losen Rolle durch 25 kg im Glgew. gehalten werden kann? — 5. Die obere Hälfte eines Würfels, dessen Seiten 1 qdm groß sind, liege 20 cm tief unter dem Wasserspiegel. Wie groß ist a. der Druck, welchen jede Seite des Würfels erleidet, wenn dieser senkrecht steht, b. der Auftrieb? — 6. Was würde eintreten, wenn der Würfel im W. losgelassen würde und sein Gew. a. 500 g, b. $1\frac{1}{2}$ kg betrüge? — 7. Mit welcher Kraft würde er im W. untersinken oder aufsteigen, wenn er aus Blei bestände? (§ 17.) — 8. Eine überall verschlossene Tonne von 2,5 cbm Rauminhalt und 150 kg Gew. werde in W. untergetaucht. Mit welcher Kraft wird sie wieder aufsteigen? — 9. Wv. kg könnte die Tonne im W. heben? —

10. Wv. solcher Tonnen müßte man anwenden, um einen Gegenstand, welcher in W. 4000 kg wiegt, zu heben?

§ 82. Das Schweben, Untersinken und Schwimmen in einer Flüssigkeit. Vergleicht man das Gewicht (P) eines Körpers mit dem Gewichtsverluste (Q), welchen derselbe erleidet, wenn er in einer Flüssigkeit untergetaucht ist, so lassen sich 3 Fälle unterscheiden: $P < Q$, $P = Q$ und $P > Q$ (in Worten?).

- 1) Ist $P < Q$, so muß der Körper, wenn er untergetaucht und dann sich selbst überlassen wird, dem Auftriebe folgen und solange in der Flüssigkeit aufsteigen, bis die verdrängte Flüssigkeit seinem Gewichte gleich ist.
- 2) Ist $P = Q$, so wird dem Auftriebe durch den untergetauchten Körper das Gleichgewicht gehalten; der Körper muß also in der Flüssigkeit schweben.
- 3) Ist $P > Q$, so vermag der Körper den Auftrieb zu überwinden; er sinkt also in der Flüssigkeit.

Dies läßt sich in folgender Weise veranschaulichen:

Versuch a. Wirft man ein Stück Wachs oder Stearin in einen mit Weingeist gefüllten Maßcylinder (Fig. 276), so sinkt es darin unter. Mischt man darauf den Weingeist mit soviel Wasser, daß das spec. Gewicht der Flüssigkeit dem des Körpers gleich ist, so schwebt letzterer in der Flüssigkeit; bei Zusatz von noch mehr Wasser steigt der Körper darin auf und schwimmt in der Flüssigkeit.

Fig. 276.



Ein Körper schwimmt in einer Flüssigkeit, wenn sein Gewicht kleiner ist als sein Auftrieb; er schwebt darin, wenn Gewicht und Auftrieb einander gleich sind; er sinkt darin unter, wenn sein Gewicht größer ist als der Auftrieb.

Das Gewicht der von einem schwimmenden Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge ist dem Gewichte des Körpers selbst gleich.

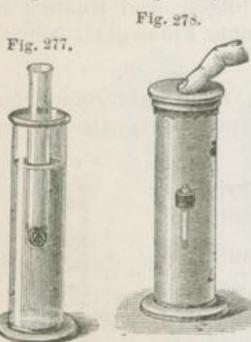
Je nach der Lage, welche der Schwerpunkt eines Körpers gegen den Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit einnimmt, können verschiedene Erscheinungen eintreten:

Versuch b. Ein Stück Wachs oder Stearin (siehe Fig. 276), das an einem Ende durch eine kleine Bleikugel (Bleischrot) belastet ist, lege man in eine Kochsalzlösung, in welcher der Körper schwebt. Ebenso verfähre man mit einem nicht belasteten Stück Wachs oder Stearin unter Anwendung einer Mischung aus Weingeist und Wasser. Giebt man dann den beiden Körpern verschiedene Lagen, so behält der unbelastete Körper jede ihm gegebene neue Lage bei, während der belastete Körper stets seine ursprüngliche Lage wieder einzunehmen strebt.

Erklärung. Da man sich das Gew. eines Körpers in seinem Schwerpunkte vereinigt denken kann, so läßt sich der Schwerpunkt des in einer Flüssigkeit schwebenden oder schwimmenden Körpers als Angriffspunkt des abwärts gerichteten, der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit als Angriffspunkt der aufwärts gerichteten Druckkräfte, also gleichsam als Unter-

stützungspunkt des Körpers ansehen. Schwebt nun der Körper in der Flüssigkeit, so bleibt die gegenseitige Lage der beiden Schwerpunkte offenbar immer dieselbe; schwimmt er aber auf der Flüssigkeit, so können mancherlei Änderungen eintreten. Der erstere Fall ist demnach der einfachere: *Fallen die beiden Schwerpunkte zusammen, so ist der Körper in jeder Lage im Gleichgewichte* (indifferente Gleichgewichtslage); *im anderen Falle stellt der Körper sich so, daß sein Schwerpunkt senkrecht unter dem Schwerpunkte des Auftriebes liegt* (sichere Gleichgewichtslage). Ähnliches gilt auch für schwimmende Körper. Ein Schiff kentert um so schwerer, je tiefer sein Schwerpunkt liegt (Ballast der Schiffe).

Übungsstoff. 1. Taucht man ein etwa durch Bleischrot belastetes Probierröhrchen (Fig. 277) in W., so schwimmt es darin, obgleich Glas und Blei sonst im W. untersinken (Schiffe mit Ballast, eiserne Schiffe).



Erkl.! — 2. In einem mit W. gefüllten und mit Tierblase oder Kautschuk verschlossenen Gefäße (Fig. 278) sinkt ein hohler, unten offener Schwimmer hinab, wenn man auf das W. einen Druck ausübt; läßt der Druck nach, so steigt er wieder. Erkl.! (Die bisweilen auf Jahrmärkten gezeigten kleinen Taucher haben eine menschenähnliche Gestalt. Cartesianische Taucher.) — 3. Wie läßt es sich deuten, daß die Schwimmblase der Fische dicht unter dem Rückgrat liegt, und welche Bedeutung hat dieselbe überhaupt für das Schwimmen? — 4. Erkläre die verschiedenen Arten des künstlichen Schwimmens (Brust- und Rückenschwimmen), die Anwendung von Schwimmgürteln und Korkplatten, das leichtere Schwimmen im Meerwasser u. s. w. — 5. Warum sinken Badende um so tiefer ein, je weiter sie die Arme aus dem W. hervorstrecken, und welchen Erfolg muß es haben, wenn man beim Schwimmen tief einatmet? — 6. Warum können vierfüßige Tiere leichter schwimmen als Menschen? — 7. Welche Regeln müssen beim Schiffsbau und bei der Belastung von Schiffen beachtet werden, damit dieselben stabil schwimmen? — 8. Wie ändert sich der Tiefgang eines Schiffes, wenn es vom Meere in einen Fluß fährt?

§ 83. Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester und flüssiger Körper. Das spec. Gewicht ist das Gewicht der Volumeneinheit eines Körpers (§ 17). Beträgt das absolute Gewicht eines Körpers p (gr) und sein Volumen v (ccm), so besteht demnach die Beziehung: $p = vs$, woraus sich ergibt: $s = \frac{p}{v}$, d. h.: *das spec. Gewicht eines Körpers erhält man, indem man sein absolutes Gewicht durch sein Volumen dividiert.*

Da indes die Bestimmung des Volumen unregelmäßig gestalteter Körper auf einfache Weise nur durch die Wasserverdrängung auszuführen ist, so verwendet man zur Bestimmung des spec. Gew. auch direkt das archimedische Princip. Man faßt das spec. Gewicht dann als eine unbenannte Zahl auf, welche angiebt, wieviel mal so schwer ein Körper ist als ein gleichgroßes Volumen Wasser (§ 17). Das Gewicht eines dem Körper gleichen Volumens Wasser wird durch den Gewichtsverlust ermittelt; bezeichnet man denselben mit q , so entsteht die Gleichung: $s = \frac{p}{q}$, d. h. *man erhält das spec. Gew. eines Körpers, indem man sein absolutes Gewicht durch den Gewichtsverlust, welchen er im Wasser erleidet, dividiert.*

Bei m. Kommt es bei den Bestimmungen des spec. Gewichtes der Körper auf große Genauigkeit an, so muß darauf Rücksicht genommen werden, daß Wasser bei 4° C seine größte Dichtigkeit hat. Ist die Ausdehnung des Körpers beträchtlich, so pflegt man aus dem gefundenen spec. Gewichte das spec. Gewicht für dasjenige Volumen zu berechnen, das er bei 0° einnimmt.

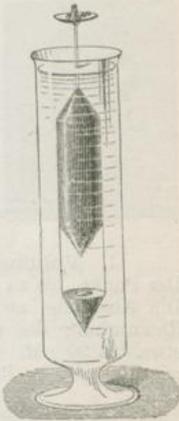
I. Bestimmung des spec. Gewichtes fester Körper. *a. Mittelst der hydrostatischen Wage, d. h. einer Balkenwage, an welcher die eine Wagschale unterhalb mit einem Haken versehen und kürzer aufgehängt ist* (Fig. 274). Die Körper werden, nachdem man vorher ihr absolutes Gewicht bestimmt hat, mittelst eines dünnen Fadens oder Drahtes an dem Haken aufgehängt und darauf ganz im Wasser untergetaucht. Das Gewicht im Wasser, abgezogen vom absoluten Gewicht, ergibt den Gewichtsverlust, mit dem man in das absolute Gewicht zu dividieren hat, um das spec. Gewicht zu erhalten.

Ist der Körper leichter als Wasser, so verbindet man ihn mit einem anderen, schwereren Körper, dessen Gewichtsverlust man kennt, und zieht letzteren Gewichtsverlust von dem Gewichtsverluste beider Körper ab (Beisp.: Kork und Blei). Wenn der Körper im Wasser löslich ist, so bestimmt man seinen Gewichtsverlust in einer Flüssigkeit, in der er sich nicht auflöst, und deren spec. Gewicht bekannt ist (Beisp.: Kochsalz und Öl). Man ermittelt dann zunächst, wievielmals so groß sein absolutes Gewicht ist als der Gewichtsverlust, welchen er in jener Flüssigkeit erleidet, und multipliziert die erhaltene Zahl mit dem spec. Gewichte der Flüssigkeit.

b. Mittelst des Gewichts-Äröometers. Das **Nicholsonsche Gewichtsäröometer**¹⁾ (Fig. 279) besteht aus einem hohlen Schwimmer von Blech, welcher oben auf einem senkrechten Drahte eine kleine Schale zur Aufnahme von Gewichtstücken und unten ebenfalls eine Schale oder ein siebartiges Körbchen trägt. Die obere Schale wird zunächst so stark belastet, daß der Apparat bis zu einer am Drahte angebrachten Marke einsinkt. Legt man dann den Körper, dessen spec. Gewicht bestimmt werden soll, auf die obere Schale und nimmt soviel Gewicht weg, daß die Marke den Wasserspiegel wieder berührt, so erhält man das *absolute Gewicht* des Körpers. Wird der Körper hiernach auf die untere Schale gelegt und oben wieder soviel Gewicht hinzugefügt, daß der Apparat abermals bis zur Marke einsinkt, so erhält man den *Gewichtsverlust* durch Vergleichung der in beiden Fällen aufgelegten Gewichte.

II. Bestimmung des spec. Gewichtes flüssiger Körper. *a. Mittelst des sogen. Hundertgrammfläschchens (Pyknometer).* Dasselbe ist ein Fläschchen von bekanntem Gewicht, welches bis zu einer bestimmten Marke genau 100 g Wasser faßt. Man füllt es mit der zu bestimmenden Flüssigkeit bis zur Marke und ermittelt durch Abwägen und Subtrahieren

Fig. 279.

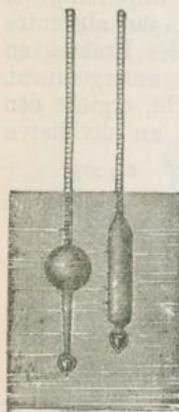


¹⁾ ἀραιός (araiós), dünn.

des Gewichts der Flasche das absolute Gewicht der Flüssigkeit. Die Division der erhaltenen Zahl durch 100 ergibt das spec. Gewicht.

b. Mittelst der hydrostatischen Wage, indem man den Gewichtsverlust eines unter die kürzere Wagschale gehängten Senkgläschens im Wasser und in der zu untersuchenden Flüssigkeit bestimmt und letzteren durch ersteren dividiert.

Fig. 280.



c. Mittelst des Gewichtsaräometers. Man bestimmt dessen Gewicht und addiert dazu nacheinander die Zulagegewichte, welche das Aräometer erst in Wasser und dann in der anderen Flüssigkeit bis zur Marke einsinken machen. Durch diese Zahlen erhält man die Gewichte der vom Aräometer verdrängten Wasser- und Flüssigkeitsmenge, deren Quotient das spec. Gewicht ergibt.

d. Mittelst der Skalenaräometer. Diese Aräometer (*Senkwagen*) sind Glasröhren, deren unterer Teil cylindrisch, birnförmig oder kugelig erweitert ist (Fig. 280). Im Innern der Röhre (Spindel) ist in der Regel eine auf Papier gezeichnete Skala angebracht. Das untere, äußerste Ende der Röhre ist etwas aufgeblasen und mit Quecksilber oder Bleischrot gefüllt, damit das Instrument in der Flüssigkeit senkrecht schwimmt. Nach der Beschaffenheit der Skala unterscheidet man dreierlei Aräometer:

1. Volumeter, d. h. *Senkwagen*, deren Skala gleiche Raunteile anzeigt. Der Punkt, bis zu welchem das Instrument im Wasser einsinkt, ist mit 100 bezeichnet. Die Abstände zwischen den einzelnen Teilstrichen geben Hundertteile von dem Rauminhalte des verdrängten Wassers an. Sinkt das Volumeter in einer Flüssigkeit etwa bis 90 ein, so weiß man, daß 90 Raunteile dieser Flüssigkeit soviel wiegen, wie 100 gleiche Raunteile Wasser.

2. Densimeter, d. h. *Senkwagen*, deren Skala das spec. Gewicht einer Flüssigkeit unmittelbar anzeigt, sodafs eine Rechnung nicht nötig ist. Für Flüssigkeiten, welche leichter sind als Wasser, ist die Skala über dem Punkte angebracht, bis zu welchem das Instrument im Wasser einsinkt, für Flüssigkeiten von höherem spec. Gewichte dagegen unter demselben; warum?

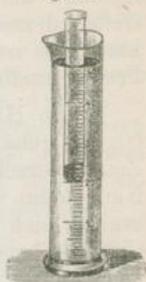
3. Prozentaräometer sind solche *Senkwagen*, welche das *Mischungsverhältnis zweier Flüssigkeiten in Prozenten* unmittelbar angeben. Da der Kaufwert gemischter Flüssigkeiten von ihrem Mischungsverhältnis abhängt, so werden im praktischen Leben diese Instrumente von allen Aräometern am meisten gebraucht. Ein Prozentaräometer, das zur Bestimmung von Alkohol dient, welcher mit Wasser gemischt ist, heißt *Alkoholometer*. Ist ein Prozentaräometer zur Bestimmung des Prozentgehaltes von Zuckerlösungen eingerichtet, so wird es *Saccharometer* genannt (*Bierwage* für Bierwürze, *Weinwage* für Most); *Salzspindeln* geben den Prozentgehalt von Kochsalzlösungen an, *Essigspindeln* den von Essig, *Milchwagen* dienen zur Untersuchung der Milch u. s. w.

Da das spec. Gewicht aller Körper bei der Erwärmung kleiner und bei der Abkühlung größer wird, so sind die Skalen sämtlicher Aräometer auf eine bestimmte Temperatur (gewöhnlich 15° C) bezogen, welche an jedem Instrumente angegeben ist.

Übungsstoff. 1. Wie läßt sich mit einem Maßcylinder annähernd bestimmen, wv. Gew. ein Stein im W. verliert? — 2. Der Stein wiege in der Luft 42 g und verdränge 15 ccm W. Wie groß ist sein spec. Gew.? — 3. Eine Bleikugel

wog in der Luft 34 g, im W. 31 g. Wv. wiegt das verdrängte W., und welches ist hiernach das spec. Gew. des Bleies? — 4. Ein Kork wog in der Luft 1,6 g; mit Blei verbunden ergab sich im W. ein Gewichtsverlust von 9 g, während das Blei allein nur 1 g verlor. a. Wv. W. hatte der Kork verdrängt? b. Spec. Gew. des Korkes? — 5. Ein Stück Steinsalz habe ein absolutes Gew. von 11 g; in Petroleum getaucht sei es um 4 g leichter. Wievielmals so schwer ist Steinsalz a. als Petroleum, b. als W., wenn das spec. Gew. des Petroleums 0,8 ist, c. wie groß würde der Gewichtsverlust im W. sein? (Berechne auch hiernach das spec. Gew. des Steinsalzes.) — 6. Ein Gefäß wog leer 110 g, mit W. gefüllt 235 g, mit Qu. gefüllt 1,81 g. a. Wv. Qu. war im Gefäße? b. Berechne das spec. Gew. des Qu. — 7. Ein mit Schrotkörnern belastetes Probiertgläschen (Fig. 281) sei einmal in einen mit W., ein andermal in einen mit Spiritus gefüllten Malscylinder eingesenkt; das W. sei dabei um 10, der Spiritus um 12 cm gestiegen. a. Vgl. die Gewichte der verdrängten Flgkn. miteinander. b. Berechne daraus das spec. Gew. des Spiritus. — 8. Das Gläschen verdränge in W. 12, in Salzsäure 10 ccm. Spec. Gew.?

Fig. 281.



C. Von den luftförmigen Körpern.

(Siehe §§ 18—21.)

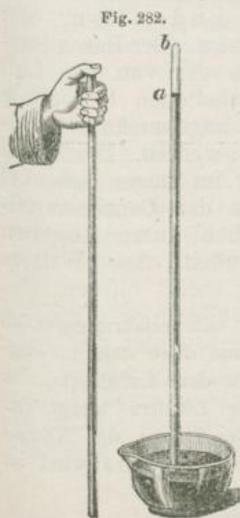
§ 84. Größe des Luftdruckes. Barometer.

a. Die luftförmigen Körper besitzen in noch höherem Maße als Flüssigkeiten die Eigenschaft, daß ihre Teilchen vollkommen leicht verschiebbar sind. Der von ihnen infolge der Schwere ausgeübte Druck muß daher wie bei den Flüssigkeiten mit der Größe der gedrückten Fläche im gleichen Verhältnis stehen und läßt sich demnach am einfachsten nach dem Drucke auf die Flächeneinheit (z. B. 1 qcm) berechnen.

Bei der Fortpflanzung eines äußeren Druckes verhalten sich luftförmige Körper wesentlich anders als Flüssigkeiten, indem sie ihren Rauminhalt dabei in weit höherem Grade ändern. Hört der äußere Druck auf, so nehmen sie infolge ihrer Ausdehnbarkeit stets den ursprünglichen Raum wieder ein. Letztere Eigenschaft macht es auch erklärlich, daß geringe Mengen eines eingeschlossenen luftförmigen Körpers auf die Wand des Gefäßes einen über die Wirkung der Schwere weit hinausgehenden Druck ausüben vermögen.

Wie groß der von der freien Luft ausgeübte Druck ist, läßt sich in folgender Weise ermitteln:

*Versuch. Wird eine 80—90 cm lange und etwa 4 mm weite Glasröhre, nachdem man sie ganz mit Qu. gefüllt und alle Luft daraus entfernt hat, mit dem Finger verschlossen und umgekehrt in ein mit Qu. gefülltes Gefäß (Fig. 282) eingetaucht, so bleibt nach dem Wegheben des Fingers das Qu. 70—80 cm hoch in der Röhre stehen. Der Raum (ab) über dem Qu. in der Röhre ist



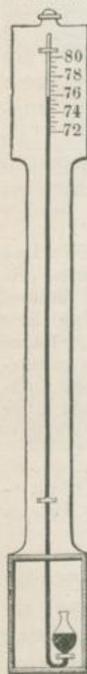
luftleer. Auch bei schräger Stellung der Röhre bleibt der senkrechte Abstand der Quecksilberkuppe in der Röhre vom Quecksilberspiegel im Gefäß derselbe. — Da die Zimmerluft mit der freien Luft zusammenhängt, so ist es gleichgiltig, ob man den Versuch im Zimmer oder im Freien ausführt.

Die Höhe der Quecksilbersäule, welche von der Luft im Glgew. gehalten wird, ist an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten verschieden; am Meeresspiegel beträgt sie im Durchschnitt 76 cm. Nach dem Gesetze über den Bodendruck der Flüssigkeiten (§ 80) ergibt sich hieraus für den Druck der Luft auf 1 qcm annähernd 1 kg ($76 \cdot 13,6 \text{ g} = 1,033 \text{ g}$; warum?).

Der Druck der Atmosphäre ist am Meeresspiegel im Mittel gleich dem Drucke einer 76 cm hohen Quecksilbersäule (1 Atmosphäre = 1 kg auf 1 qcm.)

Nach Toricelli, der zum ersten Mal den Luftdruck durch eine Quecksilbersäule gemessen hat, nennt man den beschriebenen Versuch Toricellischen Versuch, und den über dem Qu. befindlichen luftleeren Raum Toricellische Leere.

Fig. 283.



b. Um den Luftdruck bequem und genau messen zu können, werden besondere Instrumente, **Barometer**,¹⁾ angewandt. Diese bestehen entweder aus einer gegen 90 cm langen, mit Quecksilber gefüllten Glasröhre (Quecksilberbarometer) oder aus einem luftleeren Metallgefäße (Aneroidbarometer).

a. Quecksilberbarometer.

1. Gefäßbarometer. Die einfachste Einrichtung eines Barometers zeigt das in Fig. 283 dargestellte *Gefäßbarometer*. Die Glasröhre desselben ist unten U förmig umgebogen, der kurze Schenkel gefäßförmig erweitert und offen, der lange Schenkel hingegen geschlossen. Der Barometerstand, d. h. die Höhe der von der Luft im Gleichgewichte gehaltenen Qu.-Säule kann auf einer oben angebrachten Centimetertheilung abgelesen werden. Der Raum über dem Quecksilber im langen Schenkel ist luftleer. Neben der Centimetertheilung stehen gewöhnlich kurze Angaben über die Beschaffenheit des Wetters (Fig. 284).

Fig. 284.



Südwind warmes Wetter, der Westwind meist Regen oder Schnee, der Nordwest- und Nordwind rauhes, kaltes Wetter, der Nordost- und Ostwind im

¹⁾ βαρυσ (barys), schwer.

Sommer trockene Wärme und im Winter trockenen Frost. In diesen Ländern ist der Barometerstand im allgemeinen bei SW.-Wind am niedrigsten, bei NO.-Wind am höchsten, weil ersterer in der Regel feuchte und warme, letzterer dagegen trockene und kalte Luft bringt (feuchte Luft ist leichter als trockene, weil sie viel Wasserdampf enthält, welcher leichter als Luft ist). Da ein Wechsel der Luftströmung zuerst in den oberen Luftschichten eintritt, so kündigt das Steigen des Barometers gewöhnlich eine Drehung des Windes über N. nach der östlichen Richtung, das Fallen eine Drehung über Süden nach der westlichen Richtung an: Doves Winddrehungsgesetz. Barometerstand und Windrichtung bieten demnach wichtige Anhaltspunkte, nach denen das zu erwartende Wetter zu beurteilen ist.*)

Otto von Guericke, der ein Wasserbarometer erfand und dasselbe an seinem Hause in Magdeburg anbrachte, erkannte auch zuerst den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Wetter; es erregte die Bewunderung seiner Zeitgenossen, als er (1660) auf Grund seiner Barometerbeobachtungen den Ausbruch eines gewaltigen Sturmes einige Tage vorhersagte.

Gefäßbarometer geben den Barometerstand ungenau an, da bei ihnen die Änderungen, welche der Stand des Quecksilbers im Gefäße erleidet, unberücksichtigt bleiben, und die Kapillarwirkungen (§ 54) wegen der ungleichen Weite der Schenkel sich nicht ausgleichen. Die hierdurch entstehenden Fehler sind jedoch so gering, daß sie, wenn es sich nicht um wissenschaftliche Beobachtungen handelt, vernachlässigt werden können.

Bei dem zu genauen Messungen dienenden Kapselbarometer von Fortin (Fig. 285) ist die Röhre gerade und in eine mit Quecksilber gefüllte Kapsel eingetaucht, deren Boden aus Leder besteht und mittelst einer Schraube ein wenig gehoben und gesenkt werden kann. Dadurch kann die untere Qu.-Oberfläche zu jeder Ablesung so eingestellt werden, daß sie die Spitze eines kleinen feststehenden Elfenbein- oder Stahlkegels berührt und also immer dieselbe Höhe hat.

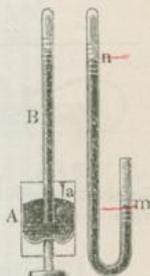
Wegen der durch die Kapillarität bewirkten Verkürzung der Quecksilber-Säule bedarf jede Ablesung noch einer Berichtigung. Zum genauen Ablesen muß bei allen Barometern das Auge mit dem Gipfel der gewölbten Quecksilberkuppe in gleicher Höhe gehalten werden.

2. Heberbarometer. Sie bestehen aus einer Uförmig gebogenen Röhre (Fig. 286), deren ungleichlange Schenkel, wenigstens soweit sich die Veränderungen im Qu.-Stand erstrecken, gleichen inneren Durchmesser haben. Der Stand des Qu. wird entweder an beiden Schenkeln auf einer feststehenden Skala oder nur am langen Schenkel abgelesen. In letzterem Falle kann die Skala längs der Röhre oder umgekehrt die Röhre längs der Skala mittelst einer unten angebrachten Schraube so verschoben werden, daß jedesmal der Nullpunkt der Teilung mit dem unteren Qu.-Spiegel gleichhoch steht.

Da die Kapillarwirkungen wegen der gleichen Weite der Schenkel außer acht gelassen werden können, so sind die Heberbarometer als die vollkommensten Barometer zu bezeichnen. Ihre Ablesungen bedürfen nur noch einer Berichtigung wegen des Einflusses der Temperatur.

*) Vgl. II. Lehrstufe, § 129 u. ff. über das Winddrehungsgesetz von Buys-Ballot, welches allgemeinere Giltigkeit hat als das Gesetz von Dove.

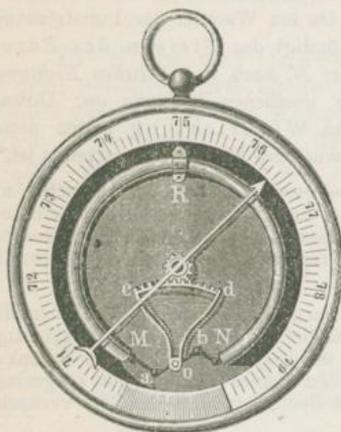
Fig. 285. Fig. 286.



b. Aneroidbarometer.

Das luftleer gemachte Gefäß, aus welchem dieselben bestehen, ist ent-

Fig. 287.

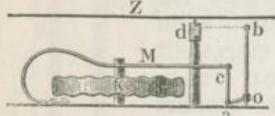


weder eine dünnwandige, kreisförmig gebogene Metallröhre (MRN, Fig. 287), welche etwa in ihrer Mitte (R) auf der Rückwand eines metallenen Gehäuses befestigt ist und bei zunehmendem Luftdrucke sich stärker krümmt, oder eine Dose (K, Fig. 288) mit dünnem wellenförmigen Deckel, der sich etwas nach innen biegt, wenn der Luftdruck zunimmt. Bei Abnahme des Luftdruckes führen Röhre wie Deckel vermöge ihrer Elasticität die entgegengesetzte Bewegung aus. Damit diese äußerst geringen Bewegungen deutlich wahrgenommen werden können, werden sie durch ein leichtes Hebelwerk vergrößert und auf einen Zeiger übertragen, der auf einer Kreisteilung die Stärke des Luftdruckes angiebt. Gewöhnlich sind dieser Teilung,

wie beim Gefäßbarometer, auch Angaben über das Wetter beigelegt.

In welcher Weise überträgt sich die Bewegung der Metallröhre (Fig. 287) auf

Fig. 288.



den Zeiger? — Fig. 288 stellt die Teile eines Metallbarometers mit luftleerer Dose von der Seite gesehen dar. M ist ein mit dem Deckel der Dose K fest verbundener, elastischer Bügel, welcher den Winkelhebel aob mittelst des Verbindungsstabes ac um o dreht; b ist durch eine feine Kette mit dem drehbaren Cylinder d verbunden, der bei seiner Bewegung den Zeiger Z mitnimmt.

Bem. Aneroidbarometer sind für geringe Schwankungen des Luftdruckes äußerst empfindlich; wegen der etwaigen Änderung der Elasticität des Metalles ist aber von Zeit zu Zeit ein Vergleich mit einem guten Quecksilberbarometer erforderlich.

Übungsstoff. 1. Welchen Luftdruck hat der menschliche K. auszuhalten, wenn dessen Oberfläche etwa $1\frac{1}{2}$ qm beträgt, und wie ist es zu erklären, daß wir von der Wirkung dieses Druckes nichts empfinden (trotzdem derselbe z. B. das Gew. der Gliedmaßen bei Bewegung derselben aufhebt)? — 2. Wie lang müßte die Röhre sein, wenn man zum Toricellischen Versuche W. statt Qu. benutzen wollte (Guerickses Wasserbarometer)? — 3. Wenn man ein Qu.-Barometer vorsichtig umkehrt, so soll das Qu. mit hellem Klange gegen das Ende der Röhre schlagen. Wie läßt sich hiernach die Güte des Barometers beurteilen? — 4. Die Röhre eines guten Qu.-Barometers soll wegen der Kapillarwirkungen mindestens 5 mm weit sein. Welcher Art sind die Kapillarwirkungen, und welche Ungenauigkeit müssen sie beim Gefäßbarometer zur Folge haben? — 5. Wodurch wird beim Toricellischen Kapselbarometer der andere Mangel des Gefäßbarometers beseitigt? — 6. Warum sind Heberbarometer frei von diesen Mängeln? — 7. Um vv. ist das Qu. im kurzen Schenkel eines Heberbarometers gefallen, wenn es im langen Schenkel 5 mm gestiegen ist? — 8. Um vv. hat in diesem Falle der Barometerstand sich geändert? — 9. Um vv. ist das Qu. im Gefäße eines Stubenbarometers gefallen, wenn es in der Röhre um 5 mm gestiegen ist und der Durchmesser des unteren Qu.-Spiegels das 10fache von der Weite der Röhre beträgt? — 10. Um vv. würde es gefallen sein, wenn das

¹⁾ ἀνήγός (a-nerós), nicht feucht.

Gefäß a. 5-, b. 15-, c. 20mal so weit wäre als die Röhre? — 11. Wv. betrüge in diesen Fällen die wirkliche Änderung des Barometerstandes? — 12. Wv. ferner, wenn das Qu. um 5 mm gefallen wäre? — 13. Infolge der Kapillarität beträgt die Verkürzung einer Qu.-Säule in einer Glasröhre von 2 mm Weite etwa 4,6 mm, bei 5 mm Weite nur 1,5 mm. Wie groß würde demnach der wirkliche Luftdruck sein, wenn man an einem Gefäßbarometer einen Druck von 76 cm abgelesen hätte und die Röhre a. 2 mm, b. 5 mm weit wäre? — 14. Der Deckel der Dose eines Aneroidbarometers sei 40 gcm groß. Um wv. Gramm wird der Druck auf den Deckel größer oder kleiner, wenn der Barometerstand a. 1 cm zu-, b. 1 cm abnimmt?

§ 85. Beziehung zwischen Druck und Volumen eingeschlossener Luft (Mariottesches Gesetz). Manometer.

1. Nachweis für verdichtete Luft. *Versuch a. Gießt man in

eine Uförmig gebogene Glasröhre, deren kurzer Schenkel geschlossen ist (Fig. 289), zunächst nur soviel Qu., daß dieses in beiden Schenkeln gleichhoch steht, so erleiden beide Qu.-Oberflächen einen Druck von 1 Atmosphäre. Wird darauf noch soviel Qu. nachgegossen, daß es im langen Schenkel um den Barometerstand höher steht als im kurzen Schenkel, so ist

- 1) der Raum der abgesperrten Luft nur noch halb so groß,
- 2) der Druck, welchen sie erleidet, dagegen doppelt so groß als vorhin.

Da Druck und Gegendruck gleich sein müssen, so muß nach der Verdoppelung des äußeren Druckes auch die Spannung der eingeschlossenen Luft das Doppelte der ursprünglichen Spannung betragen. Beträge der äußere Druck das 3-, 4-, 5-...fache, so würde der Raum der eingeschlossenen Luft nur $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$... so groß, die Spannung derselben dagegen 3-, 4-, 5-...mal so groß sein als anfangs.

2. Nachweis für verdünnte Luft. Versuch b. Eine unten geschlossene und oben trichterförmig erweiterte Glasröhre von Barometerlänge (Fig. 290) sei mit Qu. gefüllt; in letzteres werde eine etwas längere und an beiden Enden offene, dünnere Glasröhre so tief eingetaucht, daß der darin freibleibende Raum etwa 10 cm betrage. Verschließt man darauf diese Röhre oben luftdicht und zieht sie dann langsam heraus, so dehnt sich die abgesperrte Luft aus, wobei der Abstand der beiden Qu.-Oberflächen sich in folgender Weise ändert:

1. Ist die Röhre so weit gehoben, daß der 10 cm lange Luftraum sich auf das Doppelte, also auf 20 cm, vergrößert hat, so stehen die

Fig. 289.

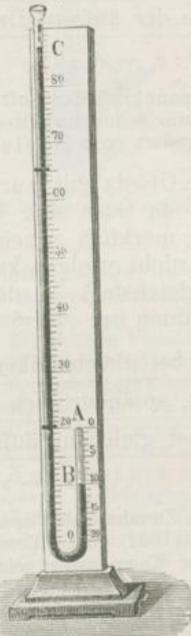
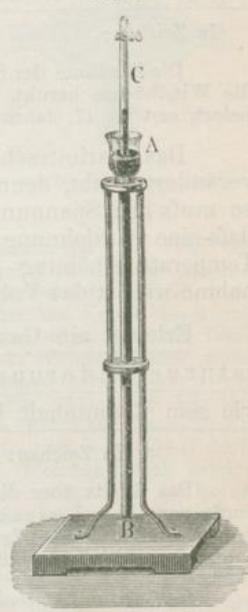


Fig. 290.



ent-
bo-
che
and
und
ker
mit
sich
uft-
uft-
öge
Be-
gen
ver-
eh-
auf
ner
kes
ng,

auf
tal-
dar.
ner,
nit-
urch
un-
amt.
kes
ist
ich.

ten,
wir
ew.
hre
kes
soll
sich
ju-
her
ifs-
ro-
er-
kel
—
wv.
um
von
das



beiden Qu.-Oberflächen um die Hälfte des Barometerstandes voneinander ab. Der Druck, welchen die abgesperrte Luft erleidet, ist demnach nur noch $\frac{1}{2}$ Atmosphäre.

2. Hat die Luft sich auf das Dreifache, also auf 30 cm, ausgedehnt, so stehen die Qu.-Oberflächen um $\frac{2}{3}$ des Barometerstandes auseinander. Demnach beträgt der Überdruck der äußeren, also auch die Spannung der eingeschlossenen Luft nur noch $\frac{1}{3}$ Atmosphäre u. s. w.

Da Gase sich im allgemeinen gegen Druck ebenso verhalten wie atmosphärische Luft, so gilt das Gesetz:

Bei gleichbleibender Temperatur ändert sich der Rauminhalt (v) eines gasförmigen Körpers umgekehrt, die Dichte und Spannung (s) dagegen gerade so wie der äußere Druck (d): Mariottesches Gesetz.

$$\text{In Zeichen:} \quad v : v_1 = d_1 : d; \quad s : s_1 = d : d_1.$$

Die Zunahme der Spannkraft der Luft bei Verdichtung derselben, worauf z. B. die Windbüchse beruht, war schon im Altertum bekannt; das obige Gesetz wurde jedoch erst im 17. Jahrhundert (von Boyle und Mariotte) aufgefunden.

Das Mariottesche Gesetz gilt nur so lange, als die Temperatur unverändert bleibt, denn da Gase sich beim Erwärmen stark ausdehnen, so muß ihre Spannung merklich zunehmen, wenn man sie so einschließt, daß eine Ausdehnung nicht erfolgen kann. Da alle Gase sich bei gleicher Temperaturerhöhung gleichstark ausdehnen (für je 1°C Temperaturzunahme wächst das Volumen um $\frac{1}{273}$, § 115), so gilt noch folgendes Gesetz:

Erleidet ein Gas bei gleichbleibendem Rauminhalte eine Temperaturveränderung, so ändert sich die Spannung desselben ebenso, wie sein Rauminhalt bei gleichem äußeren Drucke sich ändern würde.

$$\text{In Zeichen:} \quad s : s_1 = v : v_1.$$

Das Gesetz über die Zunahme der Spannkraft von Gasen mit der Temperatur wurde von Gay-Lussac (1802) durch Versuche nachgewiesen. Bei sehr starkem Drucke und sehr niedriger Temperatur zeigen indes die Gase erhebliche Abweichungen von dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetze.

Instrumente, welche dazu dienen, die Spannung eingeschlossener Gase oder Dämpfe zu bestimmen, werden Manometer¹⁾ genannt. Sie sind so eingerichtet, daß der Druck entweder durch den Stand einer Qu.-Säule (Quecksilbermanometer, Fig. 291) oder durch die Formveränderungen von sehr elastischem Metallblech (Metallmanometer) angezeigt wird.

Offene Quecksilbermanometer bestehen aus einer Uförmig gebogenen Röhre, welche zum Teil mit Qu. gefüllt ist. Ihr Gebrauch beschränkt sich auf die Messung von geringem Drucke, da bei hohem Drucke die Länge der Röhre unbequem werden würde. (Anwendung von sogen. Sicherheitsröhren für sehr schwachen Druck.) — Für hohen Druck werden geschlossene Qu.- oder Metallmanometer angewandt.

¹⁾ *μανός* (manós), dünn.

Geschlossene Quecksilbermanometer (Fig. 291) bestehen aus einer oben geschlossenen Glasröhre, in welcher Luft durch Qu. abgesperrt ist. Die Skala ist nach dem Mariotteschen Gesetze eingerichtet.

Bei dem in Fig. 292 dargestellten, zur Messung des Dampfdruckes bei Dampfmaschinen häufig angewandten Metallmanometer übt der Dampf auf eine dünne, wellenförmig gebogene Stahlplatte (n), welche in einen linsenförmig erweiterten Raum der Dampfrohre (A) eingeschaltet ist, einen Druck aus. Um die geringen Bewegungen der Platte deutlich sichtbar zu machen, läßt man letztere durch ein Stäbchen (m) auf einen Winkelhebel (ghi) einwirken, dessen einer Arm mit einem Zahnbogen versehen ist. Letzterer dreht einen Zeiger (Z), der auf einer Kreisteilung die Spannung angiebt. Das unter der Stahlplatte angebrachte Kautschukblättchen (o) dient nur zum Schutze.

Eine sehr weit verbreitete Anwendung finden Manometer auch zum Messen des Luftdruckes in den Bierdruckapparaten, durch welche Bier aus den Kellern in die Schänkräume gehoben wird.

Fig. 291.

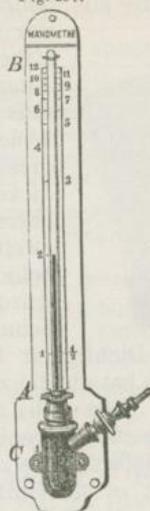
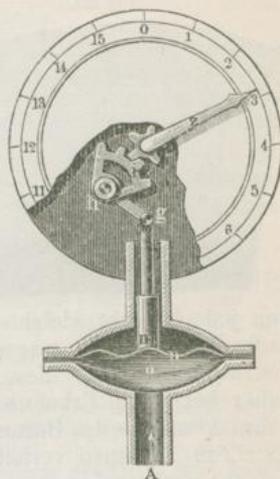


Fig. 292.



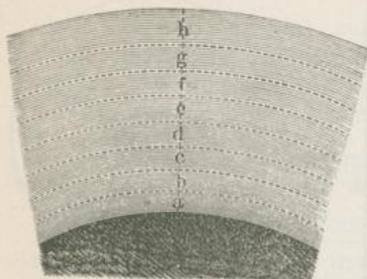
Übungsstoff. 1. Um wv. müßte das Qu. im langen Schenkel (Fig. 289) höher stehen als im kurzen, wenn die abgesperrte Luft auf $\frac{1}{4}$ ihres ursprünglichen Rauminhaltes zusammengedrückt werden sollte, und der Barometerstand a. 75, b. 76, c. 77 cm betrüge? — 2. Warum muß bei solchen Versuchen die Kuppe des kurzen Schenkels besonders stark sein? — 3. Was würde eintreten, wenn man die Temp. der eingeschlossenen Luft a. erhöhte, b. erniedrigte? — 4. Welchen Raum würde die abgesperrte Luft einnehmen, wenn der Qu.-Stand im langen Schenkel nur $\frac{1}{2}$ Atm. betrüge? — 5. Erkläre die Teilung des Luftmanometers (Fig. 291). — 6. Die Verflüssigung von Wasserstoff ist durch eine Kälte von -140°C bei einem Drucke von 650 Atmosphären erreicht worden; Kohlensäure läßt sich bei $21,5^{\circ}\text{C}$ durch einen Druck von ungefähr 60 Atmosphären verflüssigen. Welchen Druck erleidet hierbei jedes qcm der Gefäßwand? — 7. Mit welchem Überdrucke wird der Kolben einer Dampfmaschine in Bewegung gesetzt, wenn die Dampfspannung 6 Atm. beträgt und die Dämpfe nach ihrer Arbeitsleistung in die Luft entweichen? — 8. Eine Taucherglocke sei 10 m tief in W. eingesenkt. Der wievielte Teil derselben würde dann noch mit Luft erfüllt sein, wenn von oben keine Luft nachgepumpt würde? — 9. Wie stark ist die Luft verdichtet, welche ein Taucher in 15 und 20 m Tiefe einatmet? Druck auf 1 qcm? — 10. Wie hoch könnte der Strahl einer Feuerspritze aufsteigen, wenn die Luft im Windkessel a. auf die Hälfte, b. auf $\frac{1}{3}$ ihres Rauminhaltes zusammengedrückt wäre, und der Strahl beim Aufsteigen keine Widerstände zu überwinden hätte?

§ 86. Abnahme des Barometerstandes mit der Höhe.

Wenn man aus Meereshöhe in der Atmosphäre aufsteigt, so nimmt der Luftdruck mehr und mehr ab, und zwar um 1 mm, wenn die Steigung etwa 11 m (genau 10,52 m bei 0° , 11,36 m bei 20°) beträgt, bei einer abermaligen Erhebung von 11 m etwas weniger als 1 mm, überhaupt jedes folgende Mal um etwas weniger als das vorhergehende Mal, vorausgesetzt daß man jedesmal um die gleiche Höhe steigt. Um bei jeder Steigung eine Abnahme von je 1 mm zu erhalten, muß man also jedes

folgende Mal etwas höher steigen als vorher. Zur Erklärung stelle man sich die Atmosphäre aus zahlreichen Schichten zusammengesetzt

Fig. 293.



vor (Fig. 293). Nimmt nun bei einer Erhebung um 11 m der Druck um 1 mm ab, so hat dies seinen Grund darin, daß jetzt der Druck der untersten Luftschicht nicht mitwirkt und das Gewicht dieser Schicht dem Gewichte einer 1 mm dicken Qu.-Schicht gleich ist. Steigt man abermals um 11 m, so drückt auch die zweite Schicht nicht mit. Wäre nun diese Schicht ebenso dicht wie die erste, so würde der Druck wieder um 1 mm abnehmen müssen. Beide Schichten können jedoch nicht gleiche Dichtigkeit haben, da die untere Schicht eine Luftschicht mehr zu tragen hat als die zweite, also auch stärker zusammengedrückt wird, als diese. Die Abnahme des Luftdruckes muß daher bei 22 m Erhebung etwas weniger betragen als 2 mm; oder: um 2 mm Abnahme des Barometerstandes zu erhalten, muß man höher steigen als 22 m. Ebenso verhält es sich mit jeder folgenden Schicht in Bezug auf die vorhergehende.

Genauereres ergibt sich unter Anwendung des Mariotteschen Gesetzes durch folgende Überlegung: Eine Luftsäule sei in parallele Schichten von gleicher, aber so geringer Dicke geteilt, daß innerhalb jeder Schicht die Dichte als gleichmäßig angesehen werden kann. Bezeichnet man dann die Gewichte der einzelnen Schichten mit p_1, p_2 u. s. w., das Gewicht sämtlicher Schichten mit q_1 , das Gewicht aller Schichten mit Ausnahme der untersten mit q_2 , mit Ausnahme der beiden untersten mit q_3 u. s. w., so ergibt sich, da die Dichten, also auch die Gewichte der aufeinander folgenden Luftschichten mit den drückenden Kräften in gleichem Verhältnis stehen, die Proportion: $p_1 : p_2 = q_2 : q_3$, oder nach Umstellung der inneren Glieder: $p_1 : q_2 = p_2 : q_3$, also auch $p_1 + q_2 : q_2 = p_2 + q_3 : q_3$.

Nun ist $p_1 + q_2 = q_1$ (durch den Barometerstand am Grunde der Atm. gemessen), ferner

$p_2 + q_3 = q_2$ (durch den Barometerstand in der Höhe der untersten Schicht gemessen). Folglich

$q_1 : q_2 = q_2 : q_3$. Ebenso erhält man: $q_2 : q_3 = q_3 : q_4, q_3 : q_4 = q_4 : q_5$ u. s. w.

Je 3 aufeinander folgende Barometerstände stehen daher in stetiger Proportion. Sind die beiden unteren gemessen, so lassen sich demnach alle übrigen daraus berechnen.

Ist z. B. der Luftdruck an der Erdoberfläche 760 mm, in 11 m Höhe 759 mm, so ergibt sich die Proportion: $760 : 759 = 759 : x$, also $x = \frac{759}{760} \cdot 759$, d. h. der Barometerstand für die 2fache Höhe wird erhalten, wenn man den Barometerstand für die 1fache Höhe mit dem Quotienten $\frac{759}{760}$ multipliziert. Drückt man nun den Barometerstand für die 1fache Höhe in ähnlicher Weise aus, indem statt 759 das Produkt $\frac{759}{760} \cdot 760$ setzt, so erhält man $x = \frac{759}{760} \times \frac{759}{760} \cdot 760$ oder $(\frac{759}{760})^2 \cdot 760$. Die Rechnung, nach obigen Proportionen weiter fortgesetzt, ergibt die rechts stehende Tabelle (von unten nach oben zu lesen).

Arithm. Reihe.	Geom. Reihe.	
u. s. w.		
	in d. 5fachen Höhe	$(\frac{759}{760})^5 \cdot 760$ „
	in d. 4fachen Höhe	$(\frac{759}{760})^4 \cdot 760$ „
	in d. 3fachen Höhe	$(\frac{759}{760})^3 \cdot 760$ „
	in d. 2fachen Höhe	$(\frac{759}{760})^2 \cdot 760$ „
	in d. 1fachen Höhe	$(\frac{759}{760})^1 \cdot 760$ „
	an der Erdoberfläche	. . 760 mm
Barometerstände:		

(Berechnung.)
(Messung.)

Es gilt mithin das Gesetz:

Die Barometerstände nehmen in geometrischer Reihe ab, wenn die Höhen in arithmetischer Reihe zunehmen.

Wie sich der Barometerstand für gegebene Höhen berechnen läßt, so lassen sich umgekehrt aus beobachteten Barometerständen auch die Höhen der Beobachtungs-orte berechnen (Barometrische Höhenmessung); doch ist zu genauen Bestimmungen die Abnahme der Schwere nach dem Äquator zu, die Temperatur und Feuchtigkeit der Luft mit in Rechnung zu ziehen.

Die erste barometrische Höhenmessung wurde bald nach der Erfindung des Barometers auf Pascals Veranlassung in Südfrankreich ausgeführt.

Mittlere Barometerstände für verschiedene Höhen:

Auf d. Brocken . . . 1145 m Höhe 660 mm	Auf d. Montblanc . 4600 m Höhe 430 mm
„ „ St. Gotthard. 2380 „ „ 567 „	„ „ Chimborasso 6300 „ „ 340 „
„ „ Ätna. 3230 „ „ 510 „	„ „ Dhawalagiri 8200 „ „ 270 „

Die Höhe der Atmosphäre schätzt man auf ungefähr 100 km.

Übungsstoff. 1. Welche Änderungen des Barometerstandes wird ein Luftschiffer während der Fahrt wahrnehmen? — 2. Inwiefern sind die Barometerbeobachtungen für den Luftschiffer besonders wichtig? — 3. Warum muß bei den auf Barometern befindlichen Wetterangaben (Fig. 284) die Höhenlage des Ortes berücksichtigt werden? — 4. Wie sind die Barometerstände für Orte zu berechnen, welche 2-, 3-, 4-...mal 10,52 m hoch (über dem Meere) liegen? — 5. Erkläre, warum barometrische Höhenmessungen um so genauer werden, a. je ruhiger die Luft ist, b. je weniger die beiden Orte, deren Höhenunterschied ermittelt werden soll, in horizontaler Richtung auseinander liegen. — 6. Betrüge der Barometerstand an einem Orte 500 mm, so würde sich die Höhe nach der Gleichung $(\frac{760}{500})^x \cdot 760 = 500$ unter gewissen Voraussetzungen berechnen lassen. a. Was bedeutet in dieser Gleichung das Zeichen x ? b. Welches sind jene Voraussetzungen? — 7. Der Höhenunterschied zweier Orte, deren wagerechter Abstand gering ist (Fuß und Gipfel eines Berges), läßt sich durch barometrische Messungen dadurch genau bestimmen, daß man die Beobachtungen an beiden Orten gleichzeitig macht oder längere Zeit hindurch zahlreiche Beobachtungen anstellt. Grund?

§ 87. Luftpumpen. 1. Verdichtungspumpen. Sie bestehen

im wesentlichen aus einem hohlen Metallcylinder, dem *Stiefel*, in welchem ein *Kolben* auf- und abbewegt werden kann. Das untere Ende des Cylinders ist zum Anschrauben an das zu füllende *Gefäß* mit einem Gewinde versehen und enthält ein *Ventil*, das sich nach außen öffnet. Je nachdem nun atm. Luft oder andere Gase verdichtet werden sollen, befindet sich seitlich oben am Cylinder eine Öffnung (Fig. 294), oder unten ein Ansatzrohr mit einem nach innen sich öffnenden Ventile (Fig. 295), durch welches das zu verdichtende Gas einströmt.

Eine nützliche Anwendung finden Luftverdichtungspumpen im praktischen Leben zur Zuführung frischer Luft bei der Benutzung von Taucherglocken, zur Herstellung kohlenstoffreicher Getränke, sowie um Kohlensäure zu einer Flüssigkeit zu verdichten und

Fig. 294.

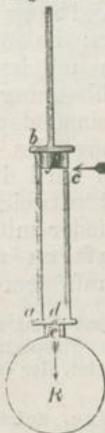
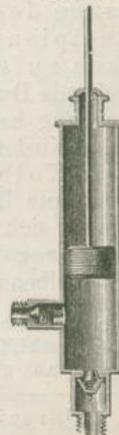


Fig. 295.



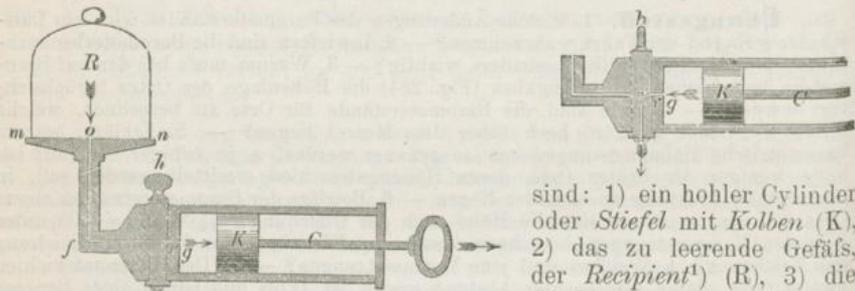
dadurch für den Versand (z. B. zur Verwendung beim Bierschank) geeignet zu machen. In einzelnen großen Städten (Berlin und London) werden durch Dampfmaschinen getriebene Luftpumpen dazu benutzt, um in kleinen Wagen, welche in unterirdischen Röhren laufen, Briefe und Pakete zu befördern (Rohrpost). In neuester Zeit hat man verdichtete Luft auch zum Betriebe von Stein-Bohrmaschinen in der Weise benutzt, daß man Stoßbohrer mit dem Kolben eines Cylinders in Verbindung brachte und die Kolbenbewegung durch abwechselnd eintretende Druckluft bewirkte (Bohrung des Mont-Cenis- und Gotthard-Tunnels). Die Verwendung verdichteter Luft zur Kraftübertragung wird auch in der Weise ausgeführt (z. B. in Paris) daß man den Werkstätten verdichtete Luft durch Röhrenleitungen (ähnlich wie bei der Leuchtgasleitung) zuführt, um allerlei Arbeitsmaschinen dadurch in Thätigkeit zu setzen und so dem Kleingewerbe eine den Dampf ersetzende Betriebskraft zu liefern (Poppsches Luftdruckverfahren). Allgemein bekannt ist die Verwendung verdichteter Luft beim Gebrauche von Windbüchsen.

2. Verdünnungspumpen. Zur Verdünnung der atmosphärischen Luft werden gewöhnlich Hahn- oder Ventil-Luftpumpen benutzt.

Die wesentlichen Teile einer Hahn-Luftpumpe (Fig. 296 und 297)

Fig. 296.

Fig. 297.



sind: 1) ein hohler Cylinder oder Stiefel mit Kolben (K), 2) das zu leerende Gefäß, der Recipient¹⁾ (R), 3) die Verbindungsröhre (ofg) zwischen

Stiefel und Recipient und 4) ein oder mehrere Hähne (h). — Bei der einfachsten Einrichtung enthält die Hahn-Luftpumpe nur einen Hahn, welcher im Verbindungsrohre dicht unter dem Stiefel angebracht und zweifach durchbohrt ist. Die eine geradlinige Durchbohrung (Fig. 296) geht mitten quer durch den Hahn und verbindet beim Aufgange des Kolbens den Innenraum des Stiefels mit dem des Recipienten; die andere rechtwinklige Durchbohrung (Fig. 297) führt nach aufsen und ist mit ihrem kurzen Schenkel gegen die quer durchgehende Durchbohrung gerichtet, ohne diese zu erreichen. Diese Durchbohrung hat einen doppelten Zweck, nämlich 1) während des Pumpens beim Niedergange des Kolbens eine offene Verbindung zwischen dem Kolben und der äußeren Luft herzustellen, damit die ausgepumpte Luft entweichen kann, 2) nach dem Pumpen, wenn der Recipient sich wieder mit Luft füllen soll, den Recipienten mit der äußeren Luft zu verbinden. Bei jedem Auf- und Niedergange des Kolbens muß demnach der Hahn um 90° gedreht werden.

Als Recipient dient gewöhnlich eine Glasglocke, welche auf eine starke, genau eben geschliffene Glasplatte gestellt wird. Die letztere ist auf einen metallenen Teller (mn) gekittet, der bei o durchbohrt ist.

¹⁾ recipiëre, aufnehmen.

Bei der **Ventilluftpumpe** (Fig. 298) sind die Hähne durch 2 Ventile ersetzt, welche sich wie die Ventile einer Saugpumpe öffnen und schliessen.

Selbst bei der vollkommensten Einrichtung einer Luftpumpe läßt sich die Luft kaum stärker als bis $\frac{1}{1000}$ verdünnen. Die Ursache hiervon ist namentlich der sogen. schädliche Raum, d. h. der Raum, welcher zwischen der inneren Kolbenfläche und dem Hahn oder Ventil freibleibt, wenn der Kolben seine tiefste Stellung einnimmt. Die in diesen Raum von außen eindringende Luft breitet sich bei jedem Kolbenzuge im Stiefel aus. — Bei der Ventilluftpumpe vermag die verdünnte Luft schliesslich das Bodenventil nicht mehr zu heben.

Die erste Luftpumpe, welche (um 1650) von Otto von Guericke erfunden wurde, war eine Ventilluftpumpe; Guericke suchte zuerst einen luftleeren Raum dadurch zu erhalten, daß er mittelst einer Wasserpumpe ein mit Wasser gefülltes Faß entleerte, welches er nachher durch eine kupferne Hohlkugel ersetzte. Er erfand fast alle Versuche, welche jetzt noch mit der Luftpumpe angestellt werden. — Um die Luft stärker zu verdünnen, als dies mit Hahn- oder Ventilluftpumpen möglich ist, wendet man die in neuerer Zeit erfundenen **Quecksilberluftpumpen** an. Bei denselben wird durch Bewegung von Quecksilber in zwei durch einen Gummischlauch verbundenen und mit Sperrhähnen versehenen Glasröhren eine Torricellische Leere erzeugt. Weit bequemer zu handhaben sind die **Wasserluftpumpen**; dieselben beruhen auf der Saugwirkung, welche schnell abfließendes Wasser hervorbringt (vgl. § 19: Zerstäubungsapparat).

Versuche mit der Luftpumpe.

a. Der Druck der Luft. Der Recipient haftet nach einigen Kolbenzügen fest am Teller. Ein auf einem Ringe von Glas oder Messing (Fig. 299) befestigtes Blatt Pergamentpapier oder Tierblase wird nach mehreren Kolbenzügen durch den Druck der äußeren Luft stark nach innen gebogen. Quecksilber wird durch Holz geprefst (*Quecksilberregen*.)

Am auffälligsten tritt die GröÙe des Luftdruckes hervor bei Benutzung der sogen. Magdeburger Halbkugeln, hohler Metallhalbkugeln, welche genau aufeinander passen und mit Handgriffen versehen sind (Fig. 300).

Guericke benutzte derartige Halbkugeln, um auf dem Reichstage zu Regensburg 1654 dem Kaiser Ferdinand sowie den übrigen versammelten Herren einen Beweis für den Druck der Luft und zugleich eine Vorstellung von der GröÙe desselben zu geben. 16 Pferde vermochten die beiden Halbkugeln von beinahe 60 cm Durchmesser nicht auseinander zu reißen.

b. Um den Grad der Verdünnung der Luft zu bestimmen, stellt man eine sogen. Barometerprobe (Fig. 301), d. h. ein abgekürztes Barometer,

Fig. 298.

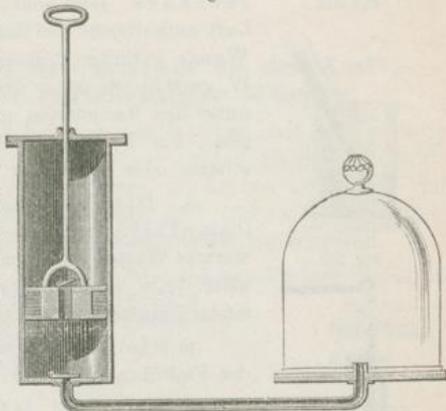


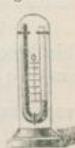
Fig. 299.



Fig. 300.



Fig. 301.



unter den Recipienten. Mit einer guten Luftpumpe muß sich die Luft bis auf 1 mm Druck verdünnen lassen.†)

c. In wie hohem Grade die Luft das Bestreben hat, sich auszudehnen, tritt sehr deutlich hervor, wenn man eine etwas Luft enthaltende und zugebundene Blase oder ein fast ganz mit Wasser gefülltes Probiergläschen (Fig. 302), das umgekehrt in W. gestellt ist, unter den Recipienten bringt. — Der Strahl eines unter den Recipienten gestellten Heronsballes beginnt zu springen. Aus Holz unter Wasser steigen Luftblasen auf. Seifenschaum oder ein welker Apfel bläht sich auf u. s. w.

Fig. 302.

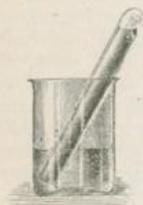
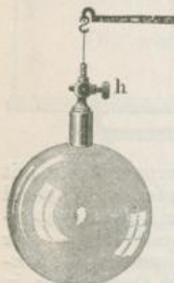


Fig. 303.



d. Die Luft setzt der Verdunstung und der Dampfbildung einen Widerstand entgegen. Lauwarmes Wasser kocht unter dem Recipienten. Die Verdunstungskälte beim raschen Verdampfen von Äther bringt Wasser in einem Uhrgläschen zum Gefrieren (vgl. Wärmelehre §§ 118 u. 120).

e. Die Luft hemmt fallende Körper. Versuch mit der Fallröhre (§§ 6 und 73).

f. Die Luft ist notwendig zur Schalleitung (§ 90), zum Brennen und Atmen (ein Licht erlöscht).

g. Das Gewicht der Luft läßt sich annähernd bestimmen, indem man die in einem Glasballon (Fig. 303) enthaltene Luft so stark als möglich verdünnt und dann das Gewicht des luftleer gemachten Ballons von dem Gewichte des mit Luft erfüllten Ballons subtrahiert. Genaue Wägungen ergeben, daß 1 Liter atmosphärische Luft von 0° und 760 mm Druck 1,293 g wiegt.

Übungsstoff. 1. In welcher Weise kann eine Hahnluftpumpe zum Verdichten der Luft benutzt werden? — 2. Erkläre die Erschn. der oben (unter c) angeführten Versuche. — 3. Bei dem durch Fig. 302 dargestellten Versuche steigen aus dem W. zahlreiche Bläschen auf. Wie erklärt sich diese Erschn.? — 4. Bei der Barometerprobe sei das Qu. so tief gesunken, daß der Abstand beider Qu.-Oberflächen noch 1 cm betrage. Wie groß ist dann der Druck der verdünnten Luft auf 1 qcm und welchen Teil ihrer ursprünglichen Dichtigkeit hat die Luft erreicht? — 5. Welchen Raum würde die unter dem Recipienten anfangs enthaltene Luft bei solcher Verdünnung ausfüllen, wenn der Innenraum des Recipienten 2000 ccm betrüge? — 6. Wie groß ist bei solcher Verdünnung der auf 1 qcm berechnete Überdruck, welchen der Recipient durch die äußere Luft erleidet, wenn das Barometer bei Anstellung des Versuches einen Luftdruck von 770 mm anzeigt? — 7. Wie groß würde in diesem Falle der Druck der Luft auf den Kolben sein, a. von innen, b. von außen, wenn die Kolbenfläche 20 qcm betrüge? — 8. Wie erklärt es sich demnach, daß das Pumpen um so beschwerlicher wird, je stärker die Luft schon verdünnt ist? — 9. Die Halbkugeln, welche Otto v. Guericke (1654) in Regensburg benutzte, hatten einen Durchm. von 1 magdeburger Elle (etwa 57½ cm). Es soll berechnet werden, wv. Kr. zum Auseinanderreißen derselben erforderlich war, wobei völlige Luftleere

†) Beträgt der Innenraum des Recipienten m, der des Stiefels mit der Verbindungsröhre q ccm, so verteilen sich mit jedem Kolbenzuge m ccm Luft auf (m + q) ccm. Bei einem Barometerstande von 76 cm würde somit die Spannung der verdünnten Luft nach dem 1. Kolbenzuge $\frac{m}{m+q} \cdot 76$, nach dem 2. Kolbenzuge $\left(\frac{m}{m+q}\right)^2 \cdot 76 \dots$, nach dem n. Kolbenzuge $\left(\frac{m}{m+q}\right)^n \cdot 76$ cm betragen.

angenommen werden mag. (Man erhält die für jede Halbkugel erforderliche Kr., wenn man den Luftdruck für eine Kreisfläche von $57\frac{1}{2}$ cm Durchmesser berechnet.) — 10. Wie ist es zu erklären, daß mehrere Pferde die Kugeln nicht auseinander zu reißen vermochten, während doch ein Pferd eine Last von mehr als 1000 kg fortziehen kann?

§ 88. Gewichtsverlust der Körper in der Luft. Specifisches Gewicht luftförmiger Körper.

1. Gewichtsverlust. Da die luftförmigen Körper mit den Flüssigkeiten zwei wesentliche Eigenschaften (Schwere und vollkommen leichte Verschiebbarkeit der Teilchen) gemein haben, so ist zu erwarten, daß auch das Gesetz des Auftriebes für dieselben gilt (Archimedisches Prinzip). Dies läßt sich mit Hilfe der Luftpumpe nachweisen.

Erkläre zunächst die Ersch. des durch Fig. 304 veranschaulichten Versuches, bei welchem von 2 in Wasser untergetauchten Körpern (Stein und Gewichtstück von Blei), die sich anfangs das Gleichgewicht halten, der größere das Übergewicht erlangt, wenn man das Wasser entfernt.

Versuch a. Bringt man einen Wagebalken, an dem ein kleiner Glasballon einem Metallstück das Gleichgewicht hält, unter den Recipienten der Luftpumpe (Fig. 305), so sinkt der Ballon nach einigen Kolbenzügen nieder. Läßt man dann Luft einströmen, so entsteht wieder Gleichgewicht. (Vergleiche die Ergebnisse der beiden Versuche miteinander.) — Genaue Wägungen bestätigen den Satz:

In der Luft verliert ein Körper von seinem Gewichte ebensoviel, als die Luft wiegt, welche er verdrängt.

Die gewöhnlichen Wägungen ergeben hiernach streng genommen das wahre Gewicht der Körper nur dann, wenn die gewogenen Körper mit den Gewichtstücken gleichen Raum einnehmen.

Wie bei den Flüssigkeiten, so ist auch bei den luftförmigen Körpern der Gewichtsverlust das Maß für die Größe des Auftriebes, d. h. des Überdruckes, welchen ein Körper durch die ihn umgebende Luft nach oben erleidet. Dem Auftrieb in der Luft überlassene Körper müssen daher auch, je nachdem ihr Gewicht kleiner, ebensogroß oder größer ist als ihr Auftrieb, entweder aufsteigen, schweben oder sinken.

Versuch b. Füllt man Seifenblasen mit Wasserstoff oder Leuchtgas (Fig. 306),

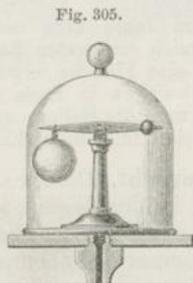


Fig. 305.



Fig. 304.

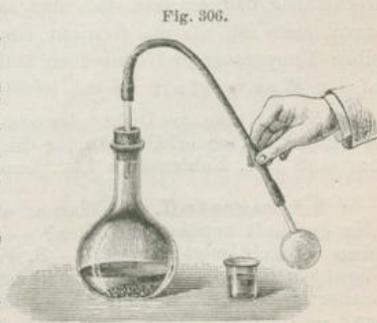


Fig. 306.

auf
us-
t was
mit
t in
ines
rin-
fen-
der
lau-
ngs-
r in
(20).
mit
ng
be-
tene
des
er-
sche
Ver-
r c)
igen
der
ber-
auf
—
bei
be-
ber-
eter
groß
von
ach,
innt
tzte,
den,
eere
Ver-
auf
der
zuge

so steigen dieselben in der Luft auf; mit Kohlensäure gefüllt sinken sie nieder. — Werden die Blasen mit Sauerstoff oder Stickstoff gefüllt, so schweben sie nahezu in der Luft.

Durch den Auftrieb der atm. Luft erklärt sich das Steigen eines mit Leuchtgas oder Wasserstoff gefüllten Ballons. Der Ballon (Fig. 307) besteht aus einer Hülle von Seidenzeug, das durch Kautschuk oder Firnis luftdicht gemacht ist. Zur Aufnahme der Luftfahrer, der Beobachtungs-Instrumente, des Ballastes u. s. w. wird unter dem Ballon eine leichte Gondel aufgehängt. Die Luftballons finden Anwendung zu wissenschaftlichen Beobachtungen (Abnahme des Luftdruckes, der Temperatur, Strömungen in den oberen Luftschichten, elektr. Zustand derselben); sehr ausgedehnt ist neuerdings auch die Verwendung derselben zu Kriegszwecken. Die größte bis jetzt erreichte Höhe beträgt gegen 11000 m.

Fig. 307.



Durch Versuche ist die Möglichkeit erwiesen, einen Ballon bei windstillem Wetter in beliebiger Weise zu lenken; bei einer stärkeren Luftströmung ist dies jedoch unmöglich, da weder das Material des Ballons die hinreichende Festigkeit besitzt, noch die zur Überwindung des Luftwiderstandes erforderliche Kraft vorhanden ist.

Im Jahre 1783 ließen die Gebrüder Montgolfier in Frankreich den ersten Ballon steigen, welcher Luft enthielt, die durch eine Flamme erwärmt wurde. Kurze Zeit darauf wurde von Charles in Paris die Füllung mit Wasserstoffgas angewandt; gegenwärtig füllt man die Ballons meist mit Leuchtgas, welches billiger ist und weniger stark durch die Hülle diffundiert, als Wasserstoff.

2. Spezifisches Gewicht. Die Bestimmung des spec. Gewichtes der Gase wird in der Weise ausgeführt, daß man einen Glasballon sowohl leer, als auch mit dem betreffenden (vollkommen trockenen) Gase gefüllt, mittelst einer sehr empfindlichen Wage wägt und dann das Gewicht des Balkens subtrahiert. Aus den erhaltenen Gewichten wird darauf das Gewicht für 1 cm in Grammen, also das spec. Gewicht, berechnet. Einen bestimmten brauchbaren Wert erhält man jedoch erst dadurch, daß man die Dichtigkeit des Gases für einen Druck von 760 mm Qu. und eine Temperatur von 0° berechnet.

Bei 0° und mittlerem Barometerstande ist das spec. Gewicht von atm. Luft 0,001293, von Wasserstoff 0,000896. Atm. Luft ist demnach ungefähr 770, Wasserstoff über 10 000 mal so leicht als Wasser.

Das spec. Gewicht (eigentlich die Dichte) der gasförmigen Körper drückt man zweckmäßig dadurch aus, daß man angiebt, wievielmals so groß das Gewicht eines Gasvolumens ist, als das Gewicht einer gleichen Raummenge atm. Luft bei derselben Temperatur und demselben äußeren Drucke, oder man bezieht das Gewicht auf den Wasserstoff als das leichteste aller Gase.

Nimmt man die Dichte der atm. Luft bei 0° und mittlerem Barometerstande als Einheit an, so erhält man für die Dichte von Wasserstoff 0,07, Stickstoff 0,97, Sauerstoff 1,10, Kohlensäure 1,52, Leuchtgas ungefähr 0,4.

Übungsstoff. 1. Warum werden infolge des Auftriebes Wägungen der K. in der Luft ungenau ausfallen? — 2. Warum können diese Fehler im täglichen Leben vernachlässigt werden? — 3. Wie müßte man verfahren, um nach solchen Wägungen das genaue Gewicht zu bestimmen? — 4. Wie läßt sich die Kr., mit welcher ein Kautschukballon (Spielzeug der Kinder) aufsteigt, ohne Wage bestimmen? — 5. Wann muß der Ballon aufhören zu steigen? — 6. Welchen Einfluß

mufs die Höhe auf den Rauminhalt desselben ausüben? — 7. Wie würde sich eine mit Stickstoff gefüllte Seifenblase a. in einer Wasserstoff-, b. in einer Kohlensäure-Atm. verhalten? — 8. Was wird eintreten, wenn 2 Gefäße, von denen das eine mit Wasserstoff, das andere mit Kohlensäure gefüllt ist, längere Zeit offen stehen? (Kohlensäure in Kellern und Brunnenschächten; Dunsthöhlen.) — 9. Der Glasballon (Fig. 305) sei 100 ccm, die Metallkugel 1 ccm groß. Um wv. ist das Gew. des Ballons im luftleeren Recipienten größer als das der Metallkugel? — 10. Wv. Liter von den oben genannten Gasen haben mit 1 Liter atm. Luft gleiches Gew.? — 11. Gew. der Luft, welche ein Ballon von 500 ccm Rauminhalt am Boden verdrängt? (1 Liter Luft wiege 1,3 g.) — 12. Wie groß ist das Gew. des Ballons, wenn $\frac{1}{10}$ seines ganzen Rauminhaltes mit Leuchtgas gefüllt ist und die Hülle des Ballons 100 kg wiegt? Mit welcher Kr. wird ein solcher Ballon aufsteigen?

III. Abschnitt.

Die Lehre vom Schalle.

(A k u s t i k.)

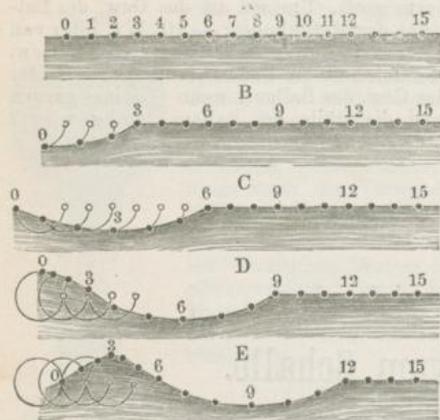
(I. Lehrstufe, §§ 22—24.)

§ 89 a. Wellenbewegung flüssiger und fester (elastischer) Körper. Ein Schall entsteht, wenn durch Schwingungen eines elastischen Körpers in den umgebenden Luftschichten abwechselnd Verdünnungen und Verdichtungen erzeugt werden; indem sich diese auf die folgenden Luftschichten übertragen und so schliesslich auf unser Ohr einwirken, wird der Schall fortgepflanzt. *Die Schallfortpflanzung beruht somit auf einer Wellenbewegung der Luft, d. h. der Mitteilung einer schwingenden Bewegung von Teilchen zu Teilchen, wobei die in der Fortpflanzungsrichtung aufeinander folgenden Teilchen nacheinander dieselbe Schwingung machen.* Zum Verständnis dieses Vorganges ist zunächst ein genaueres Eingehen auf die Wellenbewegung flüssiger und elastischer (fester) Körper erforderlich.

a. Wasserwellen. Wirft man einen Stein auf eine ruhende Wasseroberfläche, so wird das Gleichgewicht der Wasserteilchen gestört; von dem Erschütterungsmittelpunkte ausgehend breiten sich kreisförmige Wellen aus, welche rasch fortschreiten und den Eindruck machen, als befände sich die ganze Wasseroberfläche in einer fließenden Bewegung. Ein leichter Körper indes, der auf dem Wasser schwimmt, wird von den Wellen, die unter ihm hinwegziehen, nur gehoben und gesenkt ohne wesentliche seitliche Fortbewegung; demnach ist auch die Wassermasse als Ganzes nicht in fortschreitender Bewegung, sondern es tritt nur eine abwechselnde Hebung und Senkung der einzelnen Wasserteilchen ein, welche dabei kleine Kreisbahnen beschreiben, also immer wieder an ihren Ausgangspunkt zurückkommen.

Zur Erläuterung dieses Vorganges betrachtet man die Bewegung einer Anzahl aufeinander folgender Wasserteilchen in der Richtung eines *Wellenstrahles*, d. h. einer Geraden, die vom Mittelpunkte der Welle nach der Peripherie derselben gezogen

Fig. 308.

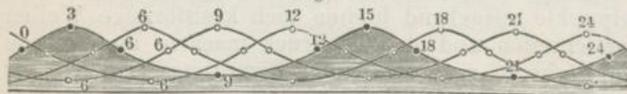


wird. Fig. 308 A stellt die Wasseroberfläche im Ruhezustande mit den Wasserteilchen 0 bis 15 dar; B bis E erläutert die Lage derselben Teilchen in den aufeinander folgenden Bewegungszuständen bis zur Ausbildung einer vollständigen Welle. Die Abstände der Wasserteilchen sind so gewählt, daß jedes folgende seine Bewegung beginnt, wenn das vorhergehende $\frac{1}{2}$ seiner kreisförmigen Bahn zurückgelegt hat. Während nun A den vollkommenen Ruhezustand darstellt, haben bei B die Teilchen 0, 1 und 2 bereits $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{4}$ ihrer Bahn durchlaufen; das Teilchen 3 ist noch in seiner Ruhelage. In C hat das Teilchen 0 die Hälfte seiner Bahn zurückgelegt, die folgenden bis zum 6., welches seine Bewegung soeben beginnt, je $\frac{1}{2}$ weniger, also $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ u. s. w. In D hat das Teilchen 0 von seiner Bahn $\frac{3}{4}$ vollendet und ist auf dem höchsten Punkte derselben, dem Gipfel des *Wellenberges* angekommen, während 6 die tiefste Stelle des *Wellenthales* einnimmt und $\frac{1}{4}$ der Bahn zurückgelegt hat. In E endlich ist 0 wieder in seine Ruhelage zurückgekehrt, der Wellenberg ist bis 3 und das Wellenthal bis 9 fortgeschritten, während 12 seine Bewegung erst beginnt. Der Eindruck des Fortschreitens von Wellenberg und Wellenthal wird also dadurch hervorgebracht, daß jedes Wasserteilchen dem folgenden seine Bewegung mitteilt und demnach alle in der Richtung eines Wellenradius aufeinander folgenden Teilchen nach einander die gleiche Bewegung machen. Die Entfernung von einem Teilchen bis zum nächsten, welches sich im gleichen Schwingungszustande befindet, heißt eine *Wellenlänge*; in E stellt der Abstand von 0 bis 12 eine solche dar, welche einen Wellenberg (0 bis 6) und ein Wellenthal (6 bis 12) umfaßt. Hiernach ergibt sich zugleich das erste Gesetz der Wellenbewegung, daß nämlich die Bewegung um eine Wellenlänge fortschreitet, während ein einzelnes Teilchen einen ganzen Umlauf (eine Schwingung) vollendet hat.

Die Wellenlänge ist gleich dem während der Dauer einer vollständigen Schwingung zurückgelegten Wege.

Solange die Ursache der Wellenbewegung fort dauert, setzen auch die Wasserteilchen ihre Bewegung fort, sodafs Wellenberg und Wellenthal gleichmäfsig sich verdrängen. Der schraffierte Teil von Fig. 309 stellt zwei vollständige Wellenlängen dar, bei 3 und 15 liegen die Berge, bei 9 und 21 die Thäler.

Fig. 309.



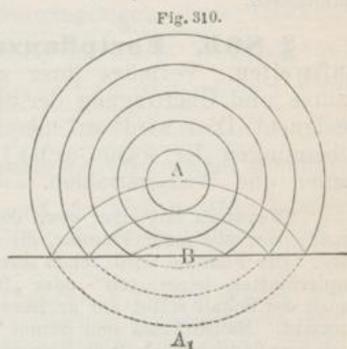
Nach weiterem Umlauf von je $\frac{1}{4}$ der Schwingungsdauer sind Berge und Thäler entsprechend fortgerückt, sodafs die Welle nacheinander die durch die Kurven angedeutete Lage erhält. Erfolgen nun in 1 Sekunde n Schwingungen, so entstehen auch n Wellen in derselben Zeit, und der von der Wellenbewegung zurückgelegte Weg wird, wenn λ die Wellenlänge bezeichnet, durch das Produkt $n \cdot \lambda$ ausgedrückt. Der in 1 Sekunde zurückgelegte Weg entspricht aber der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, sodafs sich als das zweite Gesetz der Wellenbewegung ergibt:

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus Schwingungszahl und Wellenlänge.

In Zeichen: $c = n \cdot \lambda$

Zurückwerfung der Wellen. Die von A, Fig. 310, ausgehenden Wellen würden sich, wenn die Wand B nicht vorhanden wäre, als vollständige Kreise weiter fortsetzen. Dies wird durch die Wand dadurch verhindert, daß sie die Wellen zurückwirft. Die Zurückwerfung erfolgt nach einem bestimmten Gesetze:

Werden kreisförmige Wellen von einer geraden, festen Wand zurückgeworfen, so scheinen sie von einem Punkte her zu kommen, welcher ebensoweit hinter der Wand liegt, als ihr wirklicher Ausgangspunkt vor derselben.



Interferenz. Werden auf einer Wasserfläche gleichzeitig zwei Wellenzüge erregt, so durchkreuzen sich (interferieren) die Wellen, ohne sich jedoch in ihrer Fortbewegung weiter zu stören. Überall, wo zwei Wellenberge zusammen treffen, entsteht eine größere Erhebung, wie umgekehrt da eine tiefere Senkung eintritt, wo zwei Wellenthäler zusammenfallen. Wo Berg und Thal sich kreuzen, gleichen sich beide mehr oder weniger aus. *Diese Erscheinungen, welche durch das Zusammenwirken zweier Wellenbewegungen eintreten, werden Interferenzen genannt.*

b. Seilwellen. Wird gegen ein schlaff gespanntes Seil, einen Kautschukschlauch oder eine elastische Spirale von Messingdraht nahe dem einen Ende ein Schlag geführt, so entstehen Ausbiegungen, welche sich längs des Seiles fortpflanzen und zwar in der Weise, daß auf die erste Ausbiegung eine zweite in entgegengesetzter Richtung folgt, dann eine dritte, mit der ersten gleichgerichtet u. s. w. Man kann diese Ausbuchtungen als Wellenberge und Wellenthäler ansehen; zwei aufeinander folgende bilden dann eine Welle. Vergleichen wir diese Wellen mit den Wasserwellen, so finden wir den Unterschied beider darin, daß die Wasserwellen sich in Kreisen bewegen, während die Seilteilchen in geraden Linien senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle schwingen. Da jedoch auch bei Wasserwellen die kreisförmige Bahn in eine schmal elliptische übergehen kann, so ist der Zusammenhang zwischen beiden Bewegungsformen leicht zu erkennen.

Die bei den Seilwellen auftretenden Schwingungen werden als Quer- oder Transversalschwingungen bezeichnet.)*

Auch in festen Körpern findet eine Zurückwerfung der Wellen statt. Die Seilwelle z. B. wird reflektiert, sobald sie an dem Ende des Seiles angekommen ist und kann so die ganze Länge desselben mehrmals durchlaufen.

*) Auch die Ätherwellen, welche das Licht fortpflanzen, sind Transversalwellen (vgl. § 146).

Bem. Die Vorgänge bei allen anderen Wellenbewegungen sind ähnlicher Art, wie die an dem anschaulichen Beispiel der Wasserwellen und Seilwellen entwickelten. Ein sehr anschauliches Bild einer Wellenbewegung bietet auch ein wogendes Ährenfeld. Indem die einzelnen Ähren, vom Winde bewegt, sich senken und wieder heben, vollführen sie regelmäßige Schwingungen, welche mit dem Windstofs über das Feld hingeleiten und die dunklen und hellen Streifen (Wellenberge und Wellenthäler) veranlassen.

§ 89b. Fortpflanzung des Schalles in der Luft.

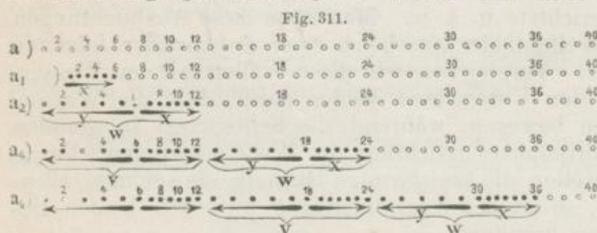
Luftwellen. Vermöge ihrer großen Elasticität ist die Luft zur Aufnahme und Übertragung der Schwingungen schallerregender Körper sehr geeignet. Dies wird auf überraschende Weise bestätigt durch die Erscheinungen der sogen. schallempfindlichen Flammen, Rauchsäulen und Wasserstrahlen.

***Versuch** mit einer etwa 60 cm hohen, flackernden Flamme (bei hohem Gasdruck) oder mit einer Flamme, die über einem Drahtnetz (nach Fig. 116) entzündet wird. Die Flamme wird schon durch einen sehr schwachen Schall (Knistern eines Papierblattes, leiser „sch“- oder „fs“-Laut) zum Zucken oder Erlöschen gebracht, wobei der Schall selbst auf gröfsere Entfernungen hin augenblicklich auf die Flamme einwirkt. Rauchsäulen und dünne Wasserstrahlen sind unter günstigen Umständen noch empfindlicher als freie Flammen.

Wie das Fortschreiten einer Welle auf der Wasseroberfläche von dem Fortfliefsen des Wassers verschieden ist, so beruht auch die Schallfortpflanzung in der Luft nicht auf einer Fortbewegung der Luft.

Bestätigung durch ***Versuche** mit dem Luftstofsapparat, einem cylindrischen Blechgefäfs, welches auf einer Seite durch eine elastische Haut (Pergamentpapier), auf der anderen Seite durch einen mit einem Loch versehenen Blechdeckel geschlossen ist. Füllt man das Gefäfs mit Rauch und schlägt gegen das Trommelfell, so treten Rauchringe aus der Öffnung im Deckel, welche sich merklich langsamer fortbewegen als der Schall. Die Einwirkung der Rauchringe auf eine in einigen Metern Entfernung befindliche Kerzenflamme zeigt den Stofs der fortbewegten Luft an.

Zur Veranschaulichung des bei der Schallfortpflanzung durch die Luft stattfindenden Vorganges kann Fig. 311 dienen. Man denke sich die einzelnen Luftteilchen als elastische



Wann eine elastische Kugel gegen eine Reihe von elastischen Kugeln stößt (Glaskugeln in einer wagerechten Rinne), so bleiben die mittleren in Ruhe, und nur die letzte rollt fort. Wie die elastischen Kugeln, so werden auch die Luftteilchen durch den Stofs zusammengedrückt und dehnen sich wieder aus, wobei sie den Druck auf die benachbarten übertragen.

Indem der vom Schallerreger auf die Luftteilchen ausgeübte Stofs sich auf die nächstfolgende Luftschicht fortpflanzt, entsteht eine Luftverdichtung (x in der Reihe a₁). Während nun die Teilchen der verdichteten Luftschicht ihre vorwärts gerichtete Bewegung auf die folgenden Teilchen übertragen, beginnen die zuerst gestossenen ihre Rückbewegung, wodurch eine Luftverdünnung (y in der Reihe a₂) entsteht. — Erfolgte nun kein zweiter Stofs, so würden die Teilchen der ersten Luftschicht nacheinander ihre ursprüngliche Lage wieder einnehmen und in Ruhe bleiben, während die Bewegung selbst von einer Luftschicht zur anderen fort-

schreiten würde. In allen Luftschichten würde nacheinander wie in der ersten Schicht Verdichtung und Verdünnung abwechseln (w in den Reihen a_2 , a_4 und a_6) und dann Ruhe eintreten. Erfolgen jedoch neue Stöße, so entstehen auch von neuem ebenso viele Luftverdichtungen und Luftverdünnungen, welche unmittelbar hinter den zuerst entstandenen hergehen, wenn die Stöße unmittelbar aufeinander folgen (v in den Reihen a_4 und a_6).

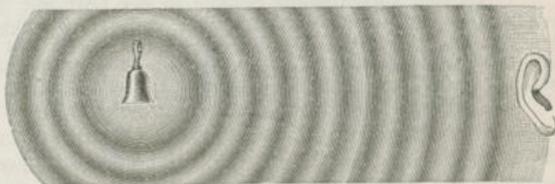
Die Luft pflanzt den Schall durch **Schwingungen** ihrer Teilchen fort. Die schwingenden Bewegungen bestehen in einem Wechsel von **Luftverdichtungen** und **Luftverdünnungen** und erfolgen vom Schallerreger aus in der Richtung der Schallstrahlen. Sie werden daher **Längsschwingungen** (**longitudinale Schwingungen**) genannt.

Eine einzelne verdichtete Luftschicht mit der sich anschließenden verdünnten Luftschicht bildet eine Schallwelle. Die Dicke beider Schichten zusammen ergibt die Wellenlänge.

Da die Luftwellen wie die Wasserwellen fortschreitende Wellen sind (die Bewegung schreitet während der Dauer einer einzelnen Schwingung um eine Wellenlänge fort), so gelten die in § 89 a entwickelten Gesetze auch für die Schallfortpflanzung in der Luft. Dagegen ist die Art der Bewegung der einzelnen Teilchen bei den Wasserwellen und bei den Schallwellen eine verschiedene, denn während die Wasserteilchen Kreise beschreiben, gehen die Luftteilchen geradlinig hin und her und zwar in der Fortpflanzungsrichtung, wodurch sich die Luftwellen auch wieder von den Seilwellen unterscheiden. Die Wasserwelle vereinigt gewissermaßen die Schwingungszustände der Seilwelle und die der Luftwelle.

Könnte man die Luft sichtbar machen, so würden die verdichteten und verdünnten Luftschichten als schnell sich vergrößernde Hohlkugeln erscheinen, deren Mittelpunkt der Schallerreger ist. In einer durch den Schallerreger gelegten Ebene würden die Luftschichten konzentrische Ringe bilden (Fig. 312). Je schneller der Schallerreger schwingt, um so mehr Ringe würden in derselben Zeit entstehen, um so schmaler würde daher jeder einzelne Ring sein müssen. Erfolgt in 1 Sek. etwa 340 Hin- und Herbewegungen, so würde jeder aus einer verdichteten und verdünnten Luftschicht bestehende Ring 1 m breit sein.

Fig. 312.



Übungsstoff. 1. Vgl. die Bewegung der den Schall fortplantenden Luft mit derjenigen des Schallerregers. — 2. Die Wellenbewegung des W. beruht auf der Schwere; auf welcher Eigenschaft der Luft beruht die Fortpflanzung des Schalles? — 3. Wv. Schallwellen entstehen in 5 Sek. durch eine tönende Stimmgabel, wenn diese in 1 Sek. 440 Schwingungen macht, und wie lang ist eine solche Welle? — 4. Vgl. die Schallwellen mit den Wasserwellen. — 5. Ein auf einer Wasserwelle schaukelnder K. wird vom Wellenberge eine kleine Strecke nach vorwärts, vom Wellenthale ebensoviel nach rückwärts bewegt. Welcher Schlufs läßt sich daraus ziehen hinsichtlich der Form der Bewegung? — 6. Vgl. die Schwingungsrichtung der Luftteilchen mit der Richtung, in welcher Luftwellen fortschreiten, indem sie den Schall fortpflanzen, und beide mit den entsprechenden Bewegungsrichtungen von Wasserwellen.

§ 90. Geschwindigkeit und Stärke des Schalles.

1. Geschwindigkeit des Schalles. Die Geschwindigkeit des Schalles in der atm. Luft ist durch zahlreiche Versuche möglichst genau bestimmt worden (§ 23), z. B. von Humboldt und Arago 1822 in der Nähe von Paris. — Zur Messung der Geschwindigkeit des Schalles im Wasser wurden 1827 am Genfer See Versuche angestellt; es wurde eine Glocke unter Wasser angeschlagen und an einem weit entfernten Punkte mittelst eines in den See getauchten langen Hörrohres beobachtet, wann der Schall ankam. Dabei ergab sich, daß das Wasser den Schall mit einer Geschwindigkeit von 1435 m fortpflanzt. — Um die Geschwindigkeit des Schalles im Eisen zu bestimmen, wurde an dem einen Ende einer gegen 1000 m langen eisernen Wasserleitungsröhre ein Schuß abgefeuert. Der Knall wurde dabei am anderen Ende zweimal gehört, und zwar ging dem durch die Luft in der Röhre fortgepflanzten Schalle der im Eisen fortgeleitete vorher, welcher denselben Weg in $\frac{1}{15}$ der Zeit zurückgelegt hatte.

Die Geschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Gasen und festen Körpern hat man auf indirektem Wege (durch Rechnung) bestimmt, da wegen der erforderlichen Länge des Schallweges eine direkte Bestimmung bei diesen Stoffen ausgeschlossen ist. In welcher Weise die Rechnung auszuführen ist, ergibt sich aus den Gesetzen über tönende Luftsäulen und schwingende Stäbe (§ 94).

Im Eisen ist die Geschwindigkeit des Schalles ungefähr 15mal, in Kupfer und Zink 11-, in Platin und Silber 8-, in Gold 6-, in Blei 4-, in Hölzern 10—18mal, in Glas 17-, in Wasser $4\frac{1}{2}$ mal so groß als in der Luft. In der Luft pflanzt sich der Schall in 1 Sek. bei 0° 332 mal, bei höheren Temperaturen ungefähr $\frac{1}{2}$ m für 10 C Temperaturzunahme schneller fort und zwar unabhängig vom Barometerstande, bei gleicher Temperatur also auf hohen Bergen ebenso schnell, als in Meereshöhe.

Daß sich verschiedene Schalle in der Luft mit der gleichen Geschwindigkeit fortpflanzen, geht schon daraus hervor, daß ein Musikstück aus einiger Entfernung ohne Störung der Harmonie gehört wird. *Starke und schwache Schalle, hohe und tiefe Töne haben im allgemeinen dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit.*

2. Stärke des Schalles. Ein Schall muß um so stärker gehört werden, je kräftiger die schwingende Luft auf unser Ohr einwirkt. Dies ist sowohl von der Wucht, mit welcher der Schallerreger die Luft erschüttert, als auch von der Dichtigkeit der Luft abhängig. Denn je größer die Masse des Schallerregers ist und je kräftiger die Ausschläge desselben sind, desto größer ist auch die Luftmasse, auf welche der Schallerreger unmittelbar einwirkt, und die Kraft, mit der sich die Schwingungen in der Luft fortpflanzen. Der Ton einer Turmglocke z. B. ist weit kräftiger als der einer ebenso tief klingenden Basssaite; bei beiden ist der Ton anfangs am stärksten und wird bis zum gänzlichen

Fig. 313.



Verklingen allmählich schwächer. Glocke wie Saite klingen um so stärker, je kräftiger der Schlag ist, welcher auf sie ausgeübt wird. Mit der Dichtigkeit der Luft aber wächst die Zahl der schwingenden Luftteilchen. In einer tief im Wasser hinabgelassenen Taucherglocke klingt jeder Schall verstärkt, in den höheren Luftschichten (Luftballon) geschwächt.

Versuch. Verdünnt man in einem Glasballon (Fig. 313) die Luft möglichst stark, so ist der Ton einer kleinen Glocke

im Ballon kaum noch hörbar; beim Eindringen von Luft wird derselbe wieder deutlicher.

Der Schall ist in der Luft um so stärker, 1) je größer die Masse und je schneller die schwingende Bewegung des Schallerregers, 2) je dichter die Luft ist, welche den Schall fortpflanzt. — Im luftleeren Raume kann der Schall sich nicht fortpflanzen.

In lockeren Körpern werden die Schallwellen mehr oder weniger geschwächt. Solche Körper pflanzen daher den Schall schlecht fort (§ 23). Dies erklärt sich daraus, daß bei jedem Übergange der Schallbewegung aus einem Mittel in ein solches von anderer Dichtigkeit zugleich eine Reflexion eintritt. Je öfter sich dies wiederholt, desto schwächer muß offenbar der Schall werden. — In der Luft pflanzt sich der Schall am stärksten fort, wenn die einzelnen Schichten derselben gleichmäßige Beschaffenheit haben; ungleiche Erwärmung verschiedener Luftschichten, wie sie am Tage durch die Sonnenstrahlen bewirkt wird, hat eine Schwächung des Schalles zur Folge, der sich daher im allgemeinen in der Nacht besser fortpflanzt, als am Tage.

Der Einfluß der Entfernung auf die Stärke des Schalles erklärt sich daraus, daß die Zahl der gleichzeitig zum Schwingen angeregten Teilchen in demselben Verhältnis wächst, in welchem die Oberflächen der Schallwellen an Größe zunehmen. Da nun die fortschreitenden Schallwellen immer größer werdende Hohlkugeln bilden, deren Halbmesser der Entfernung von der Schallquelle entsprechen, so kann der Schall z. B. in der doppelten Entfernung von der Schallquelle nur noch $\frac{1}{4}$, in der 3fachen nur $\frac{1}{9}$, in der 4fachen nur $\frac{1}{16}$ so stark sein als in der einfachen Entfernung.

In der freien Luft nimmt die Stärke des Schalles ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt.

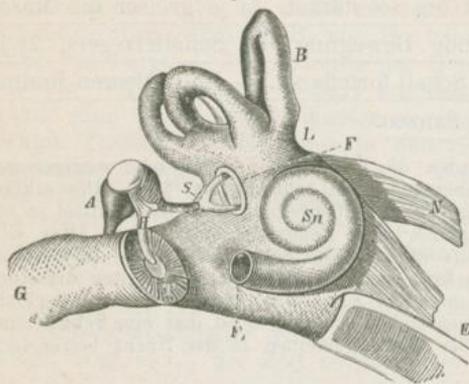
Um bei der Fortpflanzung des Schalles in der Luft eine derartige Abschwächung zu verhüten, hindert man die Schallwellen, sich gleichmäßig auszubreiten, indem man sie durch Röhren leitet (Schall- und Hörrohr, § 24).

Übungsstoff. 1. Auf das eine Ende einer Gasleitungsröhre von 1000 m Länge werde ein kräftiger Schlag ausgeübt; a. wievielmal wird man den Schlag am anderen Ende hören, b. wv. Zeit wird zwischen beiden Schallen verstreichen? — 2. In Stubenuhren werden statt der Glocken vielfach gewundene Streifen von Stahl angewandt, deren Ton sehr tief ist. Wie verhält sich bei gleicher Tiefe die Stärke eines solchen Tones zu dem Tone einer Glocke? — 3. Wie läßt sich mit einer Stimmgabel nachweisen, daß die Schwingungsweite einen wesentlichen Einfluß auf die Stärke des Schalles ausübt? — 4. Pistolenschüsse knallen auf hohen Bergen nicht so laut, als auf dem Meere; w.? — 5. Ein vom Fusse eines Berges ausgehender Schall klingt auf dem Gipfel des Berges stärker, als ein Schall, welcher oben entsteht und unten gehört wird. Wie mag sich dies erklären? — 6. Welche Stoffe eignen sich zur Füllung der Doppelwände von Fernsprehzellen? (§ 23.) — 7. Durch lange Wasserleitungsröhren kann man, wenn sie leer sind, sich flüsternd unterhalten. Erkläre dies. — 8. In Sälen klingen die Worte des Redners über geheizte Öfen hinweg leicht unverständlich. Erkl.! — 9. In den Äquatorgegenden steigt die Luft infolge der starken Erwärmung am Tage senkrecht auf; nachts findet diese Luftströmung nicht statt. Welchen Einfluß muß dies auf die Deutlichkeit der Schallfortpflanzung am Tage und in der Nacht ausüben?

§ 91. Das Gehörorgan des Menschen. Phonograph.

Das menschliche Ohr (Fig. 314) besteht aus drei Hauptteilen: dem *äußeren Ohre*, der *Paukenhöhle* und dem *Labyrinth*.*)

Fig. 314.



Das *äußere Ohr* wird durch die *Ohrmuschel* (links von G, in der Figur nicht mit angegeben) und den *Gehörgang* (G) gebildet; es dient zum Auffangen des Schalles. Der Gehörgang ist an seinem inneren Ende durch eine dünne elastische Haut (T), das *Trommelfell*, gegen den mittleren Teil des Ohres, die *Paukenhöhle*, abgeschlossen.

Von der *Paukenhöhle* führt ein Kanal (E), die sogen. *Eustachische Röhre*, in die *Schlundhöhle*, sodafs die in dieser enthaltene Luft ebenso wie die des äußeren Gehörganges mit der atm. Luft in Verbindung

steht. In der *Paukenhöhle* befindet sich ein kleiner Hebelapparat, welcher aus vier beweglich miteinander verbundenen Knöchelchen besteht, die ihrer Gestalt wegen als *Hammer* (H), *Ambos* (A), *Linse* (L) und *Steigbügel* (S) bezeichnet werden. Der Hammer ist mit seinem Stiele dem *Trommelfelle* angewachsen und ruht mit seinem verdickten Ende auf dem *Ambos*; dieser ist durch das *Linse* mit dem *Steigbügel* verbunden, welcher wiederum einer zarten Haut, die das sogen. *ovale Fenster* (F) verschließt, dicht aufliegt. Letzteres ist eine Öffnung in der Wand des *Labyrinthes*, der dritten Höhlung des Ohres. Neben dieser Öffnung befindet sich eine zweite, die ebenfalls durch eine zarte Haut überspannt ist, das *runde Fenster* (F₁).

Das *Labyrinth* enthält sehr verschieden gestaltete Hohlräume, welche mit einer wässrigen Flüssigkeit angefüllt sind und *Vorhof* (Raum zwischen S und L der Figur), *Schnecke* (Sn) und *halbkreisförmige Kanäle* (B) genannt werden. Der *Vorhof* ist der mittlere dieser drei Teile; in seiner Wand befindet sich das *ovale Fenster*, während das *runde Fenster* den Eingang in die *Schnecke* bildet. Diese selbst ist ein gewundener Gang und wird ihrer ganzen Länge nach von einer Scheidewand durchzogen, auf der äußerst feine Nervenfasern zu mehreren Tausenden wie *Klaviersaiten* nebeneinander ausgespannt liegen. Diese sogen. *Cortischen Fasern* werden als die *eigentlichen Organe zur Aufnahme der Schallreize* angesehen.

Die *Übertragung des Schalles auf die Fasern der Gehörnerven* findet in folgender Weise statt:

Die *Luftwellen*, welche durch die Schwingungen tönender Körper hervorgebracht werden, dringen in den äußeren Gehörgang ein und stoßen auf das *Trommelfell*. Dieses nimmt die Schwingungen auf und überträgt sie durch den *Hammer* auf die *Kette der Gehörknöchelchen* und teilweise auch auf die Luft in der *Paukenhöhle*, welche ihrerseits wieder auf die Haut des *runden Fensters* einwirkt. Da der *Steigbügel* an der Haut des *ovalen Fensters* befestigt ist, so muß jede Schwingung desselben sich dem *Labyrinthwasser* im *Vorhof* mitteilen, indem jeder Stoß des *ovalen Fensters* nach innen durch einen entsprechenden Stoß des *runden Fensters* nach außen sich ausgleicht. Die auf diese Weise übertragenen Schwingungen pflanzen sich im *Labyrinthwasser* bis in die *Bogengänge* und in die *Schnecke* fort und wirken als Reize auf die Ausbreitungen der *Gehörnerven*, wodurch die *Schallempfindungen* zustande kommen.

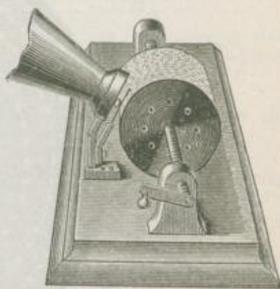
Grenzen der Gehörsempfindung. Die Fähigkeit des menschlichen Ohres, Schwingungen als Schall zu empfinden, liegt innerhalb

*) In Fig. 314 sind die Teile der *Paukenhöhle* und des *Labyrinthes* der Deutlichkeit wegen unverhältnismäßig groß dargestellt.

gewisser Grenzen, welche bei verschiedenen Menschen nicht übereinstimmen. Man hat gefunden, daß im allgemeinen kein Ton mehr hörbar ist, wenn die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde weniger als 16 oder mehr als 40 000 beträgt. Die Schwingungszahlen der musikalisch gut brauchbaren Töne liegen zwischen 40 und 4000.

Der Phonograph¹⁾ oder Lautschreiber (Fig. 315) ist eine Vorrichtung, welche die Laute der menschlichen Stimme und die Töne musikalischer Instrumente so aufzeichnet, daß sie annähernd genau wieder hervorgerufen werden können. Ein trichterförmiger Schallbecher ist an einem Ende durch eine Membran verschlossen und mit diesem Ende quer gegen eine drehbare Walze gerichtet. Die Walze ist mit einer wachsartigen Masse überzogen, in welche durch einen kleinen Stift, der alle Schwingungen der Membran mitmacht, sehr feine Eindrücke gezeichnet werden. Sobald Schallschwingungen aufgenommen werden sollen, wird die Walze gleichförmig gedreht, wobei sie sich zugleich in der Richtung ihrer Achse vor dem Stifte verschiebt. Bringt man dann die Walze in die anfängliche Stellung und läßt sie in gleicher Weise wie zuvor vor der Membran des Schallbeckers umlaufen, so wird der Stift, indem er über die vorher gemachten Eindrücke hinweggleitet, auch wieder in dieselben Schwingungen versetzt, welche er nun der Membran mitteilt. Durch die Membran wird die Luft zu Schwingungen veranlaßt und so werden die ursprünglichen Laute wieder erzeugt.

Fig. 315.



Der Phonograph wurde 1878 von Edison erfunden. Ursprünglich diente ein um eine Walze gewickeltes Stanniolblatt zur Aufnahme der Schallschwingungen; die Walze wurde mit der Hand gedreht. Bei dem vervollkommenen Apparate wird des gleichmäßigeren Ganges wegen zum Drehen der Walze ein elektrischer Motor angewandt.

Übungsstoff. 1. Inwiefern ist die Elasticität der betreffenden Teile des Ohres für die Übertragung des Schalles wichtig? — 2. Aggregatzustände der in den Höhlungen des Ohres mitwirkenden Teile? (Reihenfolge!) — 3. Das Trommelfell ist schräg gegen den Gehörgang gerichtet. Bei dieser Stellung kann eine größere Anzahl von der Wand des Gehörganges reflektierter Schallstrahlen rechtwinklig gegen das Trommelfell treffen. Inwiefern ist dies vorteilhaft? — 4. Der Stiel des Hammers ist genau in der Mitte des Trommelfelles angewachsen. Mech. V.? — 5. Welche Einrichtung bewirkt, daß die Paukenhöhle stets mit Luft von der Spannung der äußeren Luft gefüllt ist? — 6. Welchen Zweck hat es, wenn Kanoniere beim Abfeuern der Geschütze den Mund öffnen? — 7. Wenn das runde Fenster des Labyrinthes nicht vorhanden wäre, so würde eine Bewegung der darin enthaltenen Flüssigkeit nicht erfolgen können. Wie läßt sich dies aus einer Eigenschaft der Flgkn. schließen? — 8. Suche zu erklären, warum das Zerreißen des Trommelfelles noch nicht völlige Taubheit zur Folge hat. — 9. Vergl. die Vorgänge beim Hören mit der Wirkungsweise des Phonographen.

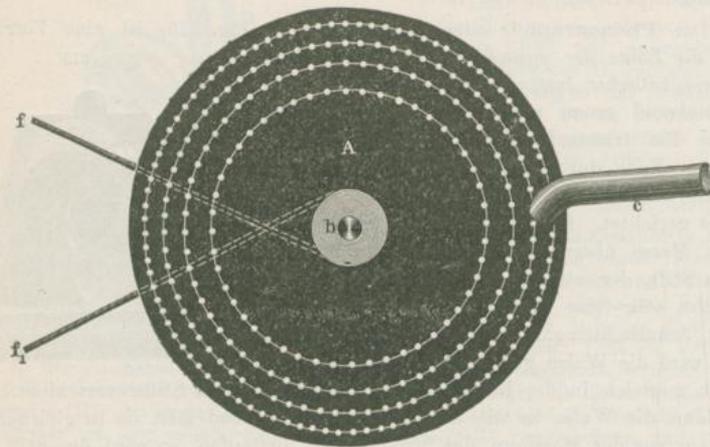
Von den Tönen und den wichtigsten Tonerregern.

§ 92. **Töne und Intervalle.** Um die Schwingungszahlen der Töne zu bestimmen, bedient man sich der sogen. **Sirene**, einer kreis-

¹⁾ φῶνος (phonos), Schall; γράφειν (graphiein), schreiben.

runden Scheibe (Fig. 316), welche in mehreren konzentrischen Reihen eine Anzahl gleichweit voneinander entfernter Löcher (z. B. 48, 60, 72 und

Fig. 316.

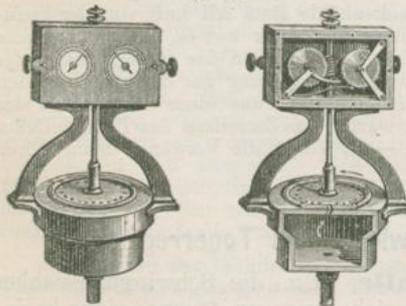


96 oder 48, 54, 60, 64, 72, 80, 90 und 96) enthält und um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse schnell gedreht werden kann.

Versuch. Während der Umdrehung wird gegen eine der Löcherreihen ein Luftstrom gerichtet. Dadurch entsteht ein Ton. Wird die Sirene mit wachsender Geschwindigkeit gedreht, so nimmt die Höhe des beim Anblasen einer Reihe entstehenden Tones zu. Bläst man alle Reihen von innen nach außen bei unveränderter Geschwindigkeit der Drehung an, so entstehen bestimmte Tonfolgen. Sämtliche Töne sind um so stärker, je kräftiger man bläst.

Erklärung: Dadurch, daß der Luftstrom mit kurzen Unterbrechungen durch die Löcher der Scheibe hindurchgeht, erhält die Luft unter der Scheibe rasch aufeinander folgende Stöße, sodafs sie in Schwingungen gerät. Dreht sich nun die Scheibe mit unveränderter Geschwindigkeit, so müssen diese Luftstöße in gleichen Unterbrechungen, also regelmäfsig aufeinander folgen. Je kräftiger der Luftstrom ist, desto stärker werden die Luftteilchen fortgestofsen, um so gröfser ist demnach ihre Schwingungsweite und um so stärker der Ton.

Fig. 317.



Zur genauen Bestimmung der Schwingungszahlen sind mit Zählwerk versehene Sirenen ganz besonders geeignet (Fig. 317). Die schief durchlöchernte Scheibe derselben wird durch den in einer Windlade erzeugten Luftstrom in Umdrehung versetzt und die Zahl der Umdrehungen auf einem Zifferblatte angezeigt. — Statt der Lochsirenen lassen sich (für hohe Töne) auch Zahnradsirenen anwenden, deren Zähne man gegen den Rand eines elastischen Kartenblattes schlagen läfst.

Da sich nachweisen läßt, daß die Höhe der Töne von der Natur und sonstigen Beschaffenheit der Schallerreger völlig unabhängig und nur durch die Anzahl der in einer Zeiteinheit entstehenden Schwingungen bedingt ist, so gilt der Satz:

Die Töne entstehen durch regelmässige Schwingungen. Die Höhe eines Tones nimmt mit der Anzahl der Schwingungen zu.

Bem. Während man bei der Pendelbewegung (§ 77) unter Schwingung stets eine einfache Schwingung versteht, pflegt man beim Schall eine Doppelschwingung (Hin- und Hergang) als Schwingung zu bezeichnen.

Das Verhältnis der Schwingungszahlen zweier Töne heißt in der Musik Intervall, der tiefere der beiden Töne Grundton.

Ordnet man die Töne nach den Schwingungszahlen, indem man dem Grundton die Schwingungszahl n giebt, so erhält man die diatonische Tonleiter. Dividiert man die zugehörigen Verhältniszahlen durcheinander, so ergeben sich die Intervalle von je zwei aufeinander folgenden Tönen.

Prime	Sekunde	Terz	Quarte	Quinte	Sexte	Septime	Oktave
c	d	e	f	g	a	h	c'
n	$\frac{9}{8}n$	$\frac{5}{4}n$	$\frac{4}{3}n$	$\frac{3}{2}n$	$\frac{5}{3}n$	$\frac{7}{4}n$	$2n$
	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{16}{15}$

Die Zusammenstellung zeigt, daß in der diatonischen Tonleiter nur drei Arten von Intervallen vorkommen; die Intervalle $\frac{9}{8}$ und $\frac{10}{9}$ heißen ganze Töne (großer und kleiner Ganzton), das Intervall $\frac{4}{3}$ wird halber Ton genannt. Die Töne haben in allen Oktaven dieselben Namen, deshalb werden die Oktaven durch einen Zusatz unterschieden; mit der tiefsten beginnend ist die Bezeichnung folgende: Subkontra- und Kontra-Oktave, große, kleine, eingestrichene, zweigestrichene Oktave u. s. w.

Für das eingestrichene  (= a oder a') der Stimmgabel beträgt

die Schwingungszahl nach der Pariser Stimmung 435. Dieser Ton (sogen. Kammerton) wird jetzt allgemein beim Stimmen musikalischer Instrumente zu Grunde gelegt und durch genaue Stimmgabeln bestimmt. Für physikalische Rechnungen werden die Schwingungszahlen häufig abgerundet.

Ist für einen beliebigen Ton die Schwingungszahl bekannt, so läßt sich berechnen: 1. Die Schwingungszahl eines jeden anderen Tones (siehe die Tabelle). Entsteht z. B. der Ton a' durch 435 Schwingungen, so entsteht c' durch $435 \cdot \frac{8}{9} = 261$ Schwingungen u. s. w. 2. Die Wellenlänge für die Fortpflanzung des Tones in der Luft. Bezeichnet n die Schwingungszahl, so ist (nach der Formel $c = n \cdot \lambda$) die Wellenlänge des Tones $\lambda = \frac{340}{n}$ m.

Übungsstoff. 1. Wie schnell muß die Sirene (Fig. 316) gedreht werden, damit durch Anblasen der innersten Löcherreihe nahezu der Stimmgabelton entsteht? — 2. Wie lassen sich mit Hilfe von Zahnrädern die Schwingungszahlen der Töne bestimmen? — 3. Wenn sich ein Beobachter dem Orte der Entstehung eines Tones oder umgekehrt die Schallquelle dem Beobachter schnell nähert, so nimmt die Höhe des Tones etwas zu, im entgegengesetzten Falle etwas ab (Pfeif einer sehr schnell an dem Beobachter vorbeifahrenden Lokomotive). Wie läßt sich dies erklären?*) — 4. Durch wieviele Schwingungen entsteht die erste, zweite und dritte

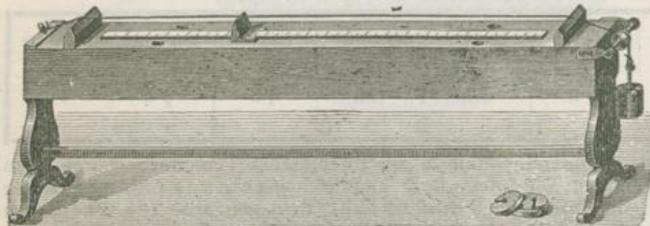
*) Dopplersches Princip. Über eine wichtige Anwendung desselben in der Lehre vom Lichte vergl. § 112.

über dem Stimmgabelton liegende Oktave? — 5. Durch wieviele Schwingungen entstehen dagegen die entsprechenden tiefer liegenden Oktaven? — 6. Länge der fortschreitenden Wellen dieser Töne? — 7. Wie groß ist die Wellenlänge des tiefsten und höchsten hörbaren Tones? — 8. Wie groß ist die Schwingungszahl der Terz, Quarte, Quinte und Sexte des Stimmgabeltones?

§ 93. Tönende Saiten. Obertöne. Schwingungen der Stäbe und Platten. Klaviere, Harfen, Geigen und andere Instrumente erzeugen die Töne durch das Schwingen von Saiten. Bei einzelnen dieser Instrumente, wie beim Klavier, sind die tiefer klingenden Saiten bedeutend länger und dicker und mit Metalldraht umspinnen; der Ton wird dadurch erhöht, daß man die Saiten stärker anspannt. Hiernach übt sowohl die Länge und Dicke, als auch die Spannung der Saiten einen Einfluss auf die Tonhöhe aus.

Zu genauen Untersuchungen über Saitenschwingungen dient ein

Fig. 318.



Monochord,¹⁾ d. h. ein dünnwandiger Kasten (Fig. 318), der mit einer Saite bespannt ist, deren schwingendem Teile durch einen verschiebbaren

Steg eine beliebige Länge und durch Gewichte eine genau meßbare Spannung gegeben werden kann.

Bem. Saiten können sowohl Quer- als Längsschwingungen ausführen; in folgendem sind nur die ersteren berücksichtigt. Die Schwingungen einer tönenden Saite dürfen mit den Querschwingungen einer Seilwelle nicht verwechselt werden, denn während bei den letzteren jedes folgende Teilchen seine Bewegung später beginnt (*fortschreitende Welle*), befinden sich bei den Saitenschwingungen alle Teilchen gleichzeitig in demselben Bewegungszustande. Schwingungen dieser Art werden **stehende Schwingungen** genannt. Alle tönenden Körper befinden sich in diesem Schwingungszustande.

Versuch a. 1) Läßt man die Saite eines Monochords zunächst als Ganzes und darauf bei unveränderter Spannung in Bruchteilen schwingen und zwar etwa in $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{3}$ ihrer ganzen Länge, so erhält man außer dem Grundtone noch Töne, deren Schwingungszahlen $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$ und 2 mal so groß sind als die Schwingungszahl des Grundtones, nämlich die Terz, Quinte und Oktave desselben. — 2) Dieselben Töne erhält man auch, wenn man bei unveränderter Länge der Saite die Spannung derselben nach den Quadraten der Zahlen $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und 2 vergrößert. — 3) Läßt man darauf zwei Saiten von ungleicher Stärke, aber von derselben Länge und demselben Stoffe bei gleicher Spannung schwingen, so giebt die dickere einen tieferen Ton. — 4) Ist der Stoff der Saiten unter sonst gleichen Bedingungen verschieden (Stahl- oder

¹⁾ *μόνος* (*mónos*), allein und *χορδή* (*chordē*), Saite.

Darmseite), so ist bei der aus dichterem Stoffe bestehenden Saite der Ton ebenfalls tiefer.

Die Zahl der Schwingungen einer Saite wächst bei unveränderter Spannung in demselben Verhältnis, in welchem man die Saite verkürzt, und bei unveränderter Länge im Verhältnis zur Quadratwurzel der Spannung. — Je dicker und dichter eine Saite ist, desto kleiner ist ihre Schwingungszahl, um so tiefer demnach auch ihr Ton.

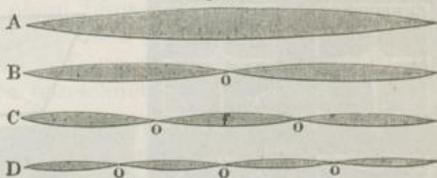
Genauere Untersuchungen lehren, daß die Schwingungszahlen (n und n_1) zweier Saiten sich gerade so verhalten, wie die Quadratwurzeln aus den spannenden Kräften (P und P_1) und umgekehrt wie die Längen (L und L_1), die Dicken (D und D_1) und die Quadratwurzeln aus den spec. Gewichten (S und S_1) der Saiten.

$$\text{In Zeichen: } n : n_1 = \frac{\sqrt{P}}{LD\sqrt{S}} : \frac{\sqrt{P_1}}{L_1 D_1 \sqrt{S_1}}$$

Wenn eine Saite als Ganzes schwingt, so gibt sie ihren tiefsten Ton, den Grundton, an.

Versuch b. Man lasse eine Saite abermals in Teilen schwingen (B, C, D, Fig. 319), indem man sie mit dem Finger oder einem Federbart nur leise berührt (in $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ oder $\frac{1}{4}$ ihrer Länge). Streicht man dann das abgegrenzte Stück der Saite an, so schwingt der andere Teil mit und zwar bei Berührung der Mitte der Saite als Ganzes, in den anderen Fällen in zwei oder drei Teilen, von denen jeder so lang ist wie der angestrichene Teil. (Nachweis durch Papierreiterchen). Je zwei benachbarte Teile bewegen sich in entgegengesetztem Sinne, der eine nach oben und der andere nach unten.

Fig. 319.



Die durch das Schwingen einer Saite in Teilen entstehenden weichen Töne heißen **Neben- oder Obertöne**, und zwar **harmonische Obertöne**, wenn ihre Schwingungszahlen ganze Vielfache von der Schwingungszahl des Grundtones sind.

Die Punkte, welche zwischen den schwingenden Teilen in Ruhe bleiben, werden **Knotenpunkte**, die Punkte größter Schwingungsweite **Schwingungsbäuche** genannt.

Eine Saite giebt nie ihren Grundton allein, sondern stets mit diesem zugleich eine Reihe von Obertönen an, wie sich durch sogen. Resonatoren nachweisen läßt (§ 95). Welche Obertöne mitklingen können, hängt davon ab, an welcher Stelle die Saite gestrichen oder angeschlagen wird. Man hört die Obertöne, welche den Ton voller (als Klang, § 95) erscheinen lassen, am leichtesten beim Ausklingen der Saite.

Musiker machen von den Obertönen der Streichinstrumente (Flageolet-tönen) bisweilen Gebrauch, um sehr hohe Töne hervorzurufen. Auf der Entstehung solcher Töne beruht auch die Musik der Äolsharfe, eines dünnwandigen Kastens, über welchen mehrere Saiten von ganz gleicher Stimmung gespannt sind. Im Luftzuge werden diese Saiten in Schwingungen versetzt. Jede Saite schwingt dabei als Ganzes und auch in Teilen. In derselben Weise kommt auch das Tönen von Telegraphendrähten zustande.

Elastische Stäbe können in Querschwingungen, Längsschwingungen und drehende Schwingungen versetzt werden. Die Tonhöhe hängt von dem Material, von der Länge und Dicke, der Art der Befestigung und Schwingung ab (Glasharmonika, Spieldose u. s. w.). Eine besonders wichtige Anwendung von den Transversalschwingungen elastischer Stäbe macht man bei der *Stimmgabel*. Beide Schenkel derselben schwingen gleichzeitig nach innen oder nach außen; die Knotenpunkte liegen in der Nähe der Biegung (Fig. 332), wie man durch Anlegen eines Fingers nachweisen kann. Aufser ihrem Grundton giebt die Stimmgabel in der Regel noch hohe, unharmonische Obertöne an.

Zur Verstärkung des Tones wird die Stimmgabel häufig auf einem Resonanzkasten befestigt (Fig. 331). Indem man an einer Zinke ein Stückchen Federbart befestigt und die tönende Gabel über eine berufste Glasscheibe zieht, lassen sich ihre Schwingungen in Form einer Wellenlinie darstellen.

Bei tönenden Platten läßt sich die Art der Schwingung leicht durch die sogen. Chladnischen Klangfiguren (Fig. 320) nachweisen. Dieselben entstehen,

Fig. 320.

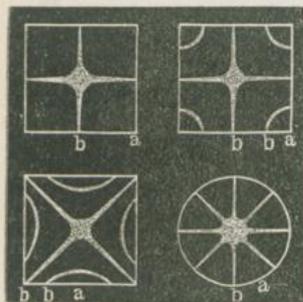
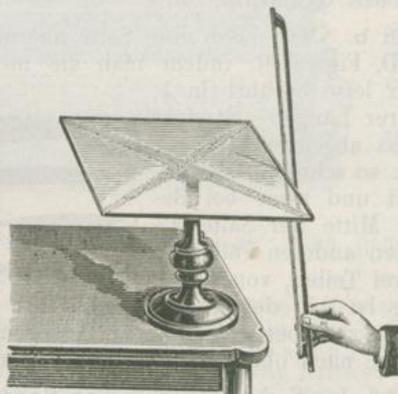


Fig. 321.



wenn man Scheiben von Metall oder Glas mit feinem Sande bestreut und darauf am Rande mit einem Geigenbogen (Fig. 321) kräftig anstreicht. Von den am stärksten schwingenden Stellen

bewegt sich dabei der Sand nach solchen, welche in Ruhe bleiben. Je tiefer der Ton ist, desto einfacher, je höher er ist, desto zusammengesetzter sind die Figuren.

Bem. In den Klangfiguren bezeichnet a die anzustreichende Stelle, b die mit dem Finger festzuhaltenden Stellen (Knotenlinien) der Scheiben.

Auch gekrümmte Scheiben (Glocken) schwingen beim Tönen stets in Teilen. Bringt man z. B. mit Wasser gefüllte Glasglocken durch einen Geigenbogen zum Tönen, so kräuselt sich das Wasser beim Grundton an vier, bei höheren Tönen an mehreren Stellen (Fig. 80). — Gespannte Membranen (Trommelfelle) schwingen ähnlich wie Platten. Zahlreiche Insekten besitzen Vorrichtungen, welche schwingenden Saiten oder Platten gleichen und durch Reiben zum Tönen gebracht werden (Heimchen und Heuschrecken z. B. erzeugen Töne durch Reiben der Flügeldecken und Hinterschenkel); viele Insekten bringen auch Flügeltöne hervor, während andere Insektentöne so hoch liegen, daß sie sich der Wahrnehmung durch das menschliche Ohr entziehen. — Die Erzeugung von Tönen durch schnelle Bewegung (Brummkreisel, Gewehrketten) oder durch ungleichmäßige Erwärmung eines Metallstabes (Trevellyans Wackler) und noch andere Ursachen ist leicht zu beobachten.

Übungsstoff. 1. Warum sind manche Darmsaiten mit dünnem Metalldraht umspinnen? — 2. Warum ändert sich die Stimmung der mit Darmsaiten

bespannten Instrumente, wenn der Feuchtigkeitsgehalt der Luft zunimmt? — 3. In welcher Weise muß die Stimmung eines mit Stahlsaiten bespannten Instrumentes sich mit der Temp. ändern? — 4. Angenommen, eine Stahlsaiten sei 30 cm lang und gebe den Ton c; wie lang muß dann die andere sein, wenn sie das folgende g geben soll? (§ 92.) — 5. Wievielmals so lang müßte die eine gespannt sein als die andere, wenn sie bei gleicher Länge die erste Oktave der anderen geben sollte? — 6. Die Spannungen zweier ganz gleichen Saiten verhalten sich wie 36:81; wie verhalten sich dann ihre Schwingungszahlen zu einander? — 7. Welchen Ton der Tonleiter giebt bei jenen Spannungen die stärker gespannte Saite an, wenn die schwächer gespannte den Ton c giebt? — 8. Wie müßten sich die Spannungen zu einander verhalten, wenn die stärker gespannte den Ton a geben sollte?

§ 94. Tönende Luftsäulen. Flöten, Trompeten, Orgeln und andere Instrumente geben Töne, wenn sie mit dem Munde oder mittelst eines Blasebalges angeblasen werden. Alle *Blasinstrumente* lassen sich auf die beiden Hauptformen der *Lippen-* und *Zungenpfeifen* zurückführen.

1. **Lippenpfeifen**, d. h. Röhren, die zum Anblasen mit einem sogen. Fufse (P) versehen sind, über welchem eine Querspalte liegt (Fig. 322 und 323). Letztere wird der Mund, die beiden ihn begrenzenden Platten (o und b) werden die Lippen der Pfeife genannt. Die obere Lippe ist zugeschärft. Je nachdem die Pfeife oben offen oder geschlossen (gedeckt) ist, wird sie als offene oder gedeckte (auch gedackte) Pfeife bezeichnet.

Versuch a. Wird in einer offenen Lippenpfeife nahe dem oberen Rande eine kleine Flamme angebracht (Fig. 325), so verkürzt und verlängert diese sich sehr schnell, während die Pfeife tönt. In einem um eine senkrechte Achse sich drehenden Spiegel (Fig. 324; a entspricht einem höheren, b einem tieferen Tone) erscheint die Flamme als ein regelmäßig gezackter Lichtstreifen. An dieser Erscheinung ändert sich auch nichts, wenn man die Pfeife mit der Hand umfaßt. — Hieraus geht hervor, daß die Luft in der Pfeife sich auf- und abbewegt. Genaueres lehrt folgender Versuch:

Versuch b. Ein rundes, mit einer dünnen Haut überspanntes Rähmchen wird, nachdem man die Haut mit feinem Sande bestreut hat, in eine tönende Lippenpfeife aus Glas hinabgelassen (Fig. 326); man nimmt eine wirbelnde Bewegung des Sandes

Fig. 322.

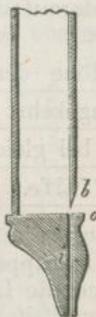


Fig. 323.

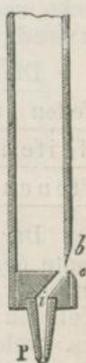


Fig. 325.

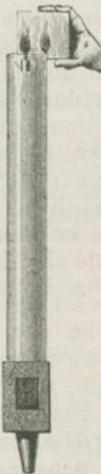
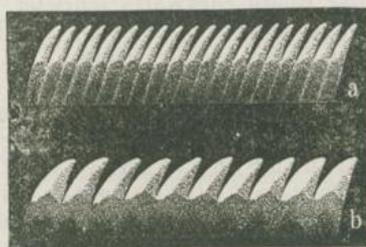


Fig. 326.



Fig. 324.



wahr, welche bei einer *offenen* Pfeife von oben bis etwa zur Mitte ab und von da bis zur Mundöffnung wieder zunimmt; bei einer *gedeckten* Pfeife dagegen nimmt die Bewegung von oben bis zur Mundöffnung zu, unter der Voraussetzung, daß die Pfeife ihren Grundton angiebt (durch stärkeres Anblasen entstehen leicht Obertöne.)

Der Ton einer Pfeife entsteht durch regelmäßige Schwingungen der eingeschlossenen Luftsäule; letztere schwingt bei Angabe des Grundtones der Pfeife in der gedeckten Pfeife als Ganzes, in der offenen Pfeife in 2 Teilen.

Versuch c. Bläst man mehrere offene Lippenpfeifen, deren Längen sich wie $1 : \frac{2}{3} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}$ verhalten, schwach an, so giebt die zweite die Quinte, die dritte die nächst höhere Oktave, die vierte die darauf folgende Oktave des Grundtones der ersten. (längsten) Pfeife an. Bedeckt man darauf die Pfeifen, so wird jeder Ton um eine Oktave erniedrigt.

Die Höhe der Grundtöne von Lippenpfeifen ist der Länge der Pfeifen umgekehrt proportional. Der Grundton einer gedeckten Pfeife ist bei gleicher Pfeifenlänge um eine Oktave tiefer als der einer offenen Pfeife.

Der Luftstrom wird beim Anblasen der Pfeife durch die scharfe Kante der Oberlippe in 2 Teile geteilt, von denen einer in die Pfeife eindringt und die Luft darin verdichtet. Diese Verdichtung schreitet als Welle in der Pfeife fort und tritt an der Öffnung in die umgebende Luft aus, welche sich im Vergleich zu der eingeschlossenen Luft als ein dünneres Mittel ansehen läßt. Hinter der austretenden Welle aber wird eine Luftverdünnung entstehen, welche wie eine reflektierte Seilwelle vom offenen Ende der Röhre rückwärts schreitet und der wieder eine Verdichtungswelle folgt, indem in den mit verdünnter Luft erfüllten Raum von aufsen aufs neue Luft zuströmt. Da nun diese die Pfeife rückwärts durchlaufenden Wellen mit den durch fortgesetztes Anblasen erzeugten zusammenkommen und beide Wellenzüge sich gegenseitig beeinflussen, so wird die in der Röhre eingeschlossene Luftsäule in einen solchen Schwingungszustand versetzt, daß alle Teilchen derselben gleichzeitig dieselbe Bewegung machen: es bilden sich **stehende Wellen**. Dadurch wird die Luftsäule (wie alle Körper, welche sich im Zustande stehender Schwingungen befinden, z. B. Saiten und Platten) ein selbsttönender Körper.

Da an den beiden Öffnungen der Pfeife die stärkste Hin- und Herbewegung der Luft stattfindet, so sind hier **Schwingungsbäuche**; in der Mitte der Pfeife (wenn dieselbe ihren Grundton giebt) kann keine Hin- und Herbewegung der Luft stattfinden, sondern nur ein Wechsel von Verdichtung und Verdünnung, diese Luftsicht bildet mithin einen **Schwingungsknoten**.

Da der Schwingungsknoten vom nächsten Schwingungsbauch um den vierten Teil einer ganzen Wellenlänge entfernt ist, wie sich am einfachsten aus der Betrachtung stehender Seilwellen ergibt, so entspricht die halbe Länge der offenen Pfeife dem vierten Teil einer Wellenlänge; die Wellenlänge selbst ist mithin gleich der doppelten Pfeifenlänge.

$$\text{In Zeichen:} \quad l = \frac{1}{2} \lambda; \quad \lambda = 2l.$$

Die Entstehung der Töne einer **gedeckten Pfeife** erklärt sich in derselben Weise nur mit dem Unterschiede, daß am geschlossenen Ende ein Schwingungsknoten liegen muß, da die Luftteilchen nicht entweichen können und demnach ein Schwingungsbauch sich hier nicht bilden kann. Ein solcher entsteht nur an der Mundöffnung der Pfeife und somit entspricht die Pfeifenlänge dem Abstand von Schwingungsbauch zu Schwingungsknoten oder einer Viertelwellenlänge.

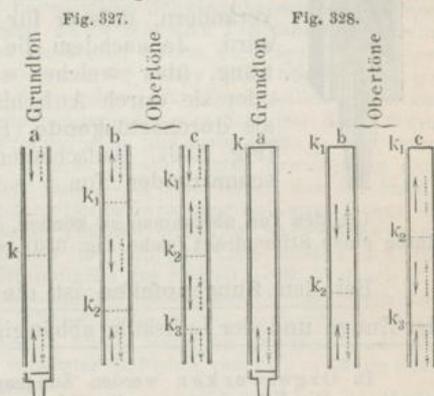
$$\text{Es ist demnach:} \quad l = \frac{1}{4} \lambda; \quad \lambda = 4l.$$

Fig. 327 und 328 stellt die Luftbewegung in Pfeifen dar und zwar sowohl für den Grundton, als auch für Obertöne. Bei Angabe von *Obertönen* entstehen mehrere Knoten und zwar in der offenen Pfeife (Fig. 327) beim 1. Oberton in $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{2}$ der Länge, beim 2. Oberton in $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ und $\frac{4}{3}$ der Länge; in der gedeckten Pfeife (Fig. 328) beim 1. Oberton in $\frac{1}{2}$ der Länge, beim 2. Oberton 2 Knoten in $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$ der Länge. Zwischen den Knoten bewegt sich die Luft in der Richtung der Pfeile hin und her.

Das Vorhandensein eines Schwingungsknotens läßt sich außer der in Versuch b beschriebenen Weise durch die manometrischen Flammen von König nachweisen: Die Wand einer Holzpfeife wird an den entsprechenden Stellen durchbohrt und jede Durchbohrung mit einer Kapsel überdeckt, deren Wand einen kleinen Gasbrenner enthält. Leitet man dann beim Tönen der Pfeife Leuchtgas in die Kapseln, so zuckt nur die am Schwingungsknoten befindliche Flamme heftig, was sich im rotierenden Spiegel durch ein gezacktes Flammenbild (siehe Fig. 324) zu erkennen giebt. Zu demselben Zwecke lassen sich auch die Kundtschen Staubfiguren verwenden. Eine ziemlich lange und an beiden Enden verschlossene Glasröhre wird durch kräftiges Reiben zum Tönen gebracht, nachdem man ein leichtes Pulver, etwa Bärlappsaamen, gleichmäßig darin verteilt hat. Beim Tönen ordnet sich der Staub durch das Schwingen der eingeschlossenen Luft so, daß man die Knoten und Bäuche deutlich daran erkennen kann. (Das Glas macht hierbei Längsschwingungen.)

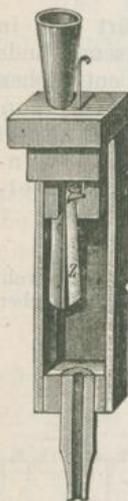
Die Luftsäule in einer beiderseits offenen Röhre kann auch durch eine Gasflamme, die nahe der unteren Öffnung in der Röhre brennt, zum Tönen gebracht werden (singende Flamme oder Gasharmonika).

Die Schwingungsgesetze tönender Luftsäulen ermöglichen eine einfache Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, indem man mittelst einer Sirene die Schwingungszahl des Grundtones einer gedeckten Pfeife ermittelt und die Formel $c = n\lambda$ (§ 89a) anwendet. Wird die Pfeife mit irgend einem Gase, z. B. mit Kohlensäure, angeblasen, so läßt sich auf dieselbe Weise die Schallgeschwindigkeit in diesem Gase finden. Auch zur Bestimmung der Schallgeschw. in flüssigen



und festen Körpern läßt sich dieses Verfahren anwenden, indem man Stäbe oder Flüssigkeitssäulen in Längsschwingungen versetzt und so zum Tönen bringt. Je nachdem man einen Metallstab z. B. in der Mitte oder am Ende festhält und mit einem beharzten Läppchen der Länge nach streicht, bildet sich in der Mitte oder am Ende ein Schwingungsknoten, der Stab verhält sich also wie die Luftsäule in einer offenen oder in einer gedeckten Pfeife und demnach finden die Formeln $\lambda = 2l$ oder $\lambda = 4l$ Anwendung.

Fig. 330.



2. Zungenpfeifen.

Bei den Zungenpfeifen entstehen die Töne dadurch, daß ein Luftstrom durch eine Öffnung hindurchgeht und ähnlich wie bei der Sirene regelmäßig unterbrochen wird. Letzteres geschieht durch schwingende Platten oder Zungen (Fig. 329). Eine Zungenpfeife (Fig. 330) besteht aus einem *Fusse*, welcher die Zunge (z) enthält, und einem *Schallbecher*. Dieser dient zur Verstärkung des Tones, sowie dazu, den an Obertönen reichen und dadurch scharfen Ton des Zungenwerkes durch das Mitschwingen der eingeschlossenen Luftsäule so zu verändern, daß er für die Zwecke der Musik geeigneter wird. Je nachdem die Zunge einer Pfeife durch die Öffnung, über welcher sie angebracht ist, hindurchschlägt oder sie durch Aufschlagen verdeckt, bezeichnet man sie als **durchschlagende** (Fig. 329) oder **aufschlagende Zunge** (Fig. 330). Aufschlagende Zungen erzeugen einen rauhen, schnarrenden Ton.

Fig. 329.



Um den Ton abstimmen zu können, läßt sich der schwingende Teil der Zunge durch einen Stimmdraht (siehe Fig. 330) verkürzen und verlängern.

Bei den Zungenpfeifen ist die Tonhöhe von den Schwingungen der Zunge und der Luftsäule abhängig.

In Orgelwerken werden Zungenpfeifen neben den Lippenpfeifen angewandt. — Die Klarinette, die Oboe, das Fagott und die Schalmei enthalten Zungen, welche aus Holz oder Rohr geschnitzt sind. Bei diesen Instrumenten hängt die Höhe des Tones jedoch nicht wie bei den Zungenpfeifen der Orgel wesentlich von der Zunge, sondern fast allein von der schwingenden Luftsäule ab, welche sich zur Erzeugung verschiedener Töne durch Öffnen und Schließen von Klappen oder Löchern verkürzen und verlängern läßt. Bei Waldhörnern, Trompeten und Posaunen werden die schwingenden Platten durch die in das Mundstück geprefsten Lippen der Bläser gebildet, die Höhe und Tiefe der Töne kann dabei durch die Stärke des Anblasens, durch zeitweiliges Verschließen der trichterförmigen Öffnung oder auch durch Verlängerung oder Verkürzung des Rohres bewirkt werden. Obgleich diese Instrumente (namentlich das Waldhorn) aus gewundenen Röhren bestehen, so geben sie doch dieselben Töne, welche gerade Röhren von der gleichen Länge geben würden.

Das **Stimmorgan des Menschen** ist eine Zungenpfeife mit zwei häutigen (membranösen) Zungen, den Stimmbändern. Dieselben sind zwischen den Knorpeln des Kehlkopfes am obern Ende der Luftröhre ausgespannt und verschließen diese bis auf eine schmale Spalte, die Stimmritze.

Durch das Schwingen der Stimmbandränder entsteht ein Ton, dessen Höhe von der Beschaffenheit und Spannung der Stimmbänder, dessen Klang aber wesentlich von der Größe und Gestalt der Mundhöhle abhängt. Der Luftstrom, welcher die Stimmbänder in Schwingungen versetzt, entsteht dadurch, daß die Luft aus den beiden Lungen, welche sich ausdehnen und wieder zusammenziehen, durch Luftröhre und Kehlkopf gepreßt wird. Die Lungen lassen sich daher mit zwei Blasebälgen vergleichen, während die Luftröhre den Fuß und der Mund den Schallbecher einer Zungenpfeife darstellen.

Der tiefste Ton, welchen Männerstimmen noch zu singen vermögen, hat 60, der höchste kaum 600 Schwingungen in 1 Sekunde; der höchste Ton einer Frauenstimme hat ungefähr 1600 Schwingungen.

Übungsstoff. 1. Welche musikalischen Instrumente (Kinderspielzeuge) sind Lippenpfeifen und welche sind Zungenpfeifen? Wie verändert man den Ton derselben? — 2. Für das tiefste sogen. Subkontra-C würde eine offene Pfeife 10 m, für das höchste sogen. 5-gestrichene d eine gedeckte Pfeife 2 cm lang sein müssen. Welche Länge müssen sie haben, wenn man erstere deckt und letztere öffnet? — 3. Wv. ganze und halbe Wellen können nach Fig. 327 und 328 a. in einer offenen, b. in einer geschlossenen Pfeife entstehen? — 4. Drücke alles in halben Wellen aus und vergleiche die Zahlen mit der Anzahl der halben Wellen des Grundtones beider Pfeifen. — 5. Bei welcher Pfeife bilden hiernach die Schwingungszahlen der Obertöne nur ungerade, bei welcher dagegen auch gerade Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones? (Letzteres ist der Grund, warum derartige Pfeifen einen volleren Klang haben.) — 6. Wie läßt sich aus der Länge einer offenen oder gedeckten Lippenpfeife die Länge der fortschreitenden Luftwelle desselben Tones und (mit Benutzung der Zahl für die Fortpflanzungsgeschw. des Schalles) die Schwingungszahl des Tones berechnen? (Erfahrungsgemäß nur dann genau genug, wenn die Pfeife nicht sehr weit ist und ihre Wände parallel sind. Erweiterung nach oben erhöht den Ton, Verengung vertieft ihn.) — 7. Wie ferner aus der Schallgeschw. und der durch eine Sirene bestimmten Schwingungszahl eines Tones die Länge der offenen Pfeife, für welche dieser Ton der Grundton ist? (Erfahrungsgemäß muß die Pfeife soviel kürzer sein, als ihre doppelte Tiefe beträgt, d. h. der doppelte Abstand des Mundes von der Hinterfläche der Pfeife.) — 8. Welchen Ton giebt eine 80 cm lange offene Orgelpfeife, wenn sie mit Wasserstoff angeblasen wird und die Schallgeschw. in diesem Gase 3,8 mal so groß ist als in der Luft? — 9. Wie groß ist die Geschw. des Schalles im Stahl, wenn ein an einem Ende eingeklemmter und in Längsschwingungen versetzter Stahlstab von 2,75 m Länge einen Ton angiebt, welcher dem c⁴ nahe kommt?

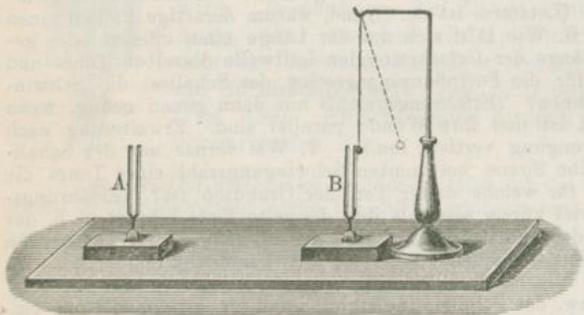
§ 95. Resonanz und Mittönen. Klangfarbe. Interferenz. Die Tonverstärkung, welche eintritt, wenn man eine tönende Stimmgabel mit ihrem Fuße auf eine Tischplatte stellt, hat ihre Ursache darin, daß die Platte die Schwingungen der Stimmgabel mitmacht, sodafs weit mehr Luftteilchen zugleich in schwingende Bewegung versetzt werden als durch die Stimmgabel allein. In gleicher Weise wirken die Resonanzböden der Klaviere, sowie die Resonanzkasten der Saiteninstrumente. Während die Saiten derselben die Luft durchschneiden, ohne sie stark zu erschüttern, wird durch das Mitschwingen der mit ihnen verbundenen Platten und der von dem Kasten eingeschlossenen Luft eine größere Luftmasse in Bewegung gesetzt und dadurch dem Tone die erforderliche Kraft und Fülle gegeben. Ein selbständiges Tönen des mitschwingenden Körpers findet dabei nicht statt. Ohne eine solche Tonverstärkung würden feste Tonerreger von geringer Ausdehnung für die Zwecke der Musik unbrauchbar sein.

Ist ein Körper vielfacher Schwingungen fähig, so können durch ihn verschiedene an sich schwache Töne dadurch sehr verstärkt werden, daß der Tonerreger den Körper zum Mitschwingen anregt: **Resonanz.**¹⁾

Gewisse Erscheinungen (Klirren der Fenster beim Abfeuern großer Geschütze, bei heftigen Donnerschlägen u. s. w.) beweisen, daß auch durch die Wellenzüge, welche den Schall in der Luft fortpflanzen, Körper in schwingende Bewegung versetzt werden können. In gewissen Fällen kann auf diese Weise sogar ein selbändiges Tönen des mitschwingenden Körpers erfolgen, wie sich bei Saiteninstrumenten wahrnehmen läßt, wenn in ihrer Nähe starke Töne hervorgerufen werden. So hört man z. B. in einem geöffneten Klavier gewisse Saiten deutlich erklingen, wenn man einen Ton kräftig in das Instrument hineinsingt. Sehr auffällige Erscheinungen dieser Art zeigen folgende Versuche.

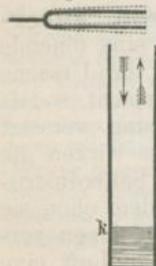
Versuch a. Werden 2 Stimmgabeln, welche auf kleinen, dünnwandigen Holzkästen (Fig. 331) von passender Größe befestigt sind und

Fig. 331.



genau denselben Ton angeben, so aufgestellt, daß die offenen Enden der Kästen einander zugewandt sind, so tönt die eine Stimmgabel nicht nur mit, wenn die andere zum kräftigen Tönen gebracht wird, sondern sie setzt das Tönen auch noch fort, wenn letztere zu tönen aufhört. Erniedrigt man darauf den Ton einer der beiden Gabeln durch eine geringe Belastung eines Zinkens (Ankleben von Wachs), so tritt das Mitschwingen nicht ein.

Fig. 332.



Versuch b. Hält man eine tönende Stimmgabel über die Mündung eines ungefähr 25 cm hohen Glaszylinders (Fig. 332), so klingt der Ton bedeutend kräftiger, wenn man bis zu einer gewissen Höhe Wasser in den Cylinder gießt. Diese Erscheinung erklärt sich daraus, daß die im Cylinder enthaltene Luft in ebensolche Schwingungen versetzt wird, wie die Luftsäule in einer gedeckten Lippenpfeife, welche den Stimmgabelton als ihren Grundton angiebt.

Durch Rechnung ergibt sich für die zum Mitschwingen bei dem Stimmgabelton a' erforderliche Luftsäule eine Länge von $\frac{34000}{4.435}$ cm. Da stehende Wellen der Pfeifen

¹⁾ resonare, zurückschallen.

sich noch ein wenig über die Pfeife hinaus fortsetzen, so eignet sich für den Versuch besser eine etwas kürzere Luftsäule.

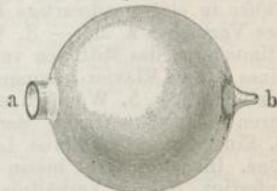
Durch die Schwingungen der den Schall fortpflanzenden Luft kann ein Körper, dessen Eigenton mit dem des Tonerregers übereinstimmt, zum selbständigen Tönen angeregt werden: Mittönen.

Bekanntlich klingt ein und derselbe Ton ganz verschieden, je nachdem er gesungen, auf einer Flöte oder einer Trompete geblasen, auf einer Geige angestrichen, auf einem Klavier angeschlagen wird u. s. w. Man nennt diesen von der Beschaffenheit des Tonerregers abhängigen Charakter des Tones Klangfarbe. Dieselbe erklärt sich nach sehr sorgfältigen Untersuchungen im wesentlichen daraus, daß die gewöhnlichen Tonerreger außer dem deutlich hörbaren Grundtone noch Neben- oder Obertöne erklingen lassen, welche je nach der Beschaffenheit der Tonerreger sehr verschieden sein können.

Die Klangfarbe der Töne ist durch die Zahl, Höhe und Stärke der dem Grundtone beigemischten Obertöne bestimmt.

Die Obertöne eines einfach erscheinenden Klanges lassen sich gesondert wahrnehmen, wenn man die von Helmholtz erfundenen Resonatoren zu Hilfe nimmt. Die Resonatoren sind Hohlkugeln (Fig. 333), oder cylindrische Röhren von Glas, Blech oder Pappe mit zwei einander gegenüberliegenden Öffnungen, von denen die eine (gewöhnlich mit einem kleinen Ansatzrohr versehene) an das Ohr gehalten wird. Jeder Resonator ist auf einen gewissen Ton abgestimmt; durch das Mitschwingen der im Resonator enthaltenen Luftsäule wird dieser Ton derart verstärkt, daß er aus einem Klange herausgehört werden kann. Zum Nachweis mehrerer Obertöne sind daher auch ebenso viele Resonatoren erforderlich.

Fig. 333.



Ein Ton klingt weich, wenn er einfach ist oder wenigstens keine höheren Obertöne enthält, z. B. der durch Mittönen einer Luftsäule verstärkte Stimmgabelton, der Laut U der menschlichen Stimme. Fast frei von Obertönen ist auch der Ton einer Flöte oder einer ziemlich weiten, gedeckten Lippenpfeife. Der Klang eines Tones ist scharf (z. B. der Trompetenton), wenn demselben zahlreiche hohe, unharmonische Obertöne beigemischt sind. Sind die Obertöne im Verhältnis zum Grundtone sehr schwach, so klingt der Ton hohl (z. B. Fagott oder Oboe) u. s. w. Auch die Verschiedenheiten im Klange der menschlichen Stimme haben in der Beimischung von Obertönen ihren Grund; letztere werden durch die Größe und Gestalt der Mundhöhle bedingt. Außer den jedem Menschen eigentümlichen Obertönen können durch besondere Mundstellungen einem jeden Tone noch gewisse Obertöne beigemischt sein. Hieraus erklärt sich die Entstehung der Vokalklänge, während die Konsonanten Geräusche verschiedener Art sind.

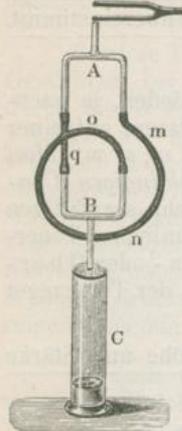
Die Entstehung der Klangfarbe wurde von Helmholtz (1858) zuerst nachgewiesen (Klanganalyse).

Interferenz der Schallwellen. Wie bei durcheinander laufenden Zügen kreisförmiger Wasserwellen Wellenberg und Wellenthal sowohl Verstärkungen als Abschwächungen erfahren können (§ 89), so können auch bei Luftwellenzügen, wenn sie sich kreuzen, die Verdichtungen und Verdünnungen sich sowohl verstärken als vernichten. Dies läßt sich durch folgenden Versuch nachweisen.

Versuch c. Zwei etwa 10 mm weite gabelförmige Glasröhren (A und B, Fig. 334, folg. Seite) verbinde man in der angegebenen Weise durch Gummischläuche

miteinander, von denen der eine (mno) nahezu 40 cm (halbe Länge der fortschreitenden Welle des gewöhnlichen Stimmgabeltones) länger ist als der andere. Die eine der beiden Ansatzröhren halte man in einen nach Fig. 332 auf denselben Ton abgestimmten Resonator. Hält man dann eine kräftig angeschlagene Stimmgabel mit dem äußersten Ende eines ihrer Zinken möglichst nahe vor die Mündung der anderen Ansatzröhre, so hört man den Ton nur dann deutlich, wenn man den längeren Verbindungsschlauch (mno) fest zusammendrückt.

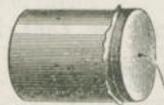
Fig. 334.



Dies erklärt sich daraus, daß die Strecke AmnoB um eine halbe Wellenlänge des Stimmgabeltones größer ist als die Strecke AqB, sodafs die Luftschwingungen, wenn sie sich auf beiden Wegen fortpflanzen, bei B in entgegengesetzten Schwingungszuständen ankommen, d. h. so, daß Verdichtung und Verdünnung zusammentreffen.

Übungsstoff. 1. Wenn man die elastischen, aus Tierblase oder Kautschuk bestehenden Böden zweier cylindrischen Blechbüchsen durch eine lange Schnur verbindet (Fig. 335), so erhält man einen Apparat, durch welchen ein in die Höhlung des einen Cylinders gesprochenes Wort vor dem anderen Cylinder auf weite Entfernung hin deutlich hörbar ist. Erkl.!

Fig. 335.



2. Wie kann ein frei aufgehängter K. von ziemlich großem Gew. durch schwache Stöße in eine pendelartige Bewegung versetzt werden? Wende dies auf die Ersch. des Versuches a an. — 3. Wie erklärt es sich, daß eine geringe Belastung der Stimmgabel das Mittönen verhindern kann? — 4. Wie erklärt sich das Zurückhalten eines in ein Klavier gesungenen Tones und warum können dabei nicht alle Saiten erklingen? — 5. Wodurch erhalten die Töne der Stimmbänder des Kehlkopfes erst ihren Klang? Vorteil der Veränderlichkeit dieses natürlichen Resonators! — 6. Eingeschlossene dünne Luftsäulen erzeugen beim Schwingen leicht hohe Obertöne. Inwiefern liegt hierin der Grund dafür, daß man z. B. Trompeten aus Röhren anfertigt, die im Verhältnis zu ihrer Länge ziemlich dünn sind, bei Orgelpfeifen dagegen im allgemeinen entgegengesetzt verfährt? — 7. Inwiefern ist der Längenunterschied der beiden Schläuche (Fig. 334) von der Wellenlänge des Stimmgabeltones abhängig? — 8. Wv. Wellenzüge müssen in der Luft durch das Tönen einer Stimmgabel entstehen? — 9. Wie erklärt sich somit die Ersch., daß der Ton einer senkrecht vor das Ohr gehaltenen Stimmgabel abwechselnd viermal stärker und viermal schwächer wird, wenn man die Gabel einmal um ihre Längsachse dreht?

IV. Abschnitt.

Die Lehre vom Lichte.

(O p t i k.)

(I. Lehrstufe, §§ 25—29.)

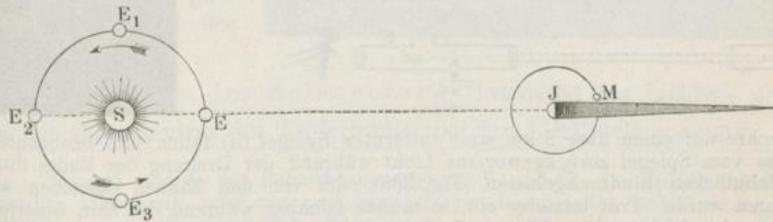
A. Geschwindigkeit und Stärke des Lichtes.

§ 96. Geschwindigkeit des Lichtes. Schon Galilei nahm an, daß das Licht eine bestimmte Zeit nötig habe, um sich durch

den Raum fortzupflanzen und versuchte die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen. Aber erst im Jahre 1676 gelang es dem Astronomen Römer, die Lichtgeschwindigkeit aus den Verfinsterungen eines Jupitermondes zu berechnen. Zur Beobachtung diente der dem Jupiter am nächsten stehende Mond, da er eine sehr kurze Umlaufszeit hat (annähernd nur $42\frac{1}{2}$ Stunden) und bei jedem Umlaufe durch den Kernschatten des Jupiters geht.

Fig. 336 stelle die Lage dar, welche die Sonne (S), die Erde (E), der Ju-

Fig. 336.



piter (J) und dessen erster Mond (M) im Weltraume gegeneinander einnehmen; die beiden Kreise mögen die Bahnen andeuten, in denen die Erde sich um die Sonne und der Mond sich um den Jupiter bewegt. Bewegt sich die Erde von E oder E₂ aus weiter, so bleiben die Entfernungen der Erde vom Jupiter offenbar zunächst unverändert, sie nehmen jedoch (von E aus) um so schneller zu und (von E₂) um so schneller ab, je mehr sich die Erde den Stellungen E₁ und E₃ nähert. Bewegt sich die Erde dagegen von E₁ aus weiter, so wird ihre Entfernung vom Jupiter während eines Mondumlaufes um 600 000 Meilen größer. Zwischen zwei aufeinander folgenden Austritten verstrichen nun in diesem Falle beinahe 15 Sek. mehr, als die Berechnung ergeben hatte. Das Licht hatte demnach 15 Sek. nötig, um die Erde einzuholen und einen um 600 000 Meilen größeren Weg zurückzulegen. Hiermit stimmte das Ergebnis der von E₃ aus angestellten Beobachtungen überein, denn der Austritt erfolgte hier, wo die Erde sich während eines Mondumlaufes dem Jupiter um 600 000 Meilen näherte, 15 Sek. früher, als bei gleichbleibender Entfernung der Erde vom Jupiter.

Das Licht legt in einer Sekunde einen Weg von ungefähr 40 000 geographischen Meilen oder 300 000 km zurück.

Nahezu dieselbe Geschwindigkeit fand 1728 der Astronom Bradley aus der von ihm entdeckten **Aberration des Lichtes** der Fixsterne. Diese Erscheinung besteht darin, daß die Fixsterne zu verschiedenen Zeiten des Jahres nicht immer genau an derselben Stelle im Weltraume gesehen werden, sondern in derjenigen Richtung von ihrem wirklichen Orte ein wenig verschoben erscheinen, in welcher die Erde sich im Augenblicke der Beobachtung um die Sonne bewegt. Bradley erklärte dies daraus, daß das Licht, indem es durch das zur Beobachtung dienende Fernrohr hindurchgeht, von der Achse des Rohres um einen sehr kleinen Winkel abgelenkt wird, ähnlich wie die Spur eines Regentropfens, welcher auf der Fensterscheibe eines im Fahren begriffenen Eisenbahnwagens hinabgleitet, von der senkrechten Richtung abweicht, sodafs also nach genauer Einstellung des Fernrohres die in der Richtung der Achse desselben hindurchgehenden Strahlen ebenso wenig ihren wirklichen Ausgangspunkt erkennen lassen, wie ein in der Richtung der Spur des Tropfens nach den Wolken sehendes Auge den richtigen Ausgangspunkt des Tropfens erblickt. Wie sich nun aus der Fahrgeschwindigkeit und dem Winkel, welchen die Spur des Tropfens mit der Senkrechten bildet, die Länge des in 1 Sek. vom Tropfen in Wirklichkeit zurückgelegten senkrechten Weges bestimmen lassen würde, wenn der Tropfen durch die Berührung mit der

Scheibe nicht im Fallen aufgehalten wäre, so läßt sich auch aus der Bahngeschwindigkeit der Erde und dem Aberrationswinkel (scheinbare Verschiebung des Gestirns aus seiner wirklichen mittleren Stellung) die Geschwindigkeit des Lichtes berechnen.†)

Die Geschwindigkeit des Lichtes irdischer Lichtquellen ist zuerst 1849 von Fizeau gemessen worden. Durch die Zahnücken eines sehr schnell umlaufenden Zahnrades (R, Fig. 337) liefs man Lichtstrahlen mit Hilfe zweier

Fig. 337.

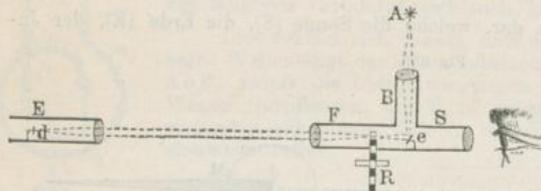


Fig. 338.



Fernrohre auf einen über 8 km weit entfernten Spiegel (d) fallen und beobachtete, ob das vom Spiegel zurückgeworfene Licht während der Drehung des Rades durch die Zahnücken hindurchgelassen (Fig. 338) oder von den Zähnen desselben aufgefangen wurde. Trat letzteres ein, so mußte offenbar während der Zeit, innerhalb welcher das Licht seinen Weg zum Spiegel hin und wieder zurück durchlaufen hatte, an die Stelle der Lücke, durch die der Strahl hindurchgegangen war, ein Zahn getreten sein. (Die von der Lichtquelle A ausgehenden Strahlen traten seitlich in ein Fernrohr ein und wurden durch einen unter 45° gegen die Achse des Fernrohres FS geneigten Spiegel reflektiert.) Dadurch, daß man nun aus der Zahl der Zähne und der Umdrehungsgeschwindigkeit des Rades den außerordentlich kleinen Zeitraum berechnete, welcher verfloß, während ein Zahn des Rades an die Stelle der benachbarten Lücke trat, und daß man den während dieser Zeit vom Lichte zurückgelegten Weg genau bestimmte, ergab sich nahezu die obige Zahl für die Geschwindigkeit des Lichtes.

Übungsstoff. 1. Führe bekannte Erschn. an, aus denen geschlossen werden kann, daß das Licht sich viel schneller fortpflanzt als der Schall. — 2. An einem 10 km entfernten Orte werde eine Kanone abgefeuert. Wie lange dauert es, bis man das Pulver aufblitzen sieht und wie lange, bis der Knall gehört werden kann? — 3. Wievielmal so groß ist die Geschw. des Lichtes als die des Schalles? — 4. Wv. Zeit hat das Licht nötig, um vom Monde und von der Sonne zu uns zu gelangen, wenn der Mond 50 000 Meilen, die Sonne 20 Millionen Meilen von der Erde entfernt ist? — 5. Fizeau beobachtete bei der Bestimmung der Geschw. des Lichtes, daß ein Zahnrad mit 720 Zähnen und 720 Lücken von Zahnbreite in 1 Sek. 12,6 Umläufe machen mußte, damit das Licht zum ersten Male verschwand. a. Der wievielte Teil von 1 Sek. war demnach nötig, damit an Stelle einer Lücke der nächstfolgende Zahn trat? b. Welchen Weg hatte das zurückgekehrte Licht zu durchlaufen, wenn der Spiegel d vom Fernrohre 8633 m entfernt war? c. Welcher Weg ergab sich hieraus für 1 Sek.? d. Um wv. war diese Geschw. gegen die oben angegebene zu groß? (Spätere Versuche führten zu der oben angegebenen Zahl.)

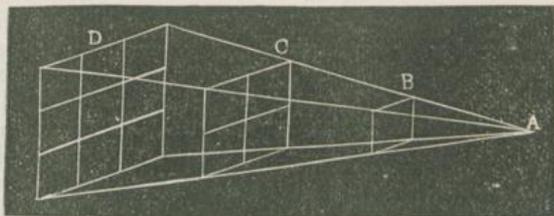
§ 97. Stärke der Beleuchtung. Photometer. Die tägliche Erfahrung lehrt, daß die Stärke der Beleuchtung mit der Entfernung von der Lichtquelle abnimmt. Dies ist durch Fig. 339

†) Die Bahngeschw. der Erde ist 29,5 km, der Aberrationswinkel 20,45 Bogensekunden, die Geschw. des Lichtes also gleich $\frac{29,5}{\tan 20,45'} = \frac{29,5}{0,0001} = 295\,000$ km. Für die Astronomie ist die Aberration des Lichtes auch insofern von Wichtigkeit, als sie einen direkten Beweis für die Bewegung der Erde um die Sonne bietet.

veranschaulicht, nach welcher die von A ausgehende Lichtmenge in-

folge der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes in der 2- oder 3fachen Entfernung sich auf eine 4- oder 9mal so große Fläche verteilt und demnach auf gleichgroße Flächen nur der vierte oder neunte Teil des Lichtes fällt.

Fig. 339.



Die Stärke der Beleuchtung (Intensität des Lichtes) nimmt ab, wie das Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle zunimmt.

Wenn J und J_1 die Beleuchtungsstärken, E und E_1 die Entfernungen von derselben Lichtquelle oder von zwei gleichstarken Lichtquellen bedeuten, so ist in Zeichen:

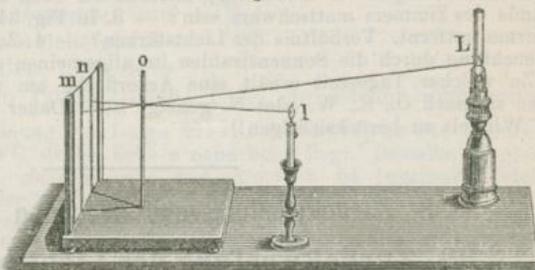
$$J : J_1 = E_1^2 : E^2.$$

Bem. Die Ausdrücke Stärke der Beleuchtung und Helligkeit dürfen nicht ohne weiteres für einander gesetzt werden. Sind die beleuchteten Flächen von verschiedener Beschaffenheit (etwa verschieden gefärbt oder die eine glatt und die andere rauh), so kann ihre Helligkeit bei gleichem Abstände von derselben Lichtquelle verschieden sein.

Instrumente, welche unter Anwendung des genannten Gesetzes dazu dienen, die Stärke zweier Lichtquellen miteinander zu vergleichen, werden Photometer oder Lichtmesser genannt.

Bei dem Photometer von Rumford (Fig. 340) werden die zu ver-

Fig. 340.



gleichenden Flammen so aufgestellt, dass die beiden Schatten m und n des Stabes o nebeneinander fallen und auf dem hellen Schirm gleichdunkel erscheinen. Da sie dann von den ihnen nicht zugehörigen Flammen gleichstark beleuchtet werden, so empfängt

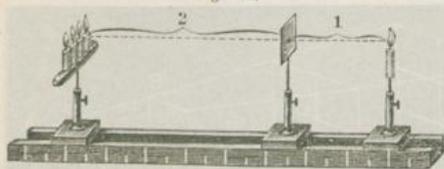
auch die Fläche des Schirmes von beiden Lichtquellen gleiche Lichtmengen, und die Lichtstärken beider Flammen verhalten sich dann wie die Quadrate ihrer Entfernungen vom Schirme.

Die richtige Beurteilung wird hierbei dadurch erschwert, dass die Schatten meist verschieden gefärbt erscheinen.

Um die Lichtstärken verschiedener Lichtquellen in Zahlen ausdrücken zu können, bezieht man sie auf die Lichtstärke von sogen. Normalkerzen (in Deutschland z. B. auf das Licht einer 2 cm dicken Paraffinkerze, deren Flamme 5 cm hoch ist).

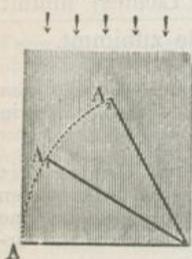
Das Photometer von Bunsen (Fig. 341) besteht aus einem Papierschirm, in dessen Mitte sich ein mit flüssigem Stearin gemachter Fettfleck befindet. Der Fleck erscheint hell oder dunkel, je nachdem der Schirm stärker von der Rückseite oder von der Vorderseite beleuchtet wird; er verschwindet, wenn die Beleuchtung von beiden Seiten gleichstark ist. Man verschiebt demnach auf der mit einer Centimeterteilung versehenen Latte den Schirm so lange, bis der Fleck verschwindet, und vergleicht dann die Entfernung beider Lichtquellen.

Fig. 341.



Bem. Durch Versuche mit dem Bunsenschen Photometer läßt sich das oben angeführte Gesetz über die Beleuchtungsstärke leicht bestätigen.

Fig. 342.



Die Beleuchtungsstärke ist nicht nur von der Entfernung der Lichtquelle, sondern auch von der Größe des Neigungswinkels der beleuchteten Fläche abhängig, d. h. des Winkels, den die Strahlen mit der Fläche bilden (Fig. 342). Je mehr sich dieser Winkel einem rechten nähert, desto mehr Strahlen fallen auf die Fläche.

Die Beleuchtungsstärke ist um so geringer, je schräger die Lichtstrahlen auffallen.†)

Übungsstoff. 1. Wievielmals so stark wird die Beleuchtung einer Fläche, wenn man die Lichtquelle von 2 m auf 0,5 m nähert? — 2. Warum müssen bei genauen Messungen der Lichtstärke mittelst der oben dargestellten Photometer die Wände des Zimmers mattschwarz sein? — 3. In Fig. 340 sei L 36, l nur 8 cm vom Schirme entfernt. Verhältnis der Lichtstärken? — 4. Zu welcher Tageszeit muß die Beleuchtung durch die Sonnenstrahlen im allgemeinen am stärksten sein, u. w.? — 5. Zu welcher Tageszeit erhält eine Ackerfläche am meisten Licht und Wärme, wenn sie nach O., S., W. oder N. geneigt ist? (Dauer der Bestrahlung und Größe des Winkels zu berücksichtigen!)

B. Zurückwerfung und Brechung des Lichtes.

§ 98. Zurückwerfung des Lichtes durch gekrümmte Spiegel. In § 27 und 29 berücksichtigten wir nur solche Erscheinungen, welche entstehen, wenn die vom Lichte getroffenen Grenzflächen zweier Körper eben sind oder doch als ebene Flächen angesehen werden können. Von dieser Beschränkung sehen wir jetzt ab und dehnen unsere Betrachtung auf die einfachste gekrümmte Fläche, die Kugelfläche, aus.

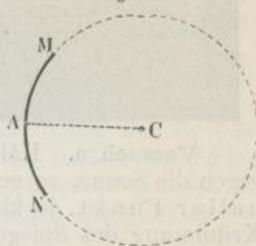
†) Trigonometrisch: $J_1 : J_2 = \sin w_1 : \sin w_2$, wenn w_1 und w_2 die Neigungswinkel der Flächen A_1B und A_2B bezeichnen. (Man denke sich parallel zu AB Ebenen durch A_1 und A_2 gelegt, welche von denselben Strahlen getroffen werden, wie A_1B und A_2B).

Spiegel, deren Flächen so gekrümmt sind, daß sie Abschnitte von Kugeln bilden, heißen **Kugelspiegel** oder **sphärische Spiegel**.¹⁾ Je nachdem die spiegelnde Fläche hohl oder erhaben ist, unterscheidet man **Hohl- oder Konkavspiegel**²⁾ und **erhabene oder Konvexspiegel**.³⁾

Bei den Kugelspiegeln wird das Einfallslot eines Strahles von dem Kugelhalbmesser gebildet, der den Einfallspunkt des Strahles trifft. (Kugelradien stehen senkrecht auf den in ihren Endpunkten an die Kugelfläche gelegten Berührungsebenen.) — Außerdem sind folgende besondere Bezeichnungen von Wichtigkeit:

Die von der Mitte eines Kugelspiegels bis zum Mittelpunkte der Kugel gehende gerade Linie heißt **Achse des Spiegels** (AC, Fig. 343). Der Mittelpunkt der Kugel wird **Krümmungsmittelpunkt** des Spiegels genannt. Strahlen, welche durch diesen Punkt gehen, heißen **Hauptstrahlen**.

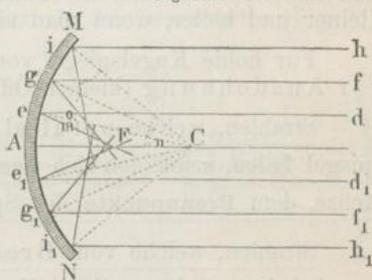
Fig. 343.



1. Hohle Kugelspiegel (sphärische Konkavspiegel).

Der Spiegel MN (Fig. 344) werde parallel zur Achse AC von Sonnenstrahlen getroffen. Um zunächst die Richtung der zurückgeworfenen Strahlen zu bestimmen, denken wir uns nach den Fußpunkten der Strahlen die Einfallslote Ce, Cg u. s. w. gezogen. Da die Achse AC des Spiegels mit jedem der Strahlen und seinem Einfallslot in derselben Ebene liegt, so müssen alle Strahlen nach ihrer Zurückwerfung die Achse schneiden, und zwar müssen diejenigen, welche gleichweit von der Achse einfallen, nach ihrer Zurückwerfung denselben Punkt treffen. F sei ein solcher Schnittpunkt.

Fig. 344.



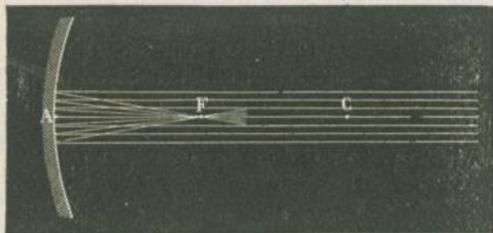
Zur genaueren Bestimmung der Lage dieser Schnittpunkte betrachten wir zunächst das Dreieck eFC, dessen Ecke e nahe bei A liegt. Dasselbe ist gleichschenkelig, denn $\sphericalangle m = n$, da $\sphericalangle m = o$ und $\sphericalangle o = n$ ist (warum?); folglich $FC = Fe$. Je näher nun der Strahl de der Achse des Spiegels liegt, um so mehr wird Fe nahezu = FA, um so mehr also auch $FC = FA$ oder F die Mitte zwischen A und C. Dies gilt für alle ebenso nahe einfallenden Strahlen. Je weiter aber der Strahl von der Achse AC entfernt liegt, desto mehr muß $Fe > FA$ werden. Denn stellt man sich vor, der Strahl de ginge allmählich in die Lage fg und hi über, so würden immer neue gleichschenkelige Dreiecke entstehen und zwar mit unveränderter Basis, aber mit wachsenden Basiswinkeln, also auch mit wachsenden Schenkeln. Die Spitzen dieser Dreiecke, d. h. die Punkte, in denen die zurückgeworfenen Strahlen die Achse schneiden, müssen somit dem Spiegel um so näher rücken, je weiter der einfallende Strahl von der Achse entfernt ist.

Bei schwächerer Krümmung des Spiegels würde das Wachsen der Winkel wegen der größeren Entfernung des Punktes C offenbar langsamer erfolgen. Die Schnittpunkte der Strahlen würden dann mehr in der Mitte von AC

1) σφαίρα (sphaira), die Kugel; 2) concavus, hohl; 3) convexus, gewölbt.

zusammenfallen und bei kleiner Öffnung des Spiegels nur einen einzigen Punkt bilden (Fig. 345). Gingen die Strahlen umgekehrt von F aus, so würde der zunächst

Fig. 345.



entstehende Strahlenkegel durch den Spiegel entgegengesetzt in ein Bündel paralleler Strahlen umgewandelt werden. Welchen Einfluss müßte es auf die Richtung der Strahlen ausüben, wenn man den leuchtenden Punkt dem Spiegel näherte oder vom Spiegel etwa bis zum Krümmungsmittelpunkte entfernte? — Bestätigung:

Versuch a. Hält man einen hohlen Kugelspiegel (nach Fig. 345) gegen die Sonne, so erscheint mitten vor dem Spiegel ein um so kleinerer heller Punkt, je kleiner die spiegelnde Fläche und je schwächer die Krümmung des Spiegels ist. Papier entzündet sich an dieser Stelle. — Von demselben Punkte aus entsteht im verdunkelten Zimmer durch das Licht einer kleinen, aber möglichst hellen Kerzenflamme auf einem weißen Papierschirm ein heller Schein, der die Gestalt und auch nahezu die Größe des Spiegels hat. Dieser Lichtschein wird größer, und matter, wenn man die Flamme dem Spiegel mehr nähert, dagegen kleiner und heller, wenn man sie weiter vom Spiegel entfernt.

Für hohle Kugelspiegel von flacher Krümmung und geringer Ausdehnung (kleiner Öffnung) gelten somit folgende Sätze:

Strahlen, welche parallel zur Achse auf einen hohlen Kugelspiegel fallen, schneiden sich nach ihrer Zurückwerfung in der Mitte der Achse, dem Brennpunkte des Spiegels.

Strahlen, welche vom Brennpunkte ausgehen, werden parallel zur Achse zurückgeworfen. Hauptstrahlen fallen in sich selbst zurück.

Entstehung von Bildern durch Hohlspiegel.

AB (Fig. 346—348) sei ein Gegenstand, von dem Licht auf den Spiegel MN fällt; C sei der Krümmungsmittelpunkt, F der Brennpunkt (FS also die Brennweite) des Spiegels. Es soll untersucht werden, 1) ob und was für ein Bild entsteht, 2) welchen Einfluss es auf das Bild ausübt, wenn der Gegenstand seine Lage gegen den Spiegel ändert. — Zu diesem Zwecke genügt es, den Verlauf je zweier Strahlen zu verfolgen, welche von den Endpunkten des Gegenstandes ausgehen, und von denen der eine Strahl den Krümmungsmittelpunkt des Spiegels trifft, der andere mit der Achse des Spiegels parallel läuft. Ersterer wird in sich selbst, letzterer nach dem Brennpunkte zurückgeworfen.

1. Der Gegenstand befinde sich **innerhalb der Brennweite** (Fig. 346, folg. Seite). In diesem Falle *divergieren* die von demselben Punkte ausgehenden Strahlen nach ihrer Reflexion und rufen daher den Ein-

druck hervor, als kämen sie von den hinter den Spiegel gelegenen Punkten a und b , in denen ihre Verlängerungen sich schneiden. Wegen dieser scheinbaren Vereinigung der von denselben Punkten ausgehenden Strahlen kann somit wie beim ebenen Spiegel nur ein *aufrechtes, scheinbares Bild* entstehen.

Denkt man sich nun, der Gegenstand AB würde dem Spiegel in der Richtung der Achse etwa bis A_1B_1 genähert, so behält das parallele Strahlenpaar seine Lage bei, während die mit den Krümmungsradien zusammenfallenden Strahlen sich der Achse nähern. Dadurch rücken die scheinbaren Schnittpunkte der Strahlen dem Spiegel näher (a_1 und b_1) und das Bild wird kleiner. Was würde eintreten, wenn man den Gegenstand weiter vom Spiegel entfernte? Vergleich mit einem ebenen Spiegel! — Bestätigung durch den Versuch.

Befindet sich ein Gegenstand innerhalb der Brennweite eines hohlen Kugelspiegels, so erblickt ein vor dem Spiegel befindliches Auge hinter demselben ein aufrechtes, scheinbares Bild.

2. Der Gegenstand befinde sich aufserhalb der Brennweite (Fig. 347 und 348). Die von A und B ausgehenden Strahlen, von denen 1 und 3 wie vorhin mit der Achse parallel laufen, 2 und 4 durch C gehen, *konvergieren* nach ihrer Reflexion, und da sie sich in a und b schneiden, so entsteht ein *umgekehrtes, wirkliches Bild*.

Wie würde die Lage des Bildes sich ändern, wenn man den Gegenstand (Fig. 347)

1. in der Richtung der Achse vom Brennpunkte weiter entfernte, 2. dem Brennpunkte mehr näherte? — Erkläre Fig. 348 und beurteile, welchen Einfluss es auf die Lage des Bildes ausübt, wenn der Gegenstand seine Lage gegen den Spiegel ändert. Bestätigung durch den Versuch.

Von einem aufserhalb der Brennweite befindlichen Gegenstande entsteht vor einem hohlen Kugelspiegel ein umgekehrtes, wirkliches Bild.

Fig. 346.

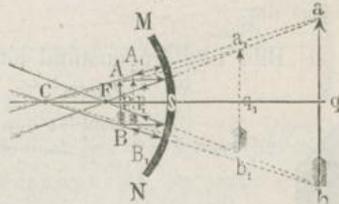


Fig. 347.

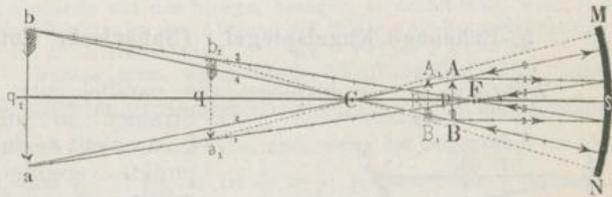
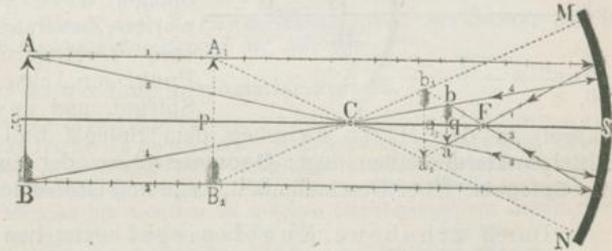


Fig. 348.



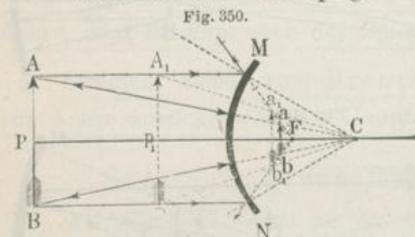
In Fig. 349 bezeichnet s einen Schirm, welcher die direkte Beleuchtung des Schirmes S verhindert; l , m und n deuten die Anordnung der Teile an für den Fall, daß die Flamme im Krümmungsmittelpunkte des Spiegels sich befindet; l stellt die Flamme, n den Spiegel und m den Schirm zum Auffangen des Bildes dar.



Die Undeutlichkeit der Bilder, welche bei einem hohlen Kugelspiegel dadurch entsteht, daß die in der Nähe des Spiegelrandes einfallenden Strahlen die Achse in kürzerem Abstände vom Spiegel schneiden als die mittleren Strahlen, wird **sphärische Abweichung** genannt. Spiegel mit parabolischer Krümmung sind frei von diesem Fehler (Blendscheiben in den Laternen der Lokomotiven, siehe ferner Fig. 378.)

b. Erhabene Kugelspiegel. (Sphärische Konkavspiegel.)

Während ein Hohlspiegel die parallel zur Achse auffallenden Strahlen so zurückwirft, daß sie konvergieren und sich im Brennpunkte vereinigen (*Sammelspiegel*), werden sie von einem erhabenen Spiegel divergierend zurückgeworfen (*Zerstreuungsspiegel*, Fig. 350).



Ihre Verlängerungen treffen einen Punkt der Achse, welcher hinter dem Spiegel, und zwar (wie beim Hohlspiegel) in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Krümmungsmittelpunkte desselben liegt: **Geometrischer** oder **negativer Brennpunkt des Spiegels**. Über Beschaffenheit, Lage und Größe der Bilder ergibt sich:

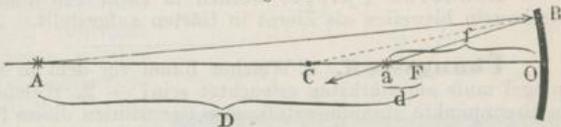
Durch erhabene Kugelspiegel entstehen nur aufrechte, scheinbare Bilder (zwischen dem negativen Brennpunkte und dem Spiegel). Diese Bilder werden um so kleiner, je weiter man Gegenstand und Spiegel voneinander entfernt.

In den Figuren 346, 347, 348 und 350 ist $\triangle abc \sim \triangle ABC$. Hieraus folgt für die Größe der Bilder die Proportion: $ab : AB = e : E$, wenn e und E diejenigen Strecken der verlängerten Achse bezeichnen, um welche Bild und Gegenstand vom Krümmungsmittelpunkte C entfernt sind. (Proportion in Worten?)

Ableitung eines allgemeinen Gesetzes für Kugelspiegel mit kleiner Öffnung.

Hohlspiegel: In Fig. 351 stelle AB einen von A ausgehenden, Ba den vom Spiegel zurückgeworfenen Strahl dar, C sei der Krümmungsmittelpunkt und F der Brennpunkt. Es ist $AC : aC = AB : aB$ (da der Dreieckswinkel ABA durch BC halbiert ist), oder wenn B der Achse sehr nahe liegt, annähernd $AC : aC = AO : ao$. Diese Abstände lassen sich sowohl auf den Brennpunkt als auch auf den Spiegel beziehen:

Fig. 351.



1. Bezieht man die Abstände auf den Brennpunkt, so erhält man für obige Proportion nach der Figur $(D-f) : (f-d) = (D+f) : (f+d)$ oder nach Umstellung der Glieder $(D+f) : (D-f) = (f+d) : (f-d)$, woraus durch Addition und Subtraktion der Glieder desselben Verhältnisses folgt:

$$2D : 2f = 2f : 2d \quad \text{oder} \quad D : f = f : d, \text{ also } Dd = f^2 \quad \text{oder} \quad d = \frac{f^2}{D}.$$

Hiernach läßt sich die Lage des Bildes berechnen. — In Worten:

Die Brennweite ist das geometrische Mittel zwischen den Entfernungen des Brennpunktes vom Gegenstande und vom Bilde.

In der Gleichung $d = \frac{f^2}{D}$ hat man zur Berechnung der Bildweite für den

Fall, daß der Gegenstand (vom Brennpunkte aus) nicht an der vom Spiegel abgewandten Seite, sondern an der dem Spiegel zugewandten Seite (also innerhalb der Brennweite) liegt, D negativ zu setzen; dadurch wird auch d negativ, das Bild liegt also mit dem Gegenstande vom Brennpunkte aus in derselben Richtung.

2. Werden die Abstände auf den Spiegel bezogen, so erhält man, wenn E den Abstand des leuchtenden Punktes, e den Abstand des Bildes vom Spiegel bezeichnet: $(E-2f) : (2f-e) = E : e$. Hieraus folgt: $Ee - 2ef = 2Ef - Ee$ oder $2Ee = 2ef + 2ef$, woraus man, wenn durch $2Eef$ dividiert wird, erhält:

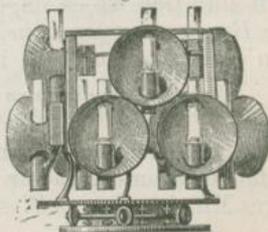
$\frac{1}{f} = \frac{1}{E} + \frac{1}{e}$. In dieser Gleichung (Reciprokenformel) ergibt sich bei der Berechnung der Bildweite für subjektive Bilder e negativ, denn wenn der Gegenstand innerhalb der Brennweite liegt, also $E < f$, so ist $\frac{1}{E} > \frac{1}{f}$; folglich muß $\frac{1}{e}$ subtrahiert werden. — Für Konkavspiegel ist außerdem f negativ zu setzen. In Worten:

Der reciproke Wert der Brennweite ist gleich der Summe aus den reciproken Werten der Gegenstandsweite und der Bildweite.

Anwendung gekrümmter Spiegel.

Von den gekrümmten Spiegeln werden im praktischen Leben namentlich *Hohlspiegel* angewandt. Man benutzt sie entweder, um den nahe vor einem Lichte befindlichen Raum möglichst stark zu erleuchten (Blendscheiben in Laternen, Flurlampen u. s. w.), oder um das Licht einer Lichtquelle auf eine möglichst weite Strecke hin sichtbar zu machen (Hohlspiegel vor Lokomotiven, auf Leuchttürmen u. s. w.). Im ersteren Falle ist die Regelmäßigkeit der Krümmung weniger wichtig, im letzteren sind nur parabolische Krümmungen brauchbar, da die von der Lichtquelle ausgehenden Strahlen sämtlich parallel zurückgeworfen werden müssen. Auf Leuchttürmen wurden seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts feststehende und drehbare Spiegelapparate (Fig. 352) angewandt, welche jedoch in neuester Zeit immer mehr durch noch vollkommene Apparate ersetzt worden sind (§ 101, Fig. 368). Der sicheren Unterscheidung wegen

Fig. 352.



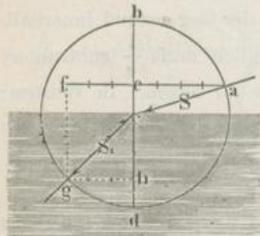
erfolgt die Drehung der Apparate mit verschiedener Geschwindigkeit (Blick- oder Blinkfeuer; in Fig. 352 stehen neun Lampen in drei Gruppen, sodafs je drei ihr Licht immer gleichzeitig nach derselben Richtung senden).

Erhabene Spiegel werden in Form von hohlen, inwendig geschwärzten Glaskugeln bisweilen als Zierat in Gärten aufgestellt.

Übungsstoff. 1. Welcher Raum vor dem in Fig. 344 dargestellten Hohlspiegel mufs am stärksten erleuchtet sein? — 2. Welche Gestalt haben die beiden im Brennpunkte zusammenstofsenden Grenzlinien dieses Raumes in einer durch letzteren in der Richtung der Achse des Spiegels gelegten Ebene? (Brennlinie.) — 3. Welche Gestalt hat demnach die den Raum begrenzende Fläche? (Brennfläche, sichtbar in aufsteigendem dichten Rauche, auch in Obertassen, welche halb mit Wasser gefüllt sind, das durch Milch ein wenig getrübt worden ist.) Erkl.! — 4. Einem Spiegel werde im Dunkeln eine Flamme aus grösster Entfernung immer mehr genähert. Wie ändern sich die Lichtwirkungen, wenn der Spiegel eben, erhaben oder hohl ist? — 5. Mit Hilfe eines Hohlspiegels und einer sehr stark leuchtenden Flamme kann man im verdunkelten Zimmer bewirken, dafs von einem versteckt aufgestellten Blumenstraufe etwa auf einer Blumenvase ein täuschend ähnliches, wirkliches Lichtbild entsteht. Wie ist dies auszuführen? (Siehe Fig. 349.) — 6. Mittelst eines Hohlspiegels will man einen Lichtschein möglichst weit hinwerfen, ein andermal eine ziemlich grofse, nahe gelegene Fläche dadurch erhellen. Wo mufs man die Flamme anbringen? Praktische Fälle! — 7. Am Gemäuer von Brücken ist bei direktem Sonnenlichte bisweilen ein eigentümliches Spiel unregelmäfsig gekrümmter Lichtstreifen sichtbar. Erkl.! — 8. Wie lassen sich im Zimmer durch Sonnenstrahlen „zitternde Kringeln“ an die Wand malen? — 9. Wie läfst sich durch direktes Sonnenlicht der Krümmungshalbmesser (r) eines Hohlspiegels bestimmen? — 10. Bei welchen Aufstellungen von Spiegel, Flamme und Schirm entstehen wirkliche Bilder, wenn $r = 30$ cm ist (Frage 9)?

§ 99. Brechungsexponent. Totale Reflexion. Luftspiegelung.

Fig. 353.



In Fig. 353 sei S ein in c aus Luft in Wasser übergehender Lichtstrahl, bc sein Einfallslot. Beschreibt man dann um c mit dem Radius ca einen Kreis und zieht ae und gh parallel zum Wasserspiegel, so entstehen die beiden rechtwinkligen Dreiecke aec und ghc, in denen die dem Einfalls- und dem Brechungswinkel gegenüberliegenden Katheten ae und gh in einem bestimmten Verhältnis zu einander stehen, das nach genauen Versuchen für jede Richtung des einfallenden Strahles dasselbe ist.

Dies gilt auch für alle anderen durchsichtigen Körper. So ist z. B. das Brechungsverhältnis für Luft und Wasser ungefähr 4:3, d. h. wenn man ae in vier gleiche Teile teilt, so enthält gh nur drei solcher Teile; für Luft und Gas ist es ungefähr 3:2. Die beiden Brüche $\frac{4}{3}$ und $\frac{3}{2}$ werden die *Brechungsexponenten* für den Übergang aus Luft in Wasser und für den Übergang aus Luft in Gas genannt.

Brechungs-Exponenten: Für den Übergang aus Luft in Weingeist ungefähr 1,37, Terpentinöl 1,48, Schwefelkohlenstoff 1,65, Diamant 2,49.

Da Lichtstrahlen um so stärker gebrochen werden, je schräger sie einfallen, so mufs es für den Übergang aus einem dichteren in ein dünneres Mittel (z. B. aus Wasser in Luft, Fig. 354, folg. Seite), wobei die Strah-

len sich immer stärker vom Einfallslote entfernen, eine Grenze geben, an welcher die gebrochenen Strahlen die Grenzfläche beider Mittel streifen. Für diesen Einfallswinkel (Grenzwinkel) ist der Brechungswinkel demnach 90° . Alle noch schräger einfallenden Strahlen müssen wieder in das dichtere Mittel zurückgeworfen werden. Die Grenzfläche beider Mittel muß daher, vom dichteren Mittel aus schräg genug betrachtet, wie ein Spiegel erscheinen. **Bestätigung:**

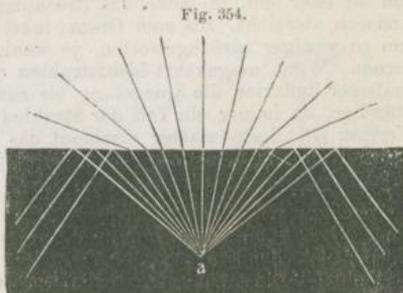


Fig. 354.

Versuch. Hält man ein mit Wasser oder einer anderen durchsichtigen Flüssigkeit gefülltes Glas (Fig. 355) so hoch, daß man von unten schräg gegen den Flüssigkeitsspiegel sehen kann, so erscheint derselbe wie ein Quecksilber-spiegel: von einem in das Wasser eingetauchten Stabe ist ein deutliches Spiegelbild sichtbar.

Fig. 355.



Derjenige Einfallswinkel, bei welchem der Austritt eines Lichtstrahles in ein dünneres Mittel nicht mehr stattfinden kann, wird der Grenzwinkel genannt.

Lichtstrahlen, welche ein dünneres Mittel treffen, werden bei Überschreitung des Grenzwinkels sämtlich in das dichtere Mittel zurückgeworfen: **Vollständige Zurückwerfung oder totale Reflexion.**

Die totale Reflexion wurde von Kepler (1611) entdeckt, während das Brechungsgesetz der Holländer Snell (1620) auffand. Eine genaue Bestimmung der Brechungsexponenten, deren Kenntnis für die zweckmäßige Konstruktion optischer Instrumente unentbehrlich ist, lehrte erst Fraunhofer (1814). Die Brechungsexponenten werden ermittelt durch die Messung der Ablenkung, welche ein Lichtstrahl in einem Prisma der betreffenden Substanz erleidet. †)

†) Trigonometrischer Ausdruck für das Brechungsgesetz: Der Sinus des Einfallswinkels und der Sinus des Brechungswinkels stehen in einem bestimmten Verhältnis zu einander. Nach der Figur ist, wenn w den Einfallswinkel, w_1 den Brechungswinkel und r den Radius des Kreises bezeichnet, $\frac{ea}{r} = \sin w$, $\frac{gh}{r} = \sin w_1$, mithin $\frac{\sin w}{\sin w_1} = \frac{ea}{gh} = \frac{4}{3}$, allgemein $\frac{\sin w}{\sin w_1} = n$. Der Einfallswinkel kann von 0 bis 90° wachsen. Ist nun $w = 0$, so muß auch $w_1 = 0$ sein (da $\sin w = n \cdot \sin w_1 = 0$), d. h. der senkrecht einfallende Strahl geht ungebrochen in das andere Mittel über. Ist $w = 90^\circ$, so hat $\sin w$ seinen größten Wert: $\sin w = 1$; setzen wir diesen Wert in obige Gleichung für $\sin w$ ein, so ergibt sich $\frac{1}{\sin w_1} = n$, also $\sin w_1 = \frac{1}{n}$. Derjenige Winkel, dessen Sinus $= \frac{1}{n}$ ist, ist also der Grenzwinkel. Für den Übergang aus Luft in Wasser ist $n = \frac{4}{3}$, der Grenzwinkel (w_1) also derjenige, dessen Sinus $= \frac{1}{4/3} = \frac{3}{4}$ ist. Hiernach ist $w_1 = 48^\circ 35'$, für Luft und Kronglas ist $n = \frac{3}{2}$, $\sin w_1$ also $= \frac{1}{3/2} = \frac{2}{3}$, $w_1 = 42^\circ$.

Der Grenzwinkel für den Übergang von Lichtstrahlen aus Wasser in Luft ist $48^{\circ} 35'$, aus Glas (Kronglas) in Luft 42° . Die totale Reflexion tritt überhaupt um so eher ein, je mehr das Brechungsvermögen des einen Mittels von dem des anderen abweicht. Bis zum Grenzwinkel werden Lichtstrahlen vom dünneren Mittel um so weniger zurückgeworfen, je weniger die Strahlen sich vom Einfallslot entfernen. Wenn umgekehrt Lichtstrahlen ein dichteres Mittel treffen, so ist bei regelmäßiger Reflexion die Spiegelung bis zum größten Einfallswinkel (90°) eine unvollständige, da immer ein Teil der Strahlen in den Körper eindringt. Je größer dieser Verlust ist, desto matter erscheint das Bild. (Vergleich zwischen einem Bilde im Spiegel und im Wasser.)

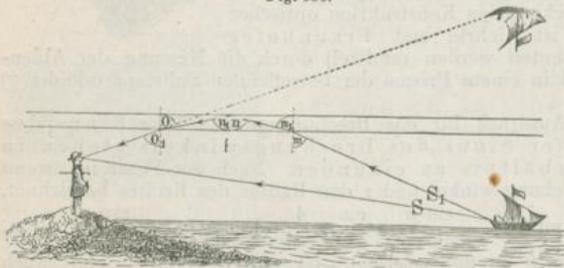
Aus der totalen Reflexion erklärt sich der zuweilen beobachtete Glanz und die Undurchsichtigkeit von Körpern, die an sich durchsichtig sind. Der Glanz muß um so stärker sein, je größer das Brechungsvermögen des Körpers ist, denn um so kleiner ist der Grenzwinkel und um so mehr Licht kann also ohne Verlust zurückgeworfen werden. Unter den festen Körpern zeichnet sich in dieser Beziehung besonders der Diamant aus, dessen Glanz man noch dadurch erhöht, daß man die Zahl der vollkommen spiegelnden Flächen durch den Schliß vergrößert. Undurchsichtigkeit kann durch vollständige Zurückwerfung der Strahlen entstehen, wenn die Strahlen in einem Körper unzählige Male in die Luft, welche die Zwischenräume des Körpers ausfüllt, zurückgeworfen werden. Gepulvertes Glas ist aus diesem Grunde undurchsichtig; gießt man aber eine Flüssigkeit darauf, welche das Licht ungefähr ebenso stark bricht (etwa Petroleum), so wird es wieder durchsichtig.

Die totale Reflexion findet eine Anwendung beim Gebrauche von Mikroskopen, auf denen man ein Glasprisma so befestigt, daß das Bild des betrachteten Gegenstandes zum Nachzeichnen auf einem neben dem Instrumente liegenden Blatte Papier sichtbar wird (Zeichenprisma). In gleicher Weise wird bei den vollkommensten Leuchtapparaten auf Leuchttürmen durch große Glasprismen bewirkt, daß die Lichtstrahlen parallel auf das Meer fallen (siehe Fig. 368).

Auf der totalen Reflexion beruht auch die Entstehung der Luftspiegelungen, welche bisweilen auf den Meeren der Polargegenden und in heißen Sandwüsten vorkommen.

Auf den Meeren der Polargegenden erscheint bisweilen hoch in der Luft das umgekehrte Bild eines fernen Schiffes (Fig. 356).*) Diese

Fig. 356.



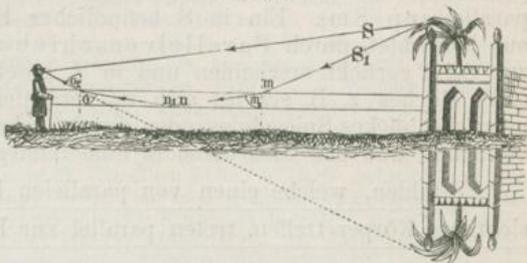
Einfallsloten. Dadurch wird ihre Richtung immer flacher, und es tritt schließlich eine totale Reflexion ein. Die bis dahin aufwärts gerichteten Strahlen gehen dann wieder abwärts, so daß der Beobachter den Eindruck erhält, als ob sie von einem hoch gelegenen Punkte herkämen.

*) In Fig. 356 und 357 ist der Einfachheit wegen vor und nach der totalen Reflexion nur eine einmalige Brechung angegeben. Die Entfernung, in welcher Gegenstand und Bild dem Beobachter erscheinen, hat man sich bedeutend größer vorzustellen, als die Figur nach den Größenverhältnissen der dargestellten Teile schließen läßt.

In heißen Sandwüsten sind oft Bilder sichtbar, welche wie bei einem Wasserspiegel unter dem Gegenstande erscheinen (Fig. 357), sodass es den Eindruck hervorruft, als sei der Gegenstand von Wasser umgeben.

Diese Art der Luftspiegelung wird dadurch hervorgerufen, dass die Dichte der Luft infolge der starken Erhitzung des sandigen Bodens nicht nach oben, sondern nach unten hin abnimmt, sodass die anfangs schräg abwärts gerichteten Lichtstrahlen nach wiederholter Brechung durch totale Reflexion sich schräg aufwärts wenden. Die total reflektierende Luftschicht glänzt dabei wie ein Spiegel. Da der Beobachter die oberen Teile der entfernten Gegenstände deutlich erkennt, ohne den Boden, auf welchem sie stehen, sehen zu können, und auch das Blau des Himmels in der spiegelnden Fläche erblickt, so ist die Täuschung eine sehr vollständige.

Fig. 357.

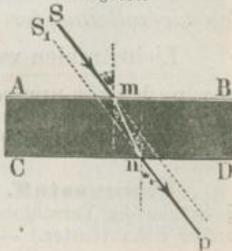


Übungsstoff. 1. Die Lichtstärke der in Gewässern sichtbaren Spiegelbilder hängt nicht nur von der Helligkeit der Beleuchtung, sondern auch von der Richtung ab, in welcher man ins W. hineinsieht; inwiefern? Erkl.! — 2. In Aquarien sieht man die Fische, wenn man von unten schräg gegen die Oberfläche des W. blickt, über dem W. Erkl.! — 3. Manche Pflanzenblätter zeigen einen hellen Silberglanz, wenn man sie in W. taucht; zieht man sie wieder aus dem W. heraus, so sind sie kaum benetzt. Wie erklärt sich dies? — 4. Die Risse in geborstenen Fensterscheiben erscheinen im direkten Sonnenlichte stark glänzend. Grund! — 5. Warum sind es bei durchsichtigen Edelsteinen namentlich die vom Auge abgewandten Flächen, welche den starken Glanz erzeugen? — 6. Kleine Luftblasen glänzen im W. wie Perlen; desgl. Tautropfen im direkten Sonnenlichte an der Sonnenseite. Erkl.! (Luft in W. und W. in Luft.) — 7. Vgl. die totale Reflexion mit der bekannten Ersch., welche eintritt, wenn man einen dünnen Stein mit der Hand kräftig und möglichst flach auf eine Wasseroberfläche wirft. — 8. Durchsichtige Körper sind in einer Flüssigkeit nicht zu erkennen, wenn beide das Licht gleichstark brechen (z. B. ein Glasstab in einer Mischung von Schwefelkohlenstoff und Terpentin); sie treten aber um so deutlicher hervor, je verschiedener das Lichtbrechungsvermögen beider K. ist. Wie wird sich hiernach ein Diamant von ebenso geschliffenem Glase leicht unterscheiden lassen? — 9. Warum ist Seifenschaum um so undurchsichtiger, je kleiner die Blasen sind, während doch eine einzelne Seifenblase durchsichtig ist? — 10. Warum müssen die Lichtstrahlen, welche die beiden Luftspiegelungen (Fig. 356 und 357) hervorrufen, beim Übergange in die entgegengesetzte Richtung eine sehr flache Lage haben? — 11. Warum müssen die Erschn. verschwinden, wenn man sich den Gegenständen mehr und mehr nähert?

§ 100. Brechung des Lichtes beim Durchgange durch Platten und Prismen.

Um die Erscheinungen kennen zu lernen, welche eintreten, wenn Lichtstrahlen nach ihrem Durchgange durch durchsichtige Körper sich in dem ersten Mittel weiter fortbewegen, betrachten wir zunächst den Durchgang des Lichtes durch eine durchsichtige Platte mit parallelen Grenzflächen. Der Strahl S, Fig. 358, treffe die Platte im Punkte m; n sei der Punkt,

Fig. 358.



in welchem er wieder austritt. Sind w und o , w_1 und o_1 die zugehörigen Einfallswinkel und Brechungswinkel, so ist $\sphericalangle o = o_1$ und folglich $w = w_1$ (warum?). Der austretende Strahl ist somit dem einfallenden Strahl parallel ($np \parallel S_m$). Ein in S befindlicher Körper muß daher, von p aus betrachtet, durch Parallelverschiebung der Strahlen ein wenig zur Seite gerückt erscheinen und in S_1 gesehen werden. — Die Schrift eines Buches z. B. scheint sich zu verschieben, wenn man sie durch möglichst dickes Spiegelglas oder durch mehrere Scheiben dünnen Glases betrachtet und das Glas dabei in eine immer schrägere Lage bringt.

Strahlen, welche einen von parallelen Ebenen begrenzten, durchsichtigen Körper treffen, treten parallel zur Einfallrichtung wieder aus.

Sind die beiden von Lichtstrahlen getroffenen Grenzflächen eines durchsichtigen Körpers nicht parallel, so können die Strahlen auch

Fig. 359.

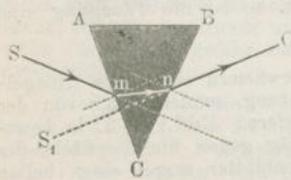
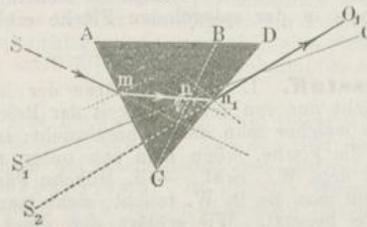


Fig. 360.



nicht parallel zur Einfallrichtung wieder austreten; sie werden vielmehr so gebrochen, daß sie sich

von der Kante des brechenden Körpers desto mehr abwenden, je größer der Winkel

Fig. 361.



ist, den die Grenzflächen miteinander bilden. Ein in S , Fig. 359, befindlicher Körper würde, von O aus durch das Glas betrachtet, nach S_1 verschoben erscheinen. Diese Verschiebung muß offenbar um so mehr betragen, je größer der von den beiden Grenzflächen gebildete Winkel (Fig. 360) und je stärker das Lichtbrechungsvermögen der Substanz des durchsichtigen Körpers ist. — Bestätigung durch einen Versuch

nach Fig. 361.

Jeder durchsichtige Körper mit zwei gegeneinander geneigten ebenen Grenzflächen wird Prisma genannt. Die Linie, in der diese Grenzflächen sich schneiden, heißt die brechende Kante und der Winkel, den sie miteinander bilden, der brechende Winkel des Prismas.

Lichtstrahlen werden durch ein Prisma von der brechenden Kante weg und zwar um so stärker abgelenkt, je größer der brechende Winkel und das Brechungsvermögen des Prismas ist.

Übungstoff. 1. Welchen Einfluß übt die Dicke einer Glasscheibe auf die Stärke der Verschiebung der durch sie betrachteten Gegenstände aus? (Scheiben großer Schaufenster.) — 2. Ferner bei gleicher Dicke des Glases die Richtung, in

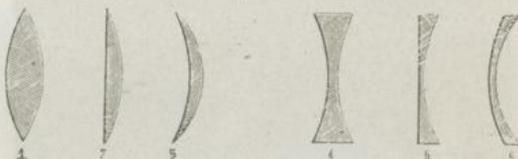
der man durch die Scheibe sieht? — 3. Durch Fensterscheiben erscheinen die Gegenstände gewöhnlich etwas verzerrt; solche Erschn. zeigen geschliffene Spiegelglasscheiben nicht. Erkl.! — 4. Legt man unter ein geschliffenes Trinkglas, das halb mit W. gefüllt ist, ein Blatt bedrucktes Papier, so erscheint die Schrift, wenn man sie von oben durch das W. hindurch betrachtet, um so stärker verschoben, je schräger man das Glas zu sich herüberkippt. Erkl.! — 5. Ein senkrecht gehaltener Stab erscheint, durch ein mit ebenen Schlißflächen versehenes und mit W. gefülltes Trinkglas betrachtet, mehrfach seitlich verschoben. Erkl.! — 6. Welche Lage muß ein vor das Auge gehaltenes Prisma haben, wenn ein Gegenstand a. nach unten b. nach oben, c. nach rechts, d. nach links verschoben erscheinen soll? — 7. Zwei gleiche Glasprismen mit kleinen brechenden Winkeln seien so aufeinander gelegt, daß ihre brechenden Kanten a. nach derselben Seite, b. nach entgegengesetzten Seiten gerichtet sind. Ablenkung? — 8. Von zwei gleichen Hohlprismen sei das eine mit W., das andere mit Terpentinöl oder Schwefelkohlenstoff gefüllt. Welches von beiden Prismen wird das Licht stärker ablenken? — 9. Nach Anleitung von Fig. 353 und 358 ist der Durchgang zweier Lichtstrahlen durch Glas für Einfallswinkel von 30° und 60° durch Zeichnung darzustellen.

§ 101. Brechung des Lichtes durch sphärische Linsen.

Die wesentlichen Teile aller auf Lichtbrechung beruhenden Instrumente sind sogen. *Linsen*, d. h. *Glaskörper, welche entweder von zwei kugelförmigen Flächen oder von einer kugelförmigen und einer ebenen Fläche begrenzt sind*. Man unterscheidet:

1. Sammel- oder Konvexlinsen und zwar heißt eine Linse *doppeltkonvex* (1) wenn beide Flächen nach außen gewölbt sind, *eben- oder plankonvex* (2), wenn eine Fläche nach außen gewölbt und die andere eben ist, *konkav-konvex* (3); wenn eine Fläche nach innen, die andere stärker als diese nach außen gewölbt ist.

Fig. 362.



2. Zerstreungs- oder Konkavlinsen, und zwar *doppeltkonkave* (4), welche von zwei hohlen Flächen begrenzt sind, *eben- oder plankonkave* (5), die eine hohle und eine ebene Grenzfläche haben, *konvex-konkave* (6), bei denen eine Fläche nach außen, die andere stärker als diese nach innen gewölbt ist.

Fig. 363.



Die *Mittelpunkte der Kugelflächen, von denen die Grenzflächen der Linsen Teile bilden, werden Krümmungsmittelpunkte genannt*. — Eine *gerade Linie, welche durch die Krümmungsmittelpunkte der beiden Grenzflächen geht, heißt Achse der Linse*.

Wird eine doppelkonvexe Linse (Fig. 363) durch kreisförmige Schnitte parallel zur Achse in mehrere Teile zerlegt, so kann man den mittleren Teil als von parallelen ebenen Flächen begrenzt, die übrigen Teile als ringförmig gebogene Prismen betrachten, deren Seitenflächen um so stärker gegeneinander geneigt sind, je näher sie dem Rande der Linse liegen. Hieraus folgt,

dafs von parallel einfallenden Strahlen, welche mit der Achse gleich gerichtet sind, 1) der Achsenstrahl ungebrochen hindurchgeht, 2) alle übrigen Strahlen die Achse schneiden und um so stärker gebrochen werden, je weiter sie von der Achse entfernt sind. — Strahlen, welche bei ihrem Ein- und Austritte parallele Flächenteile der Linse treffen, erleiden nur eine um so geringere Parallelverschiebung, je weniger ihre Richtung von der Richtung der Achse abweicht und je dünner die Linse ist. Ähnliches gilt auch für alle anderen Linsen.

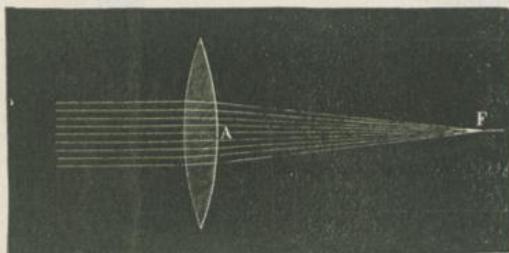
Derjenige Punkt einer Linse, durch welchen die Lichtstrahlen ohne Richtungsänderung hindurchgehen, heifst optischer Mittelpunkt; die durch denselben gehenden Strahlen heifsen Hauptstrahlen.

Der optische Mittelpunkt liegt bei Linsen mit gleicher Krümmung in der Mitte, bei allen anderen näher an der stärker gekrümmten Fläche, und zwar bei plankonvexen und plankonkaven in der Mitte der ebenen Fläche selbst, bei konkavkonvexen und konvexkonkaven Linsen außerhalb der Linse.

1. Lichtbrechung durch Sammellinsen.

Versuch a. Läßt man Sonnenstrahlen parallel zur Achse durch eine Konvexlinse gehen (Fig. 364), so entsteht hinter der Linse ein sehr heller Punkt (**Brennpunkt**). Dieser ist um so weiter von der Linse entfernt, je flacher sie ist, und um so schärfer begrenzt, je kleiner (namentlich bei stark gekrümmten Linsen) die Öffnung der Linse ist. Papier entzündet sich in diesem Punkte. Welche Richtung würden die Strahlen durch die Linse erhalten, wenn sie von F ausgingen? — Gehen die Strah-

Fig. 364.



len nur durch den mittleren Teil kugelförmig gekrümmter Linsen, so gelten für sie folgende Gesetze:

Strahlen, welche parallel zur Achse durch eine Sammellinse gehen, werden so abgelenkt, dafs sie sich im Brennpunkte der Linse vereinigen; Hauptstrahlen ändern ihre Richtung nicht.

Strahlen, welche vom Brennpunkte einer Sammellinse ausgehen, werden durch die Linse so gebrochen, dafs sie parallel zur Achse austreten.

Genauere Untersuchungen lehren, dafs der Vereinigungspunkt derjenigen Strahlen, welche in der Nähe des Randes durch eine Konvexlinse gehen, ähnlich wie beim hohlen Kugelspiegel, der Linse etwas näher liegt als der Vereinigungspunkt der mittleren Strahlen: **Sphärische Abweichung**. Diese Abweichung ist um so beträchtlicher, je stärker die Linsen gekrümmt sind; am geringsten ist sie bei plankonvexen Linsen, welche somit die beste Form haben.

Versuch b. Im verdunkelten Zimmer läßt sich mit Hilfe eines weifsen Schirmes ferner nachweisen, 1) dafs die Strahlen nach ihrem Durchgange durch eine Konvexlinse um so stärker *divergieren*, je mehr der leuchtende Punkt sich innerhalb der Brennweite der Linse nähert (Fig. 365, folg. Seite), 2) dafs sie aber um so stärker *konvergieren*, je mehr der leuchtende Punkt sich aufser-

halb der Brennweite von der Linse entfernt. Ist der leuchtende Punkt um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so sind die Strahlenkegel auf beiden Seiten der Linse gleich (Fig. 366).

Liegt der Ausgangspunkt der durch eine Sammellinse gehenden Strahlen in der Brennweite, so wird die Strahlenzerstreuung durch die Linse nur abgeschwächt; liegt er ausserhalb der Brennweite, so vereinigen sich die Strahlen hinter der Linse in einem um so näher gelegenen Punkte, je weiter der leuchtende Punkt entfernt ist.

Bei Linsen hängt die Lage des Brennpunktes nicht allein von der Grösse des Krümmungshalbmessers, sondern auch von der Natur des Glases ab. Sind die beiden Grenzflächen einer Linse gleichstark gekrümmt, so fällt bei den gewöhnlichen Glaslinsen (Brechungsindex n) der Brennpunkt mit dem Krümmungsmittelpunkt beinahe zusammen. Die Brennweite ist gleich dem Krümmungsradius der Linse. Bei den plankonvexen Linsen ist der Brennpunkt doppelt

Fig. 365.

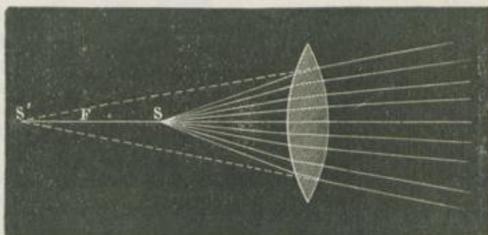
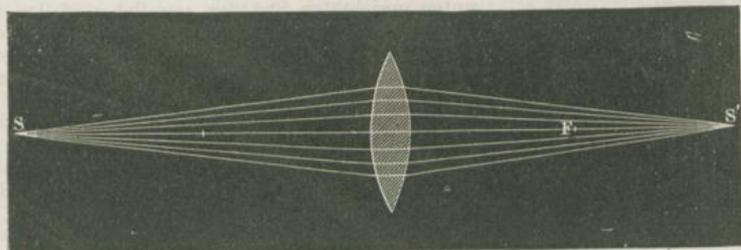


Fig. 366.

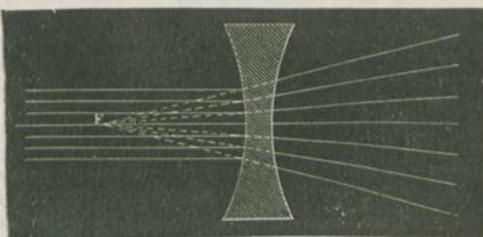


so weit entfernt.

2. Lichtbrechung durch Zerstreulinzen.

Eine Konkavlinse (Fig. 367) sei in ähnlicher Weise, wie Figur 363 darstellt, aus mehreren Teilenzusammengesetzt. Wie lässt sich die Ablenkung der parallel zur Achse einfallenden Strahlen erklären? Was ist über die Stärke der Beleuchtung eines hinter der Linse aufgestellten Schirmes anzuführen? — Bestätigung:

Fig. 367.



Versuch c. Lässt man auf eine Konkavlinse parallel zur Achse Sonnenstrahlen fallen, so entsteht auf einem weissen Schirm, hinter der Linse, ein heller Kreisring, welcher grösser ist als die Linse und einen dunkleren Kreis,

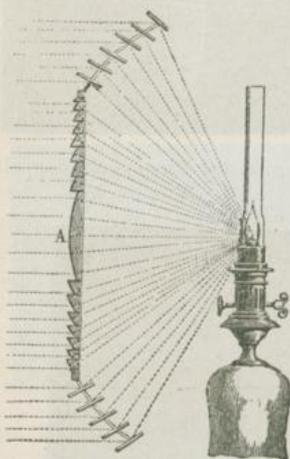
dessen Durchmesser dem der Linse entspricht, konzentrisch umschließt; die Linse zerstreut die Strahlen. Je weiter man Linse und Schirm voneinander entfernt, desto größer und lichtmatter wird der Ring.

Fig. 367 stellt zugleich dar, daß die nahe der Achse parallel einfallenden und durch die Linse gebrochenen Strahlen, nach rückwärts verlängert, sich in einem vor der Linse gelegenen Punkte, dem sogen. geometrischen Brennpunkte, treffen.

Strahlen, welche parallel zur Achse durch eine Zerstreuungslinse gehen, werden so abgelenkt, als ob sie vom geometrischen Brennpunkte der Linse ausgingen; Hauptstrahlen ändern ihre Richtung nicht.

Die Parallelrichtung von Lichtstrahlen durch Brechung ist für die Küstenbeleuchtung sehr wichtig geworden, indem man die früher gebräuchlichen Spiegelapparate (Fig. 352) immer mehr durch Linsen- und Prismenapparate ersetzt hat (Fig. 368).

Fig. 368.



Letztere bestehen aus einem sehr weiten, nahezu tonnenförmigen Mantel, welcher aus großen Glaslinsen und gekrümmten Prismen so zusammengesetzt ist, daß jede Linse (A) mit den über und unter ihr angebrachten Prismen eine einzige treppenförmig geschliffene Linse von bedeutender Ausdehnung darstellt. In der Mitte dieses Glasmantels, und zwar im Brennpunkte der Linsen, befindet sich eine sehr starke Lichtquelle. Damit auch die nach oben und unten gerichteten Strahlen parallel ausfallen, läßt man sie auf zahlreiche, kreisförmig angeordnete Spiegel (in der Figur angedeutet) oder bei vollkommener Einrichtung auf sehr stumpfwinklige Glasprismen fallen. Letztere bewirken eine totale Reflexion. Leuchtapparate dieser Art werden nach ihrem Erfinder Fresnelsche (spr. Fränellsche) Apparate genannt. — Die deutsche Küste ist jetzt von der russischen bis zur holländischen Grenze mit zahlreichen Leuchttürmen versehen, welche in solchen Abständen voneinander aufgestellt sind, daß ihre Sichtbarkeitskreise bei mittlerer Durchsichtigkeit der Luft sich 10 bis 12 Meilen von der Küste schneiden.

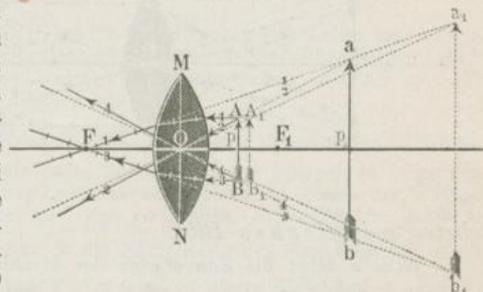
Übungsstoff. 1. Hinter einem Wassertropfen entsteht im direkten Sonnenlichte ein kleiner, sehr heller Schein (Lichtkugeln der Schuhmacher), hinter einer mit W. gefüllten Glasröhre eine Lichtlinie. Erkl.! — 2. Glasziegel haben bisweilen linsenförmig gekrümmte Stellen. Welche Gefahr kann dadurch für ein Gebäude entstehen, dessen Dach derartige Ziegel enthält? — 3. In dem gläsernen Ölbehälter einer Petroleumlampe erscheint der Docht viel breiter als er wirklich ist; w.? — 4. In ein verdunkeltes Zimmer dringe ein Bündel paralleler Sonnenstrahlen. Welche Ersch. wird sich zeigen, wenn man die Strahlen a. durch eine Konvexlinse, b. durch eine Konkavlinse hindurchgehen läßt? (Die geom. Form des von den Strahlen hell erleuchteten Raumes und die Veränderung dieser Form ist anzugeben). — 5. Welche Ersch. wird man wahrnehmen, wenn man den Ausschnitt des Schirmes (Fig. 361) betrachtet und dabei eine Sammel- oder eine Zerstreuungslinse vor dem Auge bewegt? — 6. Welche Arten von Linsen und Spiegeln haben ähnliche Lichtwirkungen? — 7. Wie läßt sich die Brennweite einer Konvexlinse durch einen Versuch bestimmen? (Fig. 364 und 366.)

§ 102.

1. Bilder durch Sammellinsen.

AB, Fig. 369 und 371, sei ein Gegenstand, von welchem Lichtstrahlen auf die Linse MN fallen; F und F_1 seien die beiden Brennpunkte der Linse. Um Lage und Größe des Bildes zu bestimmen, betrachten wir den Lauf zweier Strahlenpaare, welche den mittleren Teil der Linse treffen und von denen zwei Strahlen (1 und 3) der Achse parallel sind, die beiden anderen (2 und 4) durch den optischen Mittelpunkt O gehen (Hauptstrahlen). Erstere werden so gebrochen, daß sie den Brennpunkt treffen; von letzteren kann bei geringer Dicke der Linse angenommen werden, daß sie ungebrochen durch dieselbe hindurchgehen.

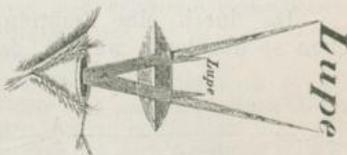
Fig. 369.



1. Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so müssen die von demselben Punkte ausgehenden Strahlen hinter der Linse *divergieren*, da die von A und B aus parallel zur Achse gezogenen und bis zu den Linien Fa und Fb verlängert gedachten Geraden kleiner sind als die Strecke OF. Betrachtet man den Gegenstand durch die Linse, so erhält man demnach den Eindruck, als kämen die Strahlen von den Schnittpunkten (a und b) ihrer nach rückwärts gerichteten Verlängerungen. Wegen dieser scheinbaren Vereinigung der von denselben Punkten ausgehenden Strahlen kann auch nur ein *aufrechtes scheinbares Bild* entstehen, das den Gegenstand an derselben Seite der Linse weiter entfernt und vergrößert darstellt.

Würde AB etwa bis A_1B_1 von der Linse entfernt, ohne seine Lage gegen die Achse zu ändern, so behalten die mit der Achse parallel laufenden Strahlen (1 und 3) ihre Lage bei, die durch O gehenden Strahlen (2 und 4) aber nähern sich der Achse. Dadurch rücken die scheinbaren Schnittpunkte der Strahlen weiter von der Linse weg (a_1 und b_1) und das Bild wird größer. — Bestätigung durch den Versuch nach Fig. 370.

Fig. 370.

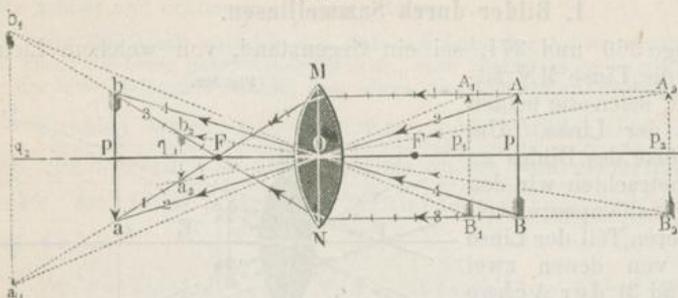


Betrachtet man durch eine Sammellinse einen in der Brennweite derselben befindlichen Gegenstand, so erblickt man vor der Linse ein aufrechtes scheinbares Bild des Gegenstandes.

Das Bild ist um so größer und um so weiter von der Linse entfernt, je mehr man den Gegenstand dem Brennpunkte der Linse nähert.

2. Der Gegenstand (AB) befinde sich **aufserhalb** der Brennweite

Fig. 371.

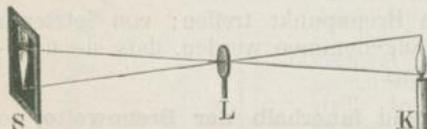


kehrtes, wirkliches Bild.

der Linse. Da die von demselben Punkt ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse *konvergieren*, so entsteht ein *umge-*

Woraus folgt die Konvergenz der Strahlen? — Welchen Einfluß muß dies auf die Lage und Größe des Bildes ausüben? — Nur bei welchem der beiden Strahlenpaare kann die in der Figur angedeutete Parallelverschiebung des Gegenstandes eine Änderung der Lage bewirken; inwiefern? — Bestätigung durch den in Fig. 372 angedeuteten Versuch.

Fig. 372.



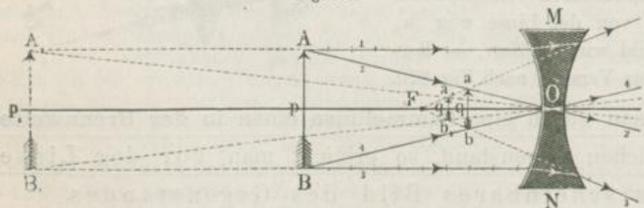
Von einem Gegenstande, welcher sich vor einer Sammellinse **aufserhalb** der Brennweite befindet, entsteht hinter der Linse ein **umgekehrtes, wirkliches Bild.**

Bild und Gegenstand sind gleichgroß und gleichweit von der Linse entfernt, wenn der Gegenstand um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt ist. Das Bild wird um so größer und entfernt sich um so weiter von der Linse, je mehr man den Gegenstand dem Brennpunkte nähert; es wird dagegen um so kleiner und nähert sich dem Brennpunkte um so mehr, je weiter man den Gegenstand von der Linse entfernt.

2. Bilder durch Zerstreuungslinsen.

Da durch eine Zerstreuungslinse gleich gerichtete Strahlen schon so abgelenkt werden, daß sie sich immer weiter voneinander entfernen, so müssen Strahlen, welche

Fig. 373.



von einem Punkte ausgehen, also schon vor der Linse *divergieren*, durch die Linse stets noch stärker *zerstreut* werden.

Zerstreuungslinsen können demnach (wie erhabene Spiegel) nur *aufrechte, scheinbare Bilder* hervorrufen.

Erkläre Fig. 373. — Bestätigung durch den Versuch.

Betrachtet man einen Gegenstand durch eine **Zerstreuungslinse**, so entsteht ein aufrechtes, scheinbares Bild; der Gegenstand erscheint um so stärker verkleinert, je weiter er von der Linse entfernt ist.

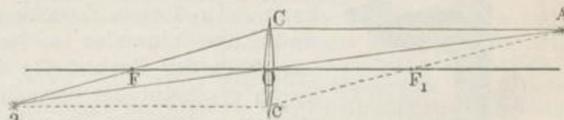
Wenn in Fig. 369, 371 und 373 E und e die Strecken der Achse bezeichnen, um welche Gegenstand und Bild vom optischen Mittelpunkte der Linse entfernt sind, so ergibt sich über die Größe der Bilder die Proportion $ab:AB = e:E$. Begründe dieselbe und sprich sie in Worten aus!

Ableitung eines allgemeinen Gesetzes für dünne Linsen mit kleiner Öffnung.

Obige Sätze lassen sich, wie die Sätze über sphärische Spiegel, in folgenden Ausdruck zusammenfassen: *Die reciproke Brennweite ist gleich der Summe aus der reciproken Gegenstandsweite und der reciproken Bildweite*; in Zeichen: $\frac{1}{f} = \frac{1}{E} + \frac{1}{e}$, wenn f die Brennweite, E die Entfernung des Gegenstandes, e die des Bildes von der Linse bedeutet. (Für $E < f$ wird in dieser Gleichung e negativ; vgl. Seite 245.)

Beweis: Fig. 374 stelle eine sehr dünne **Konvexlinse** mit kleiner Öffnung dar, F sei ein Brennpunkt der Linse, O der optische Mittelpunkt, A ein leuchtender Punkt, a das Bild desselben, dessen Lage (wie oben) durch die Strahlen ACa und Aa bestimmt ist. Zieht man zunächst ac || zur Achse und verbindet c mit A, so läßt sich beweisen, daß $OF_1 = OF$, wenn F_1 den Punkt bezeichnet, in welchem cA die Achse schneidet, daß mithin Bild und Gegenstand vertauscht werden können, also F_1 der andere Brennpunkt der Linse ist. Es ist nämlich

Fig. 374.



	$Oa:OA = Oc:OC,$	da $\triangle Oac \sim \triangle OAC.$
Folglich	$(Oa + OA):OA = (Oc + OC):OC$	
oder	$aA:OA = cC:OC.$	
Nun ist auch	$aA:OA = ac:OF_1,$	weil $\triangle aAc \sim \triangle OAF_1.$
Mithin	$cC:OC = ac:OF_1.$	
Da nun ferner	$cC:OC = ac:FO,$	weil $\triangle Cae \sim \triangle CFO,$
so ist	$ac:OF_1 = ac:FO,$	also $OF_1 = FO.$

Zu der Gleichung des obigen Gesetzes gelangt man durch die Proportionen:

	$aO:OA = ac:CA$	(Grund?) und
	$aO:OA = cF_1:F_1A$	(Grund?).
Folglich	$ac:CA = cF_1:F_1A$	oder, wenn C, also auch c, der
		Achse sehr nahe liegt, nach obiger
		Bezeichnung annähernd
		woraus sich nach Auflösung und Di-
		vision durch eEf das Gesetz ergibt.

Für subjektive Bilder erhält man, wie bei den Kugelspiegeln, e negativ. Für **Konkavlinen** ist in der Reciprokegleichung außerdem f negativ zu setzen.

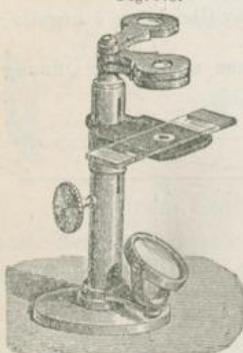
Übungstoff. 1. Warum kann man die scheinbaren Bilder nicht mittelst eines Schirmes auffangen? — 2. Wie erkennt man, indem man durch eine Sammellinse die Schrift eines Buches betrachtet, ob letztere in- oder außerhalb der Brennweite der Linse liegt? — 3. Wie werden entfernte Gegenstände erscheinen, wenn man a. eine Zerstreuungslinse, b. eine Sammellinse zwischen das Auge und den Gegenstand hält (normalsichtiges Auge und richtige Haltung der Linsen vorausgesetzt),

und an welcher Seite der Linsen entstehen dabei die Bilder? — 4. Warum darf hierbei nur die Zerstreuungslinse dem Auge beliebig genähert werden? — 5. Unter einem Wassertropfen erscheint ein Gegenstand (etwa kleine Schrift) heller und größer. Erkl.! — 6. Eine ziemlich weite Probierröhre mit kugelig gewölbtem Boden soll mit Zuhilfenahme von W. so eingerichtet werden, daß sie als Vergrößerungsglas dienen kann; desgl. ein Stückchen starkes Papier mit etwa 5 mm weiter, kreisrunder Öffnung und ein Wassertropfen. Ausführung und Erkl.! — 7. Durch eine ganz mit W. gefüllte Probierröhre erscheint kleine Schrift sehr nahe vor der Röhre bei bestimmter Haltung entweder nur höher oder breiter. Erkl.! — 8. Wie groß ist die Brennweite einer Bikonvexlinse, wenn von einer 60 cm von derselben entfernten Flamme 40 cm hinter der Linse ein Bild entsteht!

C. Die optischen Instrumente und das Auge.

§ 103. Lupe und Mikroskop. Eine Lupe besteht entweder

Fig. 375.



nur aus einer einzigen Sammellinse von kurzer Brennweite, oder es sind mehrere derartige Linsen miteinander verbunden. Man benutzt sie zur Betrachtung kleiner Gegenstände, welche man mit dem bloßen Auge nicht deutlich genug erkennen kann. Zu diesem Zwecke nähert man Gegenstand und Lupe einander so weit, daß ersterer sich innerhalb der Brennweite der Lupe befindet. Dadurch erscheint der betrachtete Gegenstand um so stärker vergrößert, je näher er dem Brennpunkte liegt (vgl. Fig. 369). — Lupen, welche mit einem Stativ und mit einem Beleuchtungsspiegel versehen sind, werden **einfache Mikroskope**¹⁾ genannt (Fig. 375).

Stärke der Vergrößerung einer Lupe. Nach Fig. 369 ist das Bild sovielmals so groß als der betrachtete Gegenstand, wievielmals die Gegenstandsweite (E) in der Bildweite (e) enthalten ist ($\frac{e}{E}$). Letztere kann höchstens gleich der deutlichen Sehweite sein (24 cm für ein gesundes Auge). — Da der Gegenstand bei dieser Entfernung dem Brennpunkte der (dicht vor das Auge gehaltenen) Lupe schon sehr nahe liegen muß, so erhält man die Vergrößerung *annähernd*, wenn man die deutliche Sehweite (24 cm) durch die Brennweite dividiert. Beträgt z. B. die Brennweite 4 cm, so ergibt sich eine 6fache (lineare) Vergrößerung. — *Genauer*es läßt sich aus der Gleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{E} - \frac{1}{e}$ (Seite 257) ableiten. Multipliziert man mit e , so erhält man $\frac{e}{f} = \frac{e}{E} - 1$ oder: $\frac{e}{E} = \frac{e}{f} + 1$, wonach sich die vorhin berechnete Vergrößerung als um 1 zu klein erweist.

Die Brennweite einer einfachen Lupe ist gewöhnlich ungefähr 6 cm, die stärkste Vergrößerung also etwa eine 5fache (lineare). Stärkere brauchbare (höchstens 20fache) Vergrößerungen lassen sich besser durch ein System von mehreren Linsen (Fig. 375) als durch eine einzelne Linse erreichen, da die sphärische Abweichung dadurch geringer und das Gesichtsfeld größer wird als bei einer einfachen Lupe mit gleicher Brennweite.

Die zusammengesetzten Mikroskope bestehen in ihrer einfachsten Einrichtung aus zwei Sammellinsen, welche an den beiden Enden

¹⁾ $\mu\alpha\kappa\rho\acute{o}s$ (mikrós), klein und $\sigma\kappa\omicron\pi\epsilon\iota\nu$ (skopein), schauen.

einer innen geschwärzten Messingröhre befestigt sind. Die eine dieser beiden Linsen (O, Fig. 376) soll von dem kleinen Gegenstande AB ein möglichst großes wirkliches Bild (ab) erzeugen und wird daher dem Gegenstande soweit genähert, daß der Abstand etwas mehr als die Brennweite der Linse beträgt; die andere (o) dient als Lupe zur Betrachtung des entstandenen Bildes. Jene wird *Objektiv*-,¹⁾ diese *Okularlinse*²⁾ genannt. Die Brennweite der Objektivlinse ist bedeutend kleiner als die der Okularlinse.

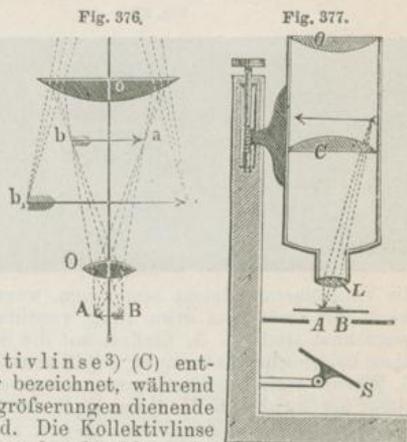


Fig. 377 stellt eine vollkommene Einrichtung dar, bei welcher die Röhre des Mikroskopes noch eine sogen. Kollektivlinse³⁾ (C) enthält. Beide zusammen werden als Okular bezeichnet, während die Objektivlinse oder das zu stärkeren Vergrößerungen dienende Linsensystem kurz Objektiv genannt wird. Die Kollektivlinse hat den Zweck, die vom Gegenstand kommenden Strahlen, ehe sie sich vereinigen, zu einem etwas kleineren, aber deutlicheren Bilde zu sammeln und das Gesichtsfeld zu vergrößern. Im Okular ist da, wo das wirkliche Bild entsteht, ein quer gerichteter, schwarzer Blechring (Blende) angebracht, welcher alle Randstrahlen abhält. Die Röhre des Mikroskopes oder der in seiner Mitte durchbohrte Objekt-Tisch kann zur genauen Einstellung mittelst einer feinen Schraube am Stativ langsam auf- und abbewegt werden. Damit das Bild hell genug erscheint, wird der zu betrachtende Gegenstand durch einen kleinen Hohlspiegel (S) beleuchtet.

Die Güte eines Mikroskopes hängt weniger von der Stärke der Vergrößerung, als von der Klarheit und Schärfe der Bilder ab. Die Vergrößerung wird hauptsächlich durch das Objektiv bewirkt. Die gewöhnlichen, zur Fleischuntersuchung dienenden Mikroskope vergrößern nur 50–150 mal, während die stärksten eine 1500- bis 2000fache Linienvorgößerung bewirken. — Das Mikroskop ist wahrscheinlich von einem Holländer Jansen (um 1600) erfunden worden.

Das Sonnenmikroskop dient dazu, kleine Gegenstände auf einem Schirm stark vergrößert darzustellen. Es besteht aus einer Röhre, welche an einem Ende zur Erzeugung eines Bildes eine kleine Objektivlinse und am anderen Ende zur Beleuchtung des Gegenstandes eine größere Sammellinse enthält. Die Röhre wird im Fensterladen eines verdunkelten Zimmers so befestigt, daß direkte Sonnenstrahlen durch die Sammellinse einfallen können, wozu ein Spiegel zur Hilfe genommen wird (siehe Fig. 405). Da der Gegenstand sich nahe dem Brennpunkte der Objektivlinse befindet, so erscheint von ihm auf einem weißen Schirme ein großes, lichtstarkes Bild.

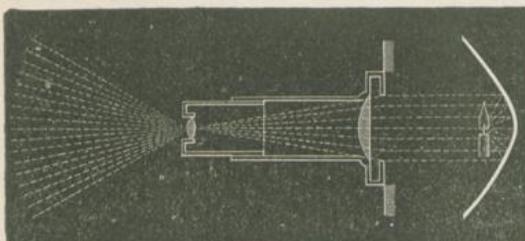
Statt des Sonnenlichtes läßt sich auch künstliches Licht anwenden (Skioptron).

Bei der sogen. Zauberalaterne (laterna magica, Fig. 378, folg. Seite) werden auf Glas gemalte Bilder verkehrt hinter den röhrenförmigen Ansatz eines laternenartigen Blechkastens geschoben und durch eine hell brennende Flamme mit Hilfe eines Hohlspiegels beleuchtet. Zur Erzeugung des Lichtbildes dienen gewöhnlich 2 gegeneinander verschiebbare Konvexlinsen.

¹⁾ objectum, der Gegenstand; ²⁾ oculus, das Auge; ³⁾ colligere, sammeln.

Übungstoff. 1. Warum muß bei einer Lupe der Gegenstand in die Brennweite und zwar dem Brennpunkte möglichst nahe und dicht vor das Auge gehalten werden? — 2. Inwiefern ist hierbei ein weit-sichtiges Auge gegen ein kurz-sichtiges im Vorteil? — 3. Der Rand der Lupe wird bei schwach vergrößernden Lin-sen nur durch die Einfassung, bei stärker vergrößernden durch eine besondere Blendscheibe verdunkelt. Zweck? — 4. Durch eine Lupe werde ein Millimetermaßstab betrach-tet. Wie läßt sich hierbei

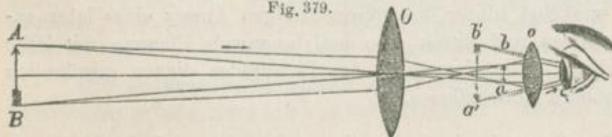
Fig. 378.



die Vergrößerung leicht bestimmen, wenn ein gleicher Maßstab daneben liegt, oder wenn mit Tinte zwei etwa 5 mm voneinander entfernte Punkte mitten auf die Lupe gezeichnet sind? — 5. Einfluß auf die Stärke der Vergrößerung einer Lupe, wenn diese bei gleicher Krümmung aus Diamant statt aus Glas hergestellt würde? (§ 99.) — 6. Warum muß bei einem zusammengesetzten Mikroskop der zu betrachtende Gegenstand außerhalb der Brennweite der Objektivlinse (dem Brennpunkte sehr nahe), das wirkliche Bild desselben dagegen innerhalb der Brennweite der Okularlinse liegen? — 7. Wie wird sich das Bild bewegen, wenn man den Gegenstand verschiebt, u. w.? — 8. Welche Flächenvergrößerung hat ein Mikroskop, das 100mal linear vergrößert? — 9. Welchen Einfluß muß die Stärke der Vergrößerung auf die Lichtstärke des Bildes ausüben, u. w.? — 10. Die Vergrößerung eines Mikroskopes läßt sich dadurch bestimmen, daß man einen auf Glas geritzten Maßstab (Mikrometer), dessen Teilstriche etwa 0,1 mm voneinander abstehen, durch das Mikroskop betrachtet und einige Teilstriche in der Höhe des Objektisches aufzeichnet. Wie hat man weiter zu verfahren? — 11. Zur bequemen Messung der betrachteten Gegenstände legt man auf die Blendung des Okulars ein Mikrometer, dessen Vergrößerungswert sich zunächst dadurch bestimmen läßt, daß man auf den Objektisch ein zweites, ebenso eingerichtetes Mikrometer legt und beide zugleich betrachtet. Gesetzt, es fallen dabei die Abstände von 10 aufeinander folgenden Teilstrichen auf einen solchen Abstand des unteren Mikrometers (siehe Frage 10); wie groß ist dann ein betrachteter Gegenstand, wenn er den Raum zwischen zwei benachbarten Teilstrichen des oberen Mikrometers ausfüllt?

§ 104. Fernrohre. Während die Mikroskope den Zweck haben, nahe gelegene, kleine Gegenstände stark zu vergrößern, dienen die Fernrohre dazu, von weit entfernten Gegenständen Bilder zu erzeugen, sodafs die Gegenstände dem Auge genähert und dadurch deutlicher erscheinen. Da man die zu betrachtenden Gegenstände nicht wie beim Mikroskope nach Belieben beleuchten kann, so sucht man die erforderliche Lichtstärke der Bilder bei den Fernrohren dadurch zu erreichen, daß man große Objektive anwendet, denn je größer der Durchmesser des Objektivs ist, desto mehr Strahlen können von denselben Punkten des Gegenstandes ins Fernrohr gelangen.

Fig. 379.



1. Das astronomische oder Keplersche Fernrohr (Fig. 379) dient zur Betrachtung der Gestirne und er-

zeugt ein umgekehrtes Bild. Es besteht, wie das zusammengesetzte

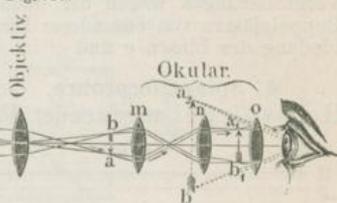
Mikroskop, im wesentlichen aus zwei Sammellinsen, nämlich aus einer *Objektivlinse* (O) von großer und einer *Okularlinse* (o) von kleiner Brennweite. Okular- und Objektivlinse können zur genauen Einstellung gegeneinander verschoben werden.

Das im Fernrohre entstehende wirkliche Bild (ab) des Gegenstandes (AB) erscheint durch die Okularlinse vergrößert ($a'b'$). Wie beim Mikroskop befindet sich im Okular gewöhnlich noch eine Kollektivlinse, durch welche das objektive Bild zwar etwas kleiner, aber deutlicher wird. Der Durchmesser der Objektivlinse kann über 50 cm betragen, die Vergrößerung eine mehrtausendfache sein.

Das astronomische Fernrohr giebt von allen Linsenfernrohren die hellsten und klarsten Bilder. Es wurde von Kepler (1611) erfunden.

2. Das terrestrische oder Erdfernrohr (Fig. 380) wird zur Betrachtung irdischer Gegenstände angewandt. Damit diese im Rohre aufrecht erscheinen, ist das aus 3 (oder 4) Linsen bestehende Okular ähnlich wie ein *zusammengesetztes Mikroskop* eingerichtet.

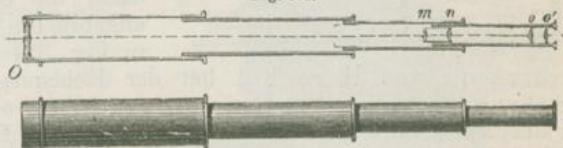
Fig. 380.



Die dem Objektiv am nächsten gelegene Linse (m) des Okulars hat den Zweck, die Richtung der Strahlen so zu ändern, daß das vom Objektiv erzeugte umgekehrte Bild ab des Gegenstandes wieder aufrecht wird. Um ein möglichst klares Bild zu erhalten, läßt man die Strahlen noch durch eine Kollektivlinse (n) gehen. Das auf diese Weise entstandene, aufrechte Bild (a_1b_1) erscheint durch die dem Auge am nächsten gelegene Linse o (oder bei noch vollkommener Einrichtung durch zwei flachere Linsen o und o', Fig. 381) wie durch eine Lupe vergrößert (a_2b_2 , Fig. 380).

Zum bequemeren Transport auf Reisen wird das Erdfernrohr gewöhnlich aus mehreren ineinander verschiebbaren Röhren zusammengesetzt (Fig. 381). Die Linsen des Okulars haben eine unveränderliche Stellung gegeneinander. — Die Vergrößerung des Erdfernrohres ist gewöhnlich eine 20- bis 30fache, selten eine mehrhundertfache.

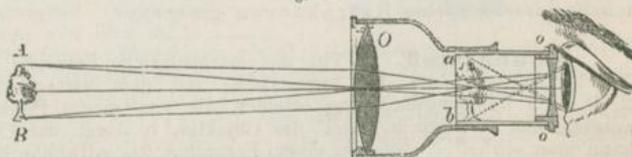
Fig. 381.



Das Erdfernrohr ist 1645 von einem Mönch des Klosters Rheit in Böhmen, Namens Schyrl, erfunden worden.

3. Das holländische oder Galileische Fernrohr (Fig. 382) dient wie das Erdfernrohr zur Betrachtung irdischer Gegenstände, unterscheidet sich aber von jenem wesentlich durch sein einfaches, eigenartiges Okular. Das Okular wird nämlich von einer *Zerstreuungslinse* (o) gebildet, die vor der Stelle angebracht ist, an

Fig. 382.



die
auge
In-
zeit-
urz-
Der
bei
Lin-
ung.
len
end-
? —
ein
ach-
erbei
oder
Lupe
venn
)—
gen-
ahe),
linse
ver-
mal
auf
ikro-
stab
das
auf-
der
eter,
f den
leich
nden
10):
zwei
ben,
die
er-
eut-
wie
er-
er-
der
den-
ono-
Kep-
rohr
t zur
der
er-
etzte

welcher die durch das *Objektiv* (O) hindurchgegangenen Strahlen sich zu einem wirklichen Bilde vereinigen würden. Dadurch werden die Strahlen wieder zerstreut und die Gegenstände erscheinen wie beim Erdfernrohre in ihrer wirklichen Lage.

Die kleineren Fernrohre von dieser Einrichtung werden *Operngläser* oder *Theaterperspektive*, die größeren *Feldstecher* genannt. Erstere gewähren eine 2- bis 3fache, letztere höchstens eine 20- bis 30fache Vergrößerung.

Das holländische wurde von allen Fernrohren zuerst erfunden, und zwar wurde ein Brillenmacher Lippershey 1608 durch eine zufällige Entdeckung auf diese wichtige Erfindung geführt. Kurze Zeit darauf stellte Galilei, ohne jene Einrichtung zu kennen, ein Fernrohr von gleicher Beschaffenheit her und verwendete es zu seinen astronomischen Beobachtungen.

Bem. Die Objektivlinsen in Mikroskopen und Fernrohren bestehen bei starken Vergrößerungen wegen der dadurch erreichten größeren Klarheit der Bilder aus Doppelgläsern von besonderer Einrichtung (§ 109). Denselben Zweck hat die Verbindung der Linsen o und o' im Okular des Erdfernrohres, Fig. 381.

4. Spiegelfernrohre. In demselben werden statt der Objektivlinsen Hohlspiegel angewendet. Fig. 383 zeigt die Einrichtung des **Newton'schen Teleskopes**. Es besteht aus einem weiten Rohre, das an dem vorderen, dem

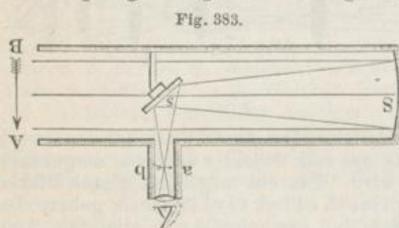


Fig. 383.

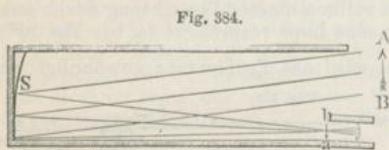


Fig. 384.

gestirne zugewandten Ende offen ist und am anderen Ende einen großen *Hohlspiegel* (S) enthält, welcher die einfallenden Strahlen wieder zurückwirft. Bevor diese sich zu einem Bilde vereinigen können, fallen sie auf einen kleinen, im Innern des Rohres angebrachten ebenen Spiegel (s), welcher gegen die Achse des Rohres unter 45° geneigt ist und daher die Strahlen in das seitlich angebrachte *Okular* wirft. — In dem in Fig. 384 dargestellten Spiegelteleskope von Herschel hat der Hohlspiegel selbst eine schräge Stellung, sodafs die Strahlen von demselben ohne Vermittelung eines Planspiegels nach dem am unteren Rande der Rohroöffnung befindlichen *Okular* zurückgeworfen werden.

Newton gab dem 1663 von Gregory in England erfundenen Spiegelfernrohre die beschriebene Einrichtung. Das von Herschel (1789) hergestellte Fernrohr hatte einen Durchmesser von $1\frac{1}{2}$ m und eine 7000fache Vergrößerung. Statt der Metallspiegel werden neuerdings mit noch größerem Erfolge versilberte Glasspiegel angewandt. — Die Spiegelfernrohre werden auch *Reflektoren*, große astronomische Linsenfernrohre *Refraktoren* genannt.

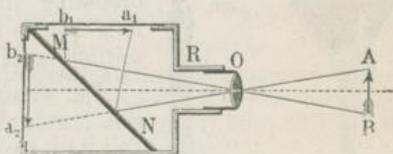
Übungsstoff. 1. Vgl. das astronomische Fernrohr mit dem Mikroskope, das holländische und das terrestrische mit dem astronomischen Fernrohre. — 2. Welche Richtungsänderung erleiden die von einem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen a. durch das Objektiv, b. durch das Okular? — 3. Woraus kann man schließen, dafs bei einem Fernrohre das wirkliche Bild dem Brennpunkte der Objektivlinse sehr nahe liegen mufs? — 4. Welche Lage mufs beim Mikroskop wie beim astronomischen Fernrohre das wirkliche Bild gegen die Okularlinse haben, u. w.? — 5. Die Linsen m und n (Fig. 380) sind um die Summe ihrer Brennweiten

voneinander entfernt; zwischen denselben wird eine Blende angebracht, wo und w.? — 6. Gehört die Kollektivlinse eines optischen Instrumentes ihrer Wirkung nach zum Objektiv oder zum Okular; w.? — 7. Warum müssen Fernrohre und Mikroskope für verschiedene Personen meist auch verschieden eingestellt werden? — 8. Beim Mikroskop haben Okular und Objektiv eine unveränderliche Lage gegeneinander. Wie ist daher die genaue Einstellung auszuführen? — 9. Inwiefern hängt es mit der Richtung, welche den Strahlen durch die Okularlinse erteilt wird, zusammen, daß das Gesichtsfeld beim Galileischen Fernrohre verhältnismäßig kleiner ist als beim Keplerschen? — 10. Angenommen, man blickte mit dem einen Auge durch ein Fernrohr, mit dem andern direkt nach einem Ziegeldache und sähe zu, wieviel Ziegelsteine auf einen Stein des Bildes fallen. Wie ließe sich dadurch die Stärke der Vergrößerung des Instrumentes annähernd bestimmen?

§ 105. Die Camera obscura und das Auge. Als Camera obscura oder Dunkelkammer bezeichnet man einen innen ge-

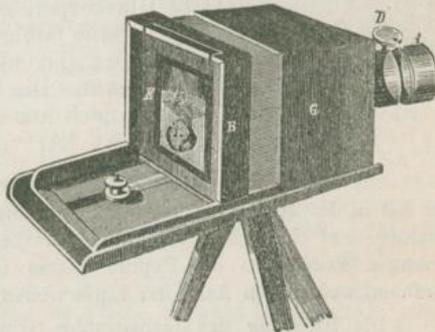
schwärzten Kasten (Fig. 385), dessen Vorderwand zur Erzeugung eines objektiven Bildes in einem kurzen, verschiebbaren Ansatzrohre (R) eine Sammellinse (O) und dessen hintere oder obere Wand zum Auffangen dieses Bildes eine matt geschliffene Glasscheibe enthält. Soll das Bild auf der oberen Wand des Kastens entstehen, so bringt man in letzterem einen unter 45° geneigten Planspiegel an. Diese Einrichtung gestattet, das Bild bequem nachzuzeichnen.

Fig. 385.



Die Camera obscura ohne Spiegel und mit einem Linsensystem als Objektiv findet hauptsächlich beim Photographieren eine nützliche Anwendung. Die mattgeschliffene Glasscheibe wird nach genauer Einstellung durch eine andere ersetzt, welche mit einer dünnen, durch Jod- und Bromsilber gegen Licht sehr empfindlich gemachten Kollodiumschicht oder mit Bromsilbergelatine überzogen ist. Das Bild wird erst dann sichtbar, nachdem die Platte im verdunkelten Zimmer mit einer dazu geeigneten Flüssigkeit (Eisenvitriol und Pyrogallussäure) übergossen worden ist. Hierbei scheidet sich nämlich an den vom Lichte getroffenen Stellen aus jenen Silbersalzen um so mehr metallisches Silber als äußerst feines schwarzes Pulver aus, je stärker das Licht eingewirkt hatte, sodafs diese Stellen mehr oder weniger dunkel erscheinen. Die Deutlichkeit des Bildes wird dadurch erhöht, daß man die Platte durch Übergießen mit einer geeigneten Flüssigkeit (unterschwelligsaurem Natron) von dem im Lichte unverändert gebliebenen Silbersalzen reinigt. (Letztere sind in unterschwelligsaurem Natron löslich, während die Substanz der durch das Licht verdunkelten Stellen darin unlöslich ist.) — Auf diesem Bilde sind die Verhältnisse von Licht und Schatten vertauscht, die hellen Stellen des Gegenstandes sind dunkel und umgekehrt (*negatives Bild*). — Um ein Bild zu erhalten, welches Licht und Schatten richtig darstellt, wird die Glastafel mit ihrer Bildseite auf ein Blatt Papier gelegt, das mit Chlorsilber für Licht empfindlich gemacht ist (photographisches Papier), und abermals dem Sonnenlichte ausgesetzt. Da die dunkelsten

Fig. 386.



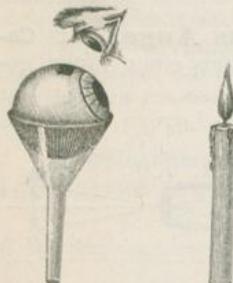
Stellen der Glasplatte am wenigsten, die hellsten am meisten Licht durchlassen, so kehren sich die Verhältnisse zwischen Licht und Schatten wieder um und das entstehende Bild stellt dieselben richtig dar (*positives Bild*, Fig. 387).



1838 erfand Daguerre in Frankreich die Kunst, auf versilberten Kupferplatten Lichtbilder zu erzeugen. Fast gleichzeitig (1839) wurde von dem Engländer Talbot das noch jetzt beim Photographieren angewandte (seitdem allerdings sehr vervollkommnete) Verfahren erfunden, Lichtbilder auf Papier herzustellen.

Der vollkommenste aller optischen Apparate ist das

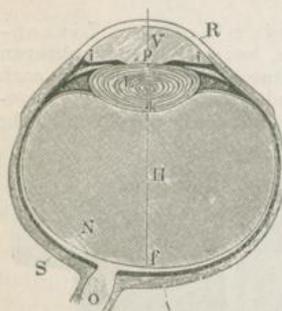
Fig. 388.



Auge, dessen Einrichtung mit derjenigen der Camera obscura eine gewisse Ähnlichkeit hat. Wie bei dieser umschließt das Auge einen dunklen Raum, auf dessen Rückwand von Gegenständen, die sich vor dem Auge befinden, durch Lichtbrechung in verschiedenen dichten Mitteln kleine, umgekehrte Bilder entstehen. (*Nachweis an dem seitlich geöffneten Auge eines Rindes, Fig. 388).

Der menschliche Augapfel wird von einer sehnigen harten Haut, deren hinterer, undurchsichtiger Teil Sehhaut (S) und deren vorderer, durchsichtiger Teil Hornhaut (R) genannt wird, umschlossen. Letztere ist stärker gewölbt. Da, wo die harte Haut in die

Fig. 389.



Hornhaut übergeht, wird der Innenraum des Augapfels durch die Krystalllinse (L) in zwei Teile geschieden, die als vordere und hintere Augenkammer bezeichnet werden (V und H). Die vordere Kammer ist mit einer wässrigen Flüssigkeit, die hintere mit einer gallertartigen Masse, dem sogenannten Glaskörper, gefüllt. Dicht vor der Krystalllinse ist eine farbige Haut, die sogenannte Regenbogenhaut (ii) als scheibenförmige Blende ausgespannt. Die Wand der hinteren Augenkammer ist nach innen mit zwei dünnen Häuten, Aderhaut (A) und Netzhaut (N), ausgekleidet.

Die Regenbogenhaut ist bei verschiedenen Personen verschieden gefärbt. Sie hat in der Mitte eine kreisrunde Öffnung, die Pupille (P), welche sich durch strahlen- und ringförmig angeordnete Muskeln der Regenbogenhaut erweitern oder verengen kann. Da die Pupille mitten vor der Krystalllinse liegt, so werden Strahlen, welche den Rand der Linse treffen würden, nicht durchgelassen.

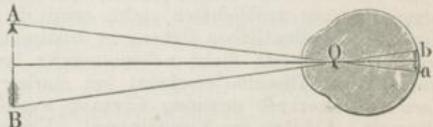
Die Brechung der Lichtstrahlen wird namentlich durch die farblose und äußerst durchsichtige Krystalllinse bewirkt. Diese ist ein linsenförmiger Körper, dessen hintere Fläche stärker gekrümmt ist als die vordere. Sie wird von einer klaren Haut (Linsenkapsel), welche nach dem Rande hin ringsum mit dem vorderen Teile der Aderhaut verwachsen ist, ganz umschlossen. Letztere bildet um die Krystalllinse herum eine strahlenförmig gefaltete, schwarze Einfassung (Strahlenkörper), durch welche die Linse in ihrer Lage gehalten wird. Die Regenbogenhaut ist eine Fortsetzung der Aderhaut.

Die **Aderhaut** breitet sich innerhalb der ganzen hinteren Augenkammer aus. Sie ist tiefschwarz gefärbt und enthält zahlreiche feine Blutgefäße, die das Auge ernähren. Die schwarze Farbe derselben ist für die Deutlichkeit des Bildes wichtig, indem sie eine nachteilige Zurückwerfung des Lichtes im Innern des Auges verhindert.

Die **Netzhaut** ist das eigentliche Organ zur Aufnahme der Lichtreize. Sie wird durch eine Ausbreitung des Sehnerven, welcher an einer etwas seitlich gelegenen Stelle vom Gehirn her ins Auge eintritt, gebildet und hat einen sehr zusammengesetzten Bau (in der Figur nicht angedeutet). An der Eintrittsstelle des Sehnerven ist die Netzhaut für Licht empfindungslos (blinder Fleck), während an derjenigen Stelle, auf welcher das Bild eines Gegenstandes entsteht, wenn wir unser Auge auf denselben richten, Lichteindrücke am deutlichsten wahrgenommen werden. Diese Stelle (gelber Fleck) liegt da, wo eine durch den Scheitel der Hornhaut und die Mitte der Pupille gelegte Gerade (Augenachse) die Netzhaut trifft. Der Sehnerv übermittelt die auf die Netzhaut wirkenden Lichtreize dem Gehirn.

Da das Auge aus verschiedenen lichtbrechenden Körpern zusammengesetzt ist, so läßt sich der Gang der Lichtstrahlen nicht in so einfacher Weise darstellen, wie bei künstlichen optischen Apparaten. Wir wollen uns daher bei allen späteren Betrachtungen vorstellen, das Auge enthielte nur ein einziges lichtbrechendes Mittel (Fig. 390). Denkt man sich dann von den Endpunkten des Gegenstandes (AB) nach den entsprechenden Punkten des Bildes (ab) gerade Linien gezogen, so geben diese die Richtung der Strahlen an. Der Punkt (O), in welchem diese Linien sich schneiden, wird Kreuzungspunkt genannt; er bildet den optischen Mittelpunkt des Auges und liegt beim wirklichen Auge im Innern der Krystalllinse, nahe vor der hinteren Fläche derselben.

Fig. 390.



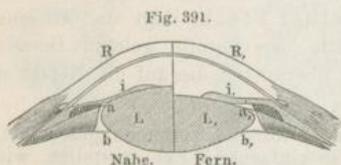
Übungsstoff. 1. Vgl. das Auge mit der Camera obscura. (Die größere Vollkommenheit der Einrichtung ist hervorzuheben.) — 2. Welchen Einfluss hat die Weite der Blende im Ansatzrohre der Camera obscura auf die Lichtstärke und Schärfe des negativen Bildes, sowie auf die Schnelligkeit, mit welcher das Bild entsteht? — 3. Durch welche wichtige Eigenschaft unterscheidet sich die Blende des Auges von allen Blenden optischer Instrumente? — 4. Mit welcher von den in Fig. 362 dargestellten Linsen hat der vordere Teil des Auges, welcher aufsen von der Hornhaut, innen von der Linse begrenzt wird, Ähnlichkeit? — 5. Bei den im W. lebenden höheren Tieren ist die Krystalllinse des Auges viel stärker gekrümmt als bei den Landtieren (bei Fischen nahezu kugelig); w.? — 6. Betrachtet man von 2 etwa um Fingerlänge voneinander entfernten Punkten den rechten Punkt mit

dem linken oder den linken mit dem rechten Auge, während man das andere Auge geschlossen hält, so sind bei Annäherung der Fläche zunächst beide Punkte sichtbar. Entfernt man darauf die Fläche weiter vom Auge, so verschwindet der Punkt, auf den das Auge nicht gerichtet war, zunächst vollständig; er wird aber bei zunehmender Entfernung wieder sichtbar. Wie erklärt sich diese Ersch.? — 7. Ständen rechts oder links 2 Punkte etwa 2 cm voneinander, so würde bei gleichem Verfahren zuerst der innere und darauf auch der äußere Punkt verschwinden u. s. w. Erkl.!

§ 106. Das Sehen. Frühere Versuche haben ergeben, dafs die Bilder, welche durch eine Sammellinse entstehen, nur in bestimmten

Abständen von Linse und Schirm deutlich erscheinen, sowie daß diese Abstände bei einer bestimmten Linsenkrümmung von der Entfernung der Gegenstände abhängig sind (§ 102). Wären demnach Lage und Krümmung der lichtbrechenden Teile des Auges unveränderlich, so könnte ein deutliches Bild auf der Netzhaut nur von solchen Gegenständen entstehen, welche in einer ganz bestimmten Entfernung vom Auge sich befinden; nähere oder weiter entfernte Gegenstände müßten undeutlich erscheinen. Obgleich man nun nur in einer bestimmten Entfernung ohne Anstrengung am deutlichsten zu sehen vermag, so kann sich das Auge doch sehr verschiedenen Entfernungen anpassen. (**Akkommodationsvermögen.**)

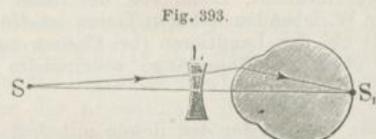
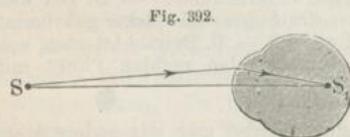
Die Akkommodation wird hauptsächlich durch eine Gestaltveränderung der Krystalllinse bewirkt. Beim Nahesehen ist besonders die vordere Fläche der Krystalllinse stärker gewölbt, beim Sehen in die Ferne ist sie mehr abgeflacht (Fig. 391). Dabei findet im ersteren Falle zugleich eine Verengung, im letzteren eine Erweiterung der Pupille statt.



Das Akkommodationsvermögen ist jedoch nicht unbegrenzt. Die beiden äußersten Entfernungen, für welche eine Anpassung des Auges möglich ist, heißen Nahepunkt und Fernpunkt; die Entfernung, in welcher ein Auge ohne Anstrengung am deutlichsten sieht, wird deutliche Sehweite genannt. Um die Grenzen des deutlichen Sehens zu bestimmen, braucht man nur durch 2 feine, in einem Kartenblatt dicht nebeneinander befindliche Öffnungen eine Nadelspitze zu betrachten. Dieselbe erscheint bei starker Annäherung doppelt, bei weiterer Entfernung innerhalb gewisser Grenzen nur einfach, in größerer Entfernung wieder doppelt. Erkläre die Erscheinung! (Versuch von Scheiner, 1619.)

Bei **normalsichtigen Augen** ist 1. der Abstand des Nahepunktes 10 bis 12 cm (in geringerer Entfernung strengt das Sehen sehr an); 2. die deutliche Sehweite ungefähr 24 cm; 3. der Abstand des Fernpunktes sehr groß.

Bei **kurzsichtigen Augen** ist die deutliche Sehweite kleiner als bei normalsichtigen; der Fernpunkt liegt dem Auge zu nahe. Dies wird durch eine zu starke Krümmung der Krystalllinse oder (nach neueren Untersuchungen) dadurch hervorgerufen, daß die Augennachse von vorn nach hinten zu lang ist. Das Bild von einem



in der normalen Sehweite befindlichen Gegenstände entsteht dann schon vor der Netzhaut (Fig. 392). Kurzsichtige müssen daher die Gegenstände, um sie deutlich zu erkennen, den Augen mehr nähern (vergl. Fig. 371: Verschiebung von A_2B_2 nach AB; ab entspricht dem Netzhautbilde), oder sie müssen Konkavlinnen als Brillen tragen (Fig. 393).

Da durch Konkavlinnen die Strahlen zerstreut werden, so gelangen in die mit einer Brille versehenen kurzsichtigen Augen um so weniger Lichtstrahlen, je schärfer die Brille ist und je weiter sie von den Augen absteht. Hierdurch wird die Licht-

stärke des Netzhautbildes vermindert. Kurzsichtige müssen daher die Brille den Augen möglichst nähern.

Bei weitsichtigen (übersichtigen) Augen ist die deutliche Sehweite größer als bei normalen; der Nahpunkt liegt zu weit vom Auge weg. Dies hat seinen Grund in einer zu starken Abflachung der Krystalllinse oder in einer Verkürzung der Augennachse. Die Strahlen, welche von einem in der normalen Sehweite befindlichen

Fig. 394.

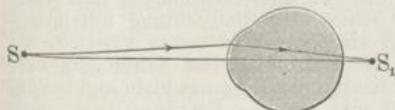
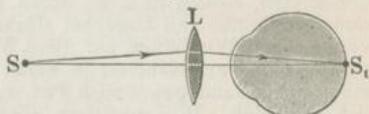


Fig. 395.



Gegenstände ausgehen, treffen mithin die Netzhaut schon vor ihrer Vereinigung zu einem Bilde (Fig. 394). Damit das Bild auf die Netzhaut fällt, müssen Weitsichtige die Gegenstände in größerer Entfernung betrachten (vgl. Fig. 371: Verschiebung von A_1B_1 nach AB) oder Konvexlinsen als Brillengläser tragen (Fig. 395).

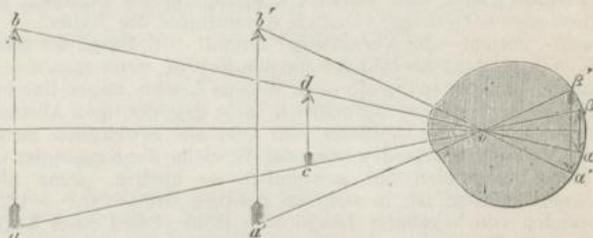
Da Konvexlinsen die Strahlen sammeln, so wird das Netzhautbild um so lichtstärker, je weiter die Brille von den Augen absteht. Weitsichtige sehen daher besser, wenn die Brille von den Augen möglichst entfernt ist.

Die Kurzsichtigkeit wird von jüngeren Leuten häufig durch andauernde Akkommodation der Augen für die Nähe (beim Lesen, Zeichnen u. s. w.) erworben, während Weitsichtigkeit mit zunehmendem Alter infolge einer Erschlaffung der Muskeln, welche die Akkommodation bewirken, eintritt. — Die Brillen¹⁾ wurden gegen Ende des 13. Jahrhunderts in Italien erfunden.

Schwinkel. Die tägliche Erfahrung lehrt, dass nicht nur die Deutlichkeit, sondern auch die Größe, in der uns ein Gegenstand erscheint, sich mit der Entfernung ändert (Beispiele!). Da nun das

Sehen auf dem Zustandekommen von Bildern auf der Netzhaut beruht, so muß jene Erscheinung durch eine Veränderung in der Größe dieser Netzhautbilder hervorgerufen werden. Fig. 396 zeigt, dass nicht nur Gegen-

Fig. 396.



stände von gleicher Größe ungleichgroße Bilder auf der Netzhaut erzeugen können, sondern dass auch das Umgekehrte eintreten kann. Die Gegenstände erscheinen uns hiernach gleichgroß, wenn die von ihren Endpunkten durch den optischen Mittelpunkt des Auges gehenden Strahlen denselben Winkel (**Schwinkel**) einschließen; sie erscheinen in anderer Größe, wenn dieser Winkel sich ändert.

Die scheinbare Größe eines Gegenstandes ist durch den Schwinkel bestimmt.

¹⁾ beryllus = Beryll, ein Edelstein.

Durch verschiedene optische Instrumente wird bewirkt, daß Gegenstände, deren Sehwinkel für die deutliche Beobachtung zu klein sind, in der deutlichen Sehweite unter größeren Sehwinkeln erscheinen. Ist ein Gegenstand mäßig erleuchtet, so kann man ihn noch wahrnehmen, wenn der Sehwinkel kaum den hundertsten Teil eines Grades beträgt. Hell leuchtende Sterne sind noch unter viel kleineren Sehwinkeln zu erkennen.

Zur Beurteilung der wirklichen Größe und Entfernung der Gegenstände sind gewisse Erfahrungen nötig. Diese sammeln wir schon von frühester Jugend an, indem wir nach den Gegenständen hingehen, ihre Abstände abschreiten, messen u. s. w., durch Betasten uns von ihrer Ausdehnung überzeugen und ihre Größe und Lage bei stärkerer und schwächerer Beleuchtung miteinander vergleichen. Wir lernen auf diese Weise, daß ein Gegenstand um so kleiner und undeutlicher erscheint, je weiter er von uns entfernt ist, und halten umgekehrt einen Gegenstand gewöhnlich für weit entfernt, wenn er uns klein und undeutlich erscheint. Wir schließen ebenfalls auf eine große Entfernung, wenn zwischen uns und dem betrachteten Gegenstande zahlreiche andere Gegenstände sich befinden, da wir im allgemeinen auf großen Strecken mehr Dinge wahrnehmen als auf kleinen.

Bei dieser Beurteilung der Größe und Entfernung der Gegenstände sind wir jedoch allerlei Täuschungen ausgesetzt. So halten wir z. B. Berge bei nebligem Wetter leicht für weiter entfernt und für höher als sie wirklich sind; sind dieselben im Winter mit Schnee bedeckt und ist die Luft klar, so halten wir sie für zu niedrig und zu nahe (Täuschungen im Hochgebirge). Sonne und Mond erscheinen uns viel größer, wenn sie aufgehen, als wenn sie hoch am Himmel stehen, obgleich der Sehwinkel in beiden Fällen derselbe ist; im ersteren Falle trifft unser Blick zahlreiche, ihrer Entfernung nach bekannte Gegenstände, wodurch wir verleitet werden, die Himmelskörper uns entfernter und größer vorzustellen, als wenn sie höher am Himmel stehen.

Übungsstoff. 1. Wie läßt sich bei einer Camera obscura bewirken, daß das Bild unter Beibehaltung desselben Objektivs und bei derselben Stellung der Rückwand wieder deutlich erscheint, wenn der Gegenstand sich nähert oder entfernt. Erkläre die Undeutlichkeit! — 2. Wie erzielt man dieselbe Lichtstärke des Bildes bei sehr ungleichen Entfernungen des Gegenstandes? — 3. Wie lassen sich diese Erfahrungen auf Vorgänge im Auge anwenden? — 4. Warum ist bei im W. lebenden Tieren eine starke Krümmung für die Hornhaut zwecklos, für die Krystalllinse aber notwendig? (Kugelige Krystalllinse der Fische.) — 5. Sind Fische in der Luft weit-, normal- oder kurzsichtig? Grund! — 6. Desgl. der Mensch unter W.? Grund! — 7. Wie entsteht das Bild des eigenen Kopfes, wenn man einer anderen Person ins Auge sieht? (Augenspiegel.) — 8. Welche Erschn. zeigen Baumreihen, Eisenbahnschienen u. dgl. in der Ferne hinsichtlich ihres gegenseitigen Abstandes? Erkl.! — 9. Warum erscheinen große Gewässer vom Ufer aus gewöhnlich zu schmal? — 10. Wie mag die Meinung entstanden sein, das W. ziehe die Kugeln der Geschütze an? — 11. Hohe Türme erscheinen uns gewöhnlich zu niedrig, wenn aber zugleich ein Mensch darauf sichtbar ist, in ziemlich richtiger Größe; w.? — 12. Wie läßt sich bei Gegenständen von bekannter Länge oder Höhe (Pferd eines Kavalleristen) durch Visieren über die Endpunkte eines in gleicher Richtung gehaltenen kurzen Stabes annähernd die Entfernung beurteilen?

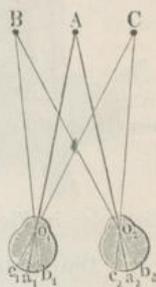
§ 107. Das Sehen. (Fortsetzung). Daß wir die Gegenstände aufrecht sehen, obgleich die Netzhautbilder umgekehrt sind, erklärt sich in folgender Weise. Da wir von frühester Jugend an durch unseren Tastsinn darüber belehrt werden, wissen wir, daß wir zur Betrachtung der einzelnen Teile eines Gegenstandes unser Auge dahin richten müssen, wo dieselben sich wirklich befinden, also nach oben, wenn der Punkt hoch, nach unten, wenn er tief liegt u. s. w. Wir verlegen demnach die Ursachen der Lichteindrücke in der Richtung nach außen, in welcher die Strahlen

ins Auge fallen und sehen gerade deshalb die Gegenstände aufrecht, weil die Netzhautbilder umgekehrt sind.

Das Einfachsehen. Wenn wir einen Gegenstand (A, Fig. 397) betrachten, so richten wir beide Augen so, daß ihre *Achsen* (a_1o_1 und a_2o_2) in ihrer Verlängerung den betrachteten Gegenstand treffen.

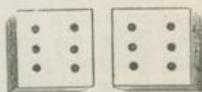
Fig. 397.

Dadurch entstehen beide Netzhautbilder auf entsprechenden Stellen der Netzhaut (in a_1 und a_2). Dasselbe gilt von den Bildern derjenigen nicht betrachteten Gegenstände (z. B. B oder C), welche in derselben Entfernung etwas weiter nach links oder rechts liegen; von der linken Seite entstehen beide Bilder rechts (in b_1 und b_2), von der rechten Seite links von der Achse (in c_1 und c_2). Wir sehen in solchen Fällen die Gegenstände *einfach*. Liegen dagegen die betrachteten Gegenstände hintereinander, etwa in A und dem Schnittpunkte der beiden Linien Bb_2 und Cc_1 , so würden die Bilder des näheren Gegenstandes, wenn man die Augen wie vorhin nach A richtete, in c_1 und b_2 , also auf 2 einander nicht entsprechenden Stellen der Netzhaut entstehen. Wir sehen dann den Gegenstand *doppelt*. (Bestätigung durch einen Versuch mit 2 Stäbchen).



Das Körperlichsehen. Die beiden Netzhautbilder, welche uns einen Gegenstand einfach erscheinen lassen, können nicht genau übereinstimmen, da die Augen wegen ihres gegenseitigen Abstandes eine verschiedene Lage zu dem betrachteten Gegenstande einnehmen. So sind z. B. von einem nahe vor dem Auge befindlichen schmalen Gegenstande (Würfel, Fig. 398, Buch bei Betrachtung des Rückens) zwar beide Seiten zugleich sichtbar, schließt man aber abwechselnd das eine und das andere Auge, so überzeugt man sich leicht, daß jedes nur eine Seitenfläche des Gegenstandes sieht.

Fig. 398.

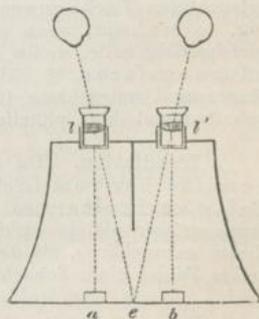


In der Verschiedenheit der Netzhautbilder liegt demnach der Grund, daß uns die Gegenstände nicht als flache Bilder, sondern als Körper erscheinen. Unser Urteil über die Körperlichkeit wird noch durch die Verteilung von Licht und Schatten unterstützt.

Blindgeborene, welche später durch eine Operation sehend werden, sind erst nach längerer Übung imstande, die Körperlichkeit und Entfernung von Gegenständen zu beurteilen. Sehr weit entfernte Gegenstände sehen wir flächenartig (Mondscheibe).

Daß das Körperlichsehen auf der Vereinigung verschiedener Netzhautbilder beruht, läßt sich durch das **Stereoskop** (Fig. 399) nachweisen. Dasselbe besteht aus einem Kasten, in dessen Deckel zwei kurze Röhren so befestigt sind, daß sie um den gegenseitigen Abstand der beiden Augen auseinander liegen. Jede dieser Röhren enthält ein Glasprisma mit kleinem brechenden Winkel. Die brechenden Kanten dieser keilförmigen Gläser sind gegeneinander gerichtet.

Fig. 399.

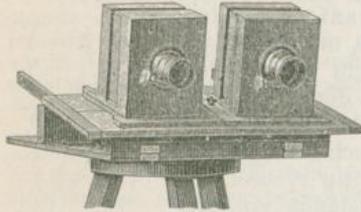


dafs
der
ent-
des
sich
a W.
stall-
Luft
d! —
Auge
ienen
arum
mag
Hohe
ensch
egen-
ieren
bernd

ände
sich
ast-
der
ssen,
noch,
chen
hlen

Wird auf den Boden des Kastens ein den beiden Netzhautbildern entsprechendes Doppelbild gelegt, dessen beide Hälften einen und denselben Gegenstand so darstellen, wie ihn die Augen einzeln erblicken würden, so sieht man nicht zwei Bilder, sondern einen Körper. Die Art, wie diese Wirkung zustande kommt, zeigt Fig. 399. Die Strahlen, welche

Fig. 400.



von zwei entsprechenden Punkten (a und b) der beiden Punkte ausgehen, werden beim Durchgange durch die beiden Gläser nach aufsen hin so gebrochen, daß ihre nach rückwärts gerichteten Verlängerungen sich in einem Punkte schneiden. Die Bilder erscheinen auf diese Weise durch Brechung der Strahlen so gegeneinander verschoben, daß sie zusammenfallen. Dadurch entsteht der Eindruck, als ob der dargestellte Körper selbst an ihre Stelle getreten wäre.

Zur Herstellung stereoskopischer Bilder dient der in Fig. 400 dargestellte photographische Apparat mit einer Doppelcamera.

Dauer der Lichteindrücke. Gewisse Erscheinungen beweisen, daß die Lichteindrücke, besonders wenn das Licht stark ist, noch eine Zeitlang *nachempfunden* werden. Man erblickt z. B. feurige Linien, wenn eine glühende Kohle schnell bewegt wird; der Blitz erscheint als Zickzacklinie, obwohl er nur ein blendender Funke ist. Die Farben eines schnell gedrehten Kreisels scheinen in einander überzugehen u. s. w.

Auf der Nachempfindung beruhen auch die optischen Täuschungen, welche sich mittelst der sogen. Wundertrommeln (Stroboskope!) und ähnlicher Apparate hervorrufen lassen. Stellen die durch die Ausschnitte der Trommel betrachteten Bilder die verschiedenen Stellungen eines sich bewegenden Körpers in natürlicher Reihenfolge dar, so scheint dieser die Bewegungen wirklich auszuführen, und zwar um so schneller, je schneller man dreht. Das Stroboskop läßt sich demnach zweckmäßig zur Veranschaulichung eines schnell sich abspielenden Bewegungsvorganges verwenden, z. B. der Wellenbewegung (Quinckes Wellenbilder).

Nachbilder. Wenn man das Auge nach einem starken Lichtreize (Blick in die Sonne) schließt oder auf einen dunklen Hintergrund richtet, so dauert der Reizzustand noch eine Zeitlang an, hierbei geht der zurückbleibende helle Schein durch verschiedene Farben hindurch: *positive Nachbilder*. — Dauert ein starker Lichteindruck lange an, so ermüdet die Netzhaut an der vom Lichte gereizten Stelle. Dies giebt sich dadurch zu erkennen, daß anstatt des betrachteten, hell erleuchteten Gegenstandes ein dunkler Fleck vor dem Auge erscheint, wenn man es von dem Gegenstande ab- und einer mäßig erleuchteten Fläche zuwendet: *negative Nachbild*. War der Gegenstand farbig, so erscheint, wenn man das Auge von der betrachteten Farbe weg auf eine gleichmäßig helle, weiße Fläche wendet, das Nachbild in einer anderen Farbe (Ergänzungsfarbe, § 108), z. B. grün, wenn man längere Zeit einen roten Gegenstand betrachtete (rote Papierstreifen oder rote Blumen auf weißes Papier gehalten und dann plötzlich entfernt).

Irradiation. Da der Reizzustand der Netzhaut sich von der unmittelbar vom Lichte getroffenen Stelle auf die angrenzenden Teile verbreitet, so erscheinen sehr helle Gegenstände auf dunklem Grunde etwas größer als sie wirklich sind. Die Mondsichel z. B. scheint einem größeren Kreise anzugehören, als der übrige nur matt erleuchtete Teil der Mondscheibe; die hellen Felder eines Schachbrettes erscheinen größer als die dunklen.

¹⁾ *στροβελόν* (strobein), im Kreise drehen.

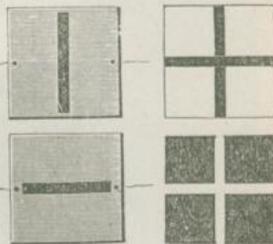
Auf ähnlichen Einwirkungen beruhen die **Kontraste**, d. h. die Veränderungen, welche nebeneinander befindliche Beleuchtungen oder Farben aufeinander ausüben. Eine helle Fläche z. B. erscheint vor einem helleren Hintergrunde dunkler als vor einem dunkleren; Grau sieht auf Weiß dunkler aus als auf Schwarz, auf blauem Grunde gelblich, auf hellgrünem rötlich. Auf Schnee erscheinen die Schatten im gelblichen Lichte der Abendsonne bläulich, bei lebhaftem Abendrot die benachbarten Teile des blauen Himmels grünlich u. s. w. Ein sehr bemerkenswertes Beispiel von Kontrastwirkung sind die **Sonnenflecke**, die nur durch den Kontrast zu der außerordentlichen Helligkeit der Sonnenscheibe dunkel erscheinen.

Manchen Augen fehlt teilweise oder vollständig die Fähigkeit, Farben zu unterscheiden (**Farbenblindheit**). Denjenigen Personen, welche gar keine Farben empfinden, erscheinen alle Farben grau, die gelbe und grüne Farbe am hellsten (**totale Farbenblindheit**). Fehlt nur für gewisse Farben die Empfindung, so bezeichnet man den Zustand als **Rotblindheit**, **Blaubindheit** u. s. w.

Übungsstoff. 1. Warum ist es schwierig, eine Nähnadel einzufädeln, wenn man das eine Auge schließt? — 2. Welche Anwendungen findet das Stereoskop? — 3. Welche optische Täuschung ruft eine tönende Saite, Stimmgabel u. s. w. hervor? — 4. Von 2 Kreiseln sei der eine längs, der andere quer farbig gestreift. Welcher Unterschied giebt sich zu erkennen, wenn beide schnell umlaufen? Erkl.! — 5. In welcher Weise läßt sich durch ein Kartenblatt eine optische Täuschung hervorrufen, wenn auf der einen Seite eine senkrechte, auf der anderen eine wagerechte Linie (Fig. 401), oder auf der einen ein Käfig und auf der anderen ein Vogel gezeichnet ist? — 6. Wenn man ein Blatt Papier, auf welches mehrere nahe aneinander gelegene, kräftig ausgezogene Kreise gezeichnet sind, mit einiger Geschw. kreisförmig verschiebt, so scheinen die Kreise sich zu drehen. Worauf ist diese Ersch. zurückzuführen? — 7. Aus einem dunklen Blatte Papier seien schmale Streifen (etwa in Kreuzform, Fig. 402) ausgeschnitten; diese, sowie das Blatt selbst seien auf eine hell beleuchtete Fensterscheibe geklebt. Scheinbares Größenverhältnis? — 8. Inwiefern kann die Farbe der Bekleidung (z. B. schwarze und weiße Handschuhe) eine Täuschung über die Größe der bekleideten Körperteile hervorrufen?

Fig. 401.

Fig. 402.



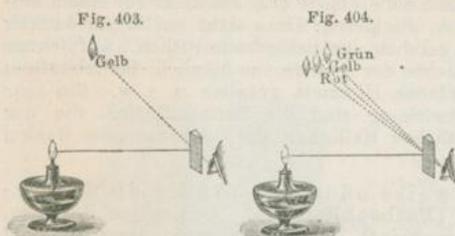
D. Farbenzerstreuung des Lichtes.

§ 108. Zerlegung des Lichtes. Ergänzungsfarben.

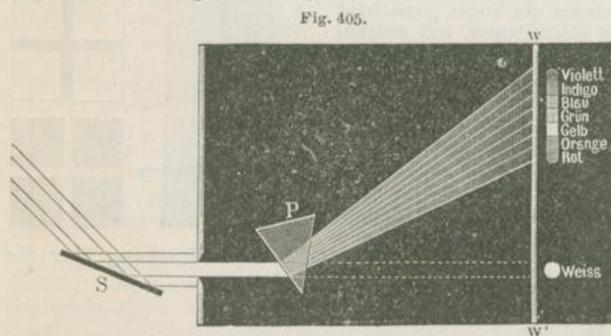
Helle Gegenstände zeigen bei der Betrachtung durch Prismen und stark gekrümmte Linsen einen farbigen Saum; das Sonnenlicht bricht sich farbig in den Tautropfen oder im Wasserstrahl eines Springbrunnens, das Licht heller Flammen in den Glasprismen, mit welchen die Kronleuchter verziert werden. Diese Erscheinungen deuten darauf hin, daß Sonnenlicht sowohl als künstliches Licht verschiedenfarbige Strahlen enthält, welche zusammen einen bestimmten Lichteindruck hervorrufen, ähnlich wie in einem musikalischen Klang Töne von verschiedener Höhe und Beschaffenheit enthalten sind, durch deren Zusammenklingen der eigentümliche Charakter des Tones, den man durch das ausdrucksvolle Wort **Klangfarbe** bezeichnet, bestimmt wird. ¶

***Versuch a.** Betrachtet man eine Spiritusflamme, deren Docht mit Kochsalzlösung getränkt ist, im verdunkelten Zimmer durch ein

Prisma mit großem brechenden Winkel, so erscheint die Flamme stark verschoben und einfarbig gelb (Fig. 403). — Benetzt man den Docht mit einer Lösung von kohlen saurem Lithium oder Chlorlithium, so erblickt man neben der gelben noch eine rote Flamme u. s. w. (Fig. 404.)



Versuch b. 1. Ein schmaler Spalt erscheint im Sonnenlichte, wenn er durch ein Prisma betrachtet wird, zu einem regenbogenfarbigen Bande verbreitert, in welchem die rote Farbe am wenigsten, die violette am stärksten abgelenkt ist. 2. Läßt man durch eine kleine Öffnung im Fensterladen direktes Sonnenlicht in das stark verdunkelte Zimmer dringen, so entsteht auf einem der Öffnung gegenüber aufgestellten weißen Schirme ein weißes Sonnenbild; werden aber die Strahlen durch ein Prisma stark abgelenkt, so entsteht ein regenbogenfarbiger Streifen (Fig. 405). In diesem Streifen lassen sich 7 Farben: *Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo* und *Violett* (oder 3 Grundfarben: *Rot, Gelb* und *Blau*) unterscheiden, welche allmählich ineinander übergehen (Fig. 406). Die Strahlen, welche das Rot erzeugen, sind am wenigsten, diejenigen, durch welche das Violett hervorgerufen wird, am stärksten gebrochen.



richtung) mit der Hand nach dem Stande der Sonne gedreht werden kann (sogen. Heliostat).

Die Zerlegung des Lichtes in seine Farben wird **Farbenzerstreuung**, das durch die Zerlegung entstehende farbige Bild **Spektrum**¹⁾ genannt.

Das weiße Licht besteht aus Strahlen von verschiedener Brechbarkeit, welche nach ihrer Zerstreung verschiedene Farben (**Spektralfarben**) hervorrufen. Die am stärksten brechbaren Strahlen erzeugen die violette, die am schwächsten brechbaren die rote Farbe.

Versuch c. Werden sämtliche Strahlen des Sonnenlichtes nach ihrer Zerstreung mittelst einer Konvexlinse vereinigt (Fig. 407, folg. Seite), so erhält man wieder weißes Licht.

Bem. Eine schnell gedrehte, kreisförmige Scheibe, auf welcher die Farben des Spektrums möglichst rein in Kreisabschnitten aufgetragen sind (Fig. 408, folg. Seite), erscheint nicht in reinem Weiß; warum?

¹⁾ spēcio, sehen, schauen.

Versuch d. Läßt man die Strahlen irgend einer dieser Strahlengattungen durch einen in dem Schirme S_1 befindlichen Spalt auf ein zweites Prisma fallen, so findet abermals eine Brechung statt, wobei jedoch die Farbe unverändert bleibt.

Fig. 407.

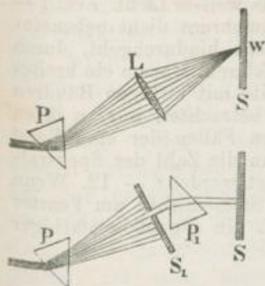


Fig. 408.



Durch Vereinigung aller Spektralfarben entsteht wieder Weifs. — Die Spektralfarben sind einfache Farben; das sie erzeugende Licht ist einfaches Licht.

Versuch e. Verdeckt man bei der Vereinigung der Spektralfarben (Fig. 407) eine Farbe, so entsteht statt weissen Lichtes eine Mischfarbe und zwar Grün, wenn man die roten Strahlen, Rot, wenn man die grünen ausschließt, ferner Blau, wenn man Orange, Violett, wenn man Gelb ausschließt und umgekehrt. — Durch Vereinigung von Rot und Grün, Orange und Blau, Gelb und Violett entsteht wieder Weifs.

Bem. Wird einer der farbigen Kreisausschnitte (Fig. 408) durch ein darauf befestigtes schwarzes Stück Pappe verdeckt, so treten bei schneller Drehung der Scheibe die vorhin angeführten Erscheinungen um so reiner hervor, je mehr die Farben der Scheibe mit den Spektralfarben übereinstimmen.

Weifs entsteht nicht allein durch Mischung aller Spektralfarben, sondern auch dadurch, dafs nur 2 Farben des Spektrums (Rot und Grün, Orange und Blau, Gelb und Violett) miteinander vereinigt werden.

Zwei Farben, welche einander zu Weifs ergänzen, werden Ergänzungsfarben oder Komplementärfarben genannt.

Die Zusammensetzung des weissen Lichtes wurde von Newton (1666) nachgewiesen. Er unterschied die genannten sieben Farben im Sonnenspektrum nach Analogie der Töne der Tonleiter.

Übungsstoff. 1. Warum ist zu dem durch Fig. 405 veranschaulichten Versuche ein gekrümmter Spiegel unbrauchbar? — 2. Warum ist ferner ein auf der Vorderseite versilberter Glasspiegel einem auf der Rückseite geschwärzten Spiegel vorzuziehen? — 3. Einfluß der Entfernung des Schirmes (w , Fig. 405) vom Prisma

Fig. 406.

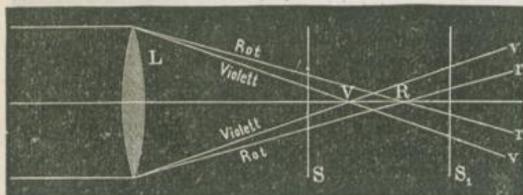


auf die Größe und Lichtstärke des Spektrums? Grund! — 4. Welchen Vorteil bietet demnach die Anwendung eines Prismas, das aus einem das Licht möglichst stark brechenden Stoffe besteht? — 5. Einfluss der Größe des brechenden Winkels? — 6. Wie erklärt es sich, daß die rote Farbe bei Versuch a (Fig. 404) von der brechenden Kante des Prismas ab-, bei Versuch b₂ (Fig. 405) dagegen derselben zugewandt erscheint? — 7. Wenn man bei Versuch b₂ das Prisma schnell hin- und herbewegt, so sieht man in der Mitte des farbigen Streifens weißes Licht. Erkl.! — 8. Welche Ersch. wird sich zeigen, wenn man zwei oder mehrere dicht nebeneinander liegende schmale Öffnungen, durch welche Sonnenlicht hindurchgeht, durch ein Prisma betrachtet? Erkl.! — 9. Versuche hiernach zu erklären, warum ein breites Strahlenbündel nahe hinter dem Prisma nur ein weißes Bild mit farbigen Rändern liefert, desgl. warum eine weiße Fläche durch ein Prisma betrachtet, nur an ihren Rändern farbig erscheint. — 10. Warum sieht in solchen Fällen der eine Rand rötlichgelb, der andere blauviolett aus? — 11. Warum kann die Zahl der Spektralfarben als eine mehr oder weniger willkürliche bezeichnet werden? — 12. Wenn eine etwa halb mit W. gefüllte Trinkflasche im direkten Sonnenlichte am Fenster steht, so ist auf dem Fußboden des Zimmers gewöhnlich ein regenbogenfarbiger Lichtschein sichtbar. Erklärung!

§ 109. Chromatische Abweichung. Achromatische Prismen und Linsen.

Da mit der Brechung des Lichtes zugleich eine Farbenzerstreuung eintritt, so müssen die durch einfache Linsen erzeugten Bilder außer derjenigen Undeutlichkeit, welche durch zu starke Brechung der Randstrahlen hervorgerufen wird (sphärische Abweichung, Seite 252), noch eine andere Undeutlichkeit zeigen, welche durch die ungleiche Brechung der das Licht zusammensetzenden farbigen Strahlen entsteht. Die Bilder erhalten dadurch farbige Ränder (Fig. 370, bei starker Vergrößerung). Dies erklärt sich daraus, daß die Brennweite einer Linse für die einzelnen Strahlengattungen nicht genau dieselbe ist (Fig. 409), wie sich durch folgenden Versuch nachweisen läßt.

Fig. 409.

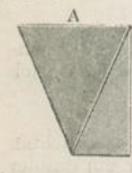


derselben (auf S₁) violett gefärbt.]

Versuch a. Läßt man im verdunkelten Zimmer Sonnenstrahlen durch eine Sammellinse hindurchgehen, so ist der äußere Rand des Strahlenkegels innerhalb der Brennweite der Linse (auf dem Schirm S) rot, außerhalb

derselben (auf S₁) violett gefärbt.] Die durch eine einfache Linse erzeugten Bilder haben infolge der Farbenzerstreuung farbige Ränder: **Chromatische¹⁾ Abweichung.**

Fig. 410.



Versuch b. Werden 2 Prismen aus verschiedenen Glassorten, ein Kron- und ein Flintglasprisma, von denen ersteres (Fig. 410, A) einen nahezu doppelt so großen brechenden Winkel hat, als letzteres (B), in

¹⁾ χρομα (chrōma), Farbe.

umgekehrter Lage zu einem Prisma vereinigt, so erscheinen die Ränder der durch sie betrachteten Gegenstände zwar verschoben, aber nicht farbig.

Dies erklärt sich daraus, daß Kronglas die Strahlen zwar ebenso stark bricht, aber viel weniger zerstreut als Flintglas (siehe die Spektren, Fig. 411). Infolgedessen ist die brechende Kraft jener beiden Prismen ungleich, die Farbenzerstreuung aber gleich. Die Ablenkung der Strahlen, welche durch das eine der beiden Prismen hindurchgehen, wird daher bei der entgegengesetzten Lage der Prismen durch das andere Prisma nur teilweise, die Farbenzerstreuung aber ganz aufgehoben. *Das Ergebnis ist also eine Lichtbrechung ohne Farbenzerstreuung.* — Dasselbe läßt sich auch dadurch erreichen, daß man eine Konvexlinse von Kronglas (Fig. 412) mit einer schwächer gekrümmten Konkavlinse von Flintglas zu einer Sammellinse verbindet.

Fig. 411.

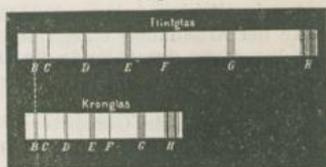
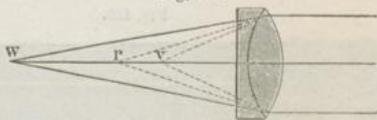


Fig. 412.



Denkt man sich in Fig. 410 das Prisma B an die linke Seite gelegt, so entspricht das Doppelprisma der unteren Hälfte der in Fig. 412 dargestellten Doppellinse. Durch die Konvexlinse allein würden die violetten Strahlen in v , die roten in r vereinigt werden; die Konkavlinse bewirkt, daß diese beiden Brennpunkte in größerer Entfernung von der Linse zusammenfallen, indem sie die vorher stärker nach innen gebrochenen violetten Strahlen um ebensoviel stärker nach außen ablenkt.

Der Brechungsindex für Luft und Kronglas ist ungefähr $\frac{3}{2}$, für Luft und Flintglas $\frac{3}{2}$ (Flintglas enthält mehr Bleioxyd als Kronglas).

Eine Verminderung der chromatischen Abweichung läßt sich auch schon dadurch erreichen, daß man zwei Konvexlinsen von derselben Glassorte in passendem Abstände miteinander verbindet (siehe Fig. 381, o und o_1). Man denke sich in Fig. 412 die Konkavlinse durch eine konvexe Linse ersetzt; dann würden die beiden Brennpunkte r und v durch die zweite Konvexlinse (umgekehrt wie vorher) näher an die Linsen herangerückt und zwar der Brennpunkt der roten Strahlen stärker als der Brennpunkt der violetten, weil erstere durch jene Linse eine stärkere Brechung erleiden als letztere.

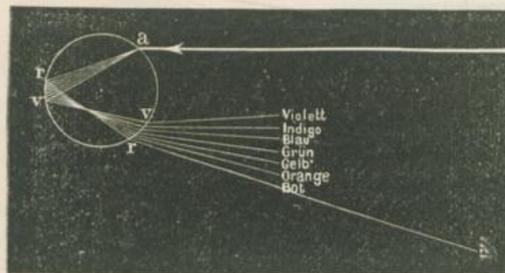
Aus Kron- und Flintglas zusammengesetzte Linsen geben Bilder ohne farbige Ränder und werden deshalb **achromatische** (farbenfreie) Linsen genannt. Die Herstellung wirklich brauchbarer Mikroskope und Linsenfernrohre ist erst durch die Erfindung achromatischer Linsen (1757) ermöglicht worden. Newton hielt die Herstellung achromatischer Linsen-Objektive noch für unmöglich und wandte deshalb zu seinen astronomischen Beobachtungen Spiegelfernrohre an.

Übungsstoff. 1. Wodurch wird die sphärische Abweichung des Lichtes beim menschlichen Auge verhütet? — 2. Betrachtet man über einen weißen K. hinweg (z. B. Stückchen Papier auf einer Spitze) einen viel weiter entfernten Gegenstand längere Zeit mit einem Auge, so erscheint der weiße K. rötlich umrandet; wann aber ohne solchen Rand? Inwiefern ist dies ein weiterer Grund für die Bedeutung des Akkommodationsvermögens? — 3. Warum haben die Lichtbilder, welche durch gekrümmte Spiegel entstehen, keine farbigen Ränder? — 4. Von zwei Lupen bestehe die eine aus einer einzelnen, die andere aus zwei einfachen konvexen Linsen; die Vergrößerung sei bei beiden dieselbe. Welche von denselben ist vorzu-

ziehen, u. w.? — 5. Wie ist diese Wirkung der zusammengesetzten Linse zu erklären? — 6. Zwei Prismen, von denen das eine aus Kron-, das andere aus Flintglas bestehe, seien nach Fig. 410 miteinander verbunden; ihre brechenden Winkel seien gleich. Optische Wirkung? — 7. Das Prisma A, Fig. 410, bestehe aus Flintglas, das Prisma B aus Kronglas. Optische Wirkung? — 8. Inwiefern läßt sich aus Versuch b schließen, daß die zerstreue Wirkung des Flint- und Kronglases der brechenden Wirkung dieser beiden Glassorten nicht proportional ist? — 9. Vgl. die Stärke der Krümmung einer Linse aus Flintglas mit der Krümmung einer Linse aus Kronglas, wenn durch beide die Strahlen gleichstark gebrochen werden. — 10. Desgl. die Stärke der Strahlenbrechung, wenn beide gleichstark gekrümmt sind. — 11. Ferner die Stärke der Farbenzerstreuung bei gleicher Krümmung der Linsen, und umgekehrt. — 12. Welche Glassorte ist hiernach zu den einfachen optischen Instrumenten (Lupen, Brillen u. dgl.) am besten geeignet?

§ 110. Die Farbenerscheinungen in der Atmosphäre.

Fig. 413.

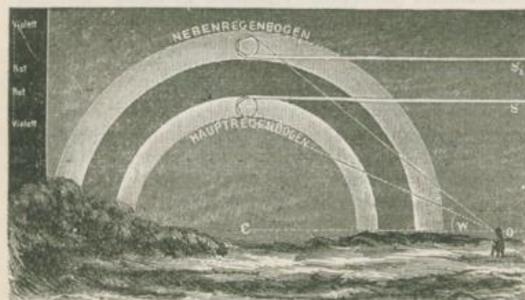


Fällt direktes Sonnenlicht auf einen Wassertropfen, etwa auf einen Tautropfen, so wird ein Teil der Strahlen von der vorderen Fläche wieder zurückgeworfen, während ein anderer Teil in den Tropfen eindringt. Von diesen Strahlen erleiden manche außer der Brechung und Farbenzerstreuung an der Rückwand des Tropfens noch eine totale Reflexion (Fig. 413), sodaß sie an der beleuchteten Seite desselben nach abermaliger Ablenkung wieder austreten und hier einen farbigen Glanz hervorrufen.

In welcher Farbe der Tropfen erscheint, hängt von der Stellung ab, die das Auge gegen den Tropfen einnimmt (siehe die Figur), während die Stärke des Farbeindrucks offenbar dadurch bedingt ist, wieviele gleichfarbige Strahlen ins Auge dringen. Die Zahl dieser Strahlen muß um so größer sein, je weniger die Richtungen derselben von einander abweichen.

Hierdurch läßt sich die bekannte Erscheinung des **Regenbogens**

Fig. 414.



(Fig. 414) erklären, welche wir wahrnehmen, wenn vor uns eine regnende Wolke und hinter uns die Sonne steht. Fiele nämlich ein einzelner Regentropfen nahe vor uns herab, so würde er, wenn wir ihn mit dem Auge verfolgen könnten, auf einer gewissen Strecke seines Weges wie ein Tautropfen farbig glänzen, und

zwar würden (nach obiger Figur) sämtliche Farben des Spektrums vom Rot bis zum Violett nacheinander sichtbar werden. Diese Farbeindrücke können bei gröfserer Entfernung des Tropfens jedoch nur dann deutlich sein, wenn zahlreiche Strahlen derselben Farbe ins Auge dringen, also wenn das in den Tropfen eingedrungene Sonnenlicht so wieder austritt, dafs die gleichfarbigen Strahlen parallel sind. Dies ist nur bei einer bestimmten Lage des Tropfens gegen Sonne und Auge möglich. Dafs wir beim Regenbogen alle Farben gleichzeitig sehen, kann somit nur eine Folge sein von dem Zusammenwirken zahlreicher Tropfen, welche verschiedene Lagen gegen unser Auge einnehmen. Tropfen, welche gegen Sonne und Auge eine gleiche Lage haben, d. h. welche so liegen, dafs die in sie eindringenden Strahlen des weissen Sonnenlichtes mit den ins Auge eintretenden farbigen Strahlen gleiche Winkel bilden, müssen auch gleiche Farbeindrücke hervorrufen.

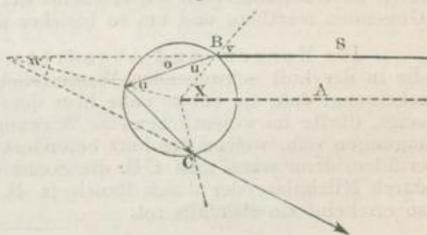
Denken wir uns nun z. B. einen Tropfen, welcher rote Strahlen in unser Auge sendet, durch gerade Linien mit dem Mittelpunkte der Sonne und der Pupille unseres Auges verbunden und ebenfalls durch Sonne und Auge eine Gerade gelegt, so ist durch den entstehenden Winkel ($\sphericalangle w$) die gegenseitige Lage von Sonne, Tropfen und Auge bestimmt. Dieser Winkel ist offenbar derselbe für alle Regentropfen, welche einem Kreisbogen angehören, dessen Mittelpunkt auf einer durch die Sonne und das Auge gehenden geraden Linie (OC, Fig. 414) liegt.*) Die Gröfse dieses Winkels beträgt, wie sich berechnen läfst, für die roten Strahlen ungefähr 42° , für die violetten ungef. 40° , im Mittel also 41° .†) Jeder Farbenstreifen mufs demnach die Form eines

*) Man denke sich zunächst, die Ebene, in welcher die angedeuteten Strahlen liegen, stehe (durch Drehung um eine durch C gehende senkrechte Achse) senkrecht auf der Bildfläche. Hierauf stelle man sich vor, sie werde um OC als Achse gedreht.

†) Bestimmung der Gröfse des Winkels w (Fig. 415): $\sphericalangle \frac{w}{2} = u - o$ (da u Außenwinkel des Dreiecks ist), folglich $\sphericalangle w = 2u - 2o$. Nun ist $\sphericalangle o = v - u$, mithin $\sphericalangle w = 2u - (2v - 2u) = 4u - 2v$.

Fig. 415.

Es ist nun $\frac{\sin v}{\sin u}$ (Brechungsexponent n) für rote Strahlen = $\frac{108}{81}$, für violette = $\frac{109}{81}$. Für jeden Einfallswinkel läfst sich also der Brechungswinkel und aus beiden $\sphericalangle w$ berechnen. Führt man diese Rechnung für Strahlen aus, die in immer gröfserem Abstände von der Achse A parallel zu dieser einfallen, deren Einfallswinkel also von Null an zunimmt, so findet man:



1) dafs $\sphericalangle w$ von Null bis zu einer bestimmten Grenze wächst und dann wieder abnimmt, dafs bis dahin also die aus dem Tropfen austretenden gleichfarbigen Strahlen zweier benachbarten parallel einfallenden Sonnenstrahlen divergieren (unmerklicher Farbeindruck).

2) dafs in der Nähe jener Grenze benachbarte Strahlen derselben Farbe bei ihrem Austritte immer schwächer divergieren und bei einem bestimmten Einfallswinkel ($\sphericalangle v$, dessen Cosin. = $\sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$ oder dessen Sinus = $\sqrt{\frac{4 - n^2}{3}}$ nach

er-
linter-
linter-
aus
der
l. die
aus
esgl.
erner
nge-
nten

ire.
licht
ofen,
ofen,
hlen
äche
väh-
den
esen
sche
und
an
fens
eten
hier

ung
end
ist,
hlen
ein-

gens
che
enn
en-
ter
eht.
zel-
ahe
irde
dem
ten.
ecke
au-
und

Kreisbogens haben, dessen scheinbarer Radius immer derselbe ist; sämtliche Farbstreifen müssen einander wie Teile konzentrischer Kreise umfassen, und zwar muß der violette Streifen den inneren, der rote den äußeren Bogen bilden, da nach Fig. 414 die violetten Strahlen bei ihrer größeren Brechbarkeit nur aus tieferen, d. h. dem Mittelpunkte des Regenbogens näher stehenden Tropfen ins Auge gelangen können. Der Mittelpunkt des Regenbogens liegt hiernach auf einer durch die Sonne und das Auge des Beobachters gehenden geraden Linie.

Der Glanz, in welchem uns der Regenbogen erscheint, hängt von der Anzahl der ins Auge gelangenden gleichfarbigen Strahlen, also von der Dicke der Regenwand ab.

Fig. 416.

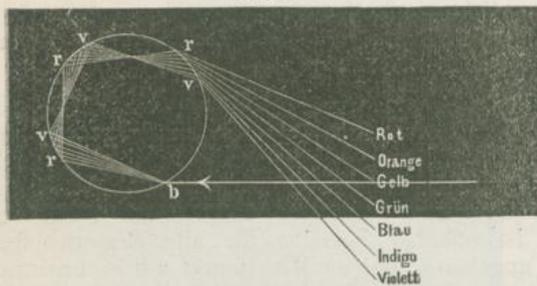


Fig. 416 dargestellte Tropfen falle vor den Augen nieder.)

Die farbigen Ringe (Höfe), welche man häufig um den Mond, seltener dagegen um die Sonne beobachtet, entstehen durch Brechung und farbige Zerstreuung des Lichtes in feinen Eisnadeln, die wie Prismen wirken. Sie sind am häufigsten und schönsten in den Polargegenden zu beobachten.

Blaue Farbe des Himmels. Morgen- und Abendröte.

Die blaue Farbe des Himmels erklärt sich daraus, daß die Luft nicht vollkommen durchsichtig ist und vorzugsweise die blauen Strahlen zurückwirft. Dieses Blau scheint durch Wasserdämpfe wesentlich verstärkt, durch Wasserteilchen geschwächt zu werden, denn in den Tropengegenden, wo die Luft sehr reich an Wasserdämpfen ist, erscheint der Himmel tiefblau, während er in kälteren Gegenden mattblau und um so bleicher aussieht, je kälter die Luft ist.

Die Morgen- und Abendröte des Himmels scheint namentlich durch die in der Luft schwebenden Wasserteilchen hervorgerufen zu werden. — Die Erscheinung, daß die Sonne nahe über dem Horizonte sehr häufig rötliche Färbung zeigt, dürfte im wesentlichen eine Wirkung der Staubteilchen und sonstiger Verunreinigungen sein, welche die Luft besonders in den unteren Schichten der Atmosphäre erfüllen, denn wenn man z. B. die Sonne durch eine mit Ruß bedeckte Glasscheibe, durch Milchglas oder durch Rauch (z. B. sogen. Höhenrauch) hindurch betrachtet, so erscheint sie ebenfalls rot.

Übungstoff. 1. Auf einer mit Tau benetzten Wiese erscheinen von einem bestimmten Standpunkte aus nur immer gewisse Tropfen farbig; w.? — 2. Wenn man sich einem farbig glänzenden Tautropfen mehr und mehr nähert, so ändert sich auch der Farbeindruck. Erkl.! — 3. Inwiefern hängt es von der Entfernung

trigon. Rechnung) die benachbarten gleichfarbigen Strahlen parallel austreten; dieser Winkel ($\angle v$) ist für rote Strahlen gleich $59^{\circ} 23'$, $\angle w = 42^{\circ} 2'$, für violette Strahlen gleich $58^{\circ} 40'$, $\angle w = 40^{\circ} 16'$ (deutlicher Farbeindruck).

des Tropfens ab, ob eine oder mehrere Farben in demselben sichtbar sind? — 4. Wie muß sich bei einem Regenbogen die durch einen einzelnen Tropfen der Regenwand hervorgerufene Farbenerscheinung ändern, indem der Tropfen vor uns niederfällt, u. w.? — 5. Unter welcher Bedingung kann in dem Wasserstaube eines Springbrunnens oder eines Wasserfalles ein Regenbogen entstehen? — 6. Wie erklärt es sich, daß der Regenbogen an der äußeren Seite rot, an der inneren violett aussieht? — 7. Warum kann statt des Bogens kein gerader (senkrechter oder wagemechter) Farbstreifen entstehen? — 8. Warum kann Beobachtern, welche weit voneinander entfernt sind, der Regenbogen nicht genau an derselben Stelle erscheinen? — 9. Wovon hängt es ab, wie hoch der Regenbogen am Himmel steht? — 10. Bei welcher Sonnenhöhe muß der obere Rand des Regenbogens mit dem Horizonte zusammenfallen? (Man denke sich die Ebene, in welcher S, S₁, OC u. s. w. liegen, Fig. 414, um O so gedreht, daß sich C abwärts bewegt.) — 11. Wann bildet der Regenbogen einen Halbkreis? (Einfluß der Jahreszeit!) — 12. Auf dem Gipfel sehr hoher Berge und vom Luftballon aus ist bisweilen ein nahezu vollständiger Kreis sichtbar. Erkl.! — 13. Inwiefern hängt es a. mit der Jahreszeit, b. mit der geogr. Lage eines Ortes zusammen, wie lange am Tage ein Regenbogen entstehen kann? — 14. Wie mag es sich erklären, daß die blaue Farbe des Himmels bei klarem Wetter im Sommer, besonders nach einem Regen, dunkler erscheint als im Winter? — 15. Wäre die Luft für alle Sonnenstrahlen vollkommen durchlässig, so müßte der Himmel farblos (schwarz) erscheinen; w.? (Erscheinungen im Hochgebirge.)

§ 111. Absorption des Lichtes. Natürliche Farben der Körper. Fluorescenz. Phosphorescenz. Vergleicht man die Lichtmengen miteinander, welche von den Körpern zurückgeworfen und durchgelassen werden, so ergeben sich mancherlei Unterschiede. Während z. B. ein gegen die Sonne gehaltener Spiegel die Lichtstrahlen ohne merkliche Abnahme der Lichtstärke zurückwirft, verschwindet der Lichtschein vollständig, wenn man den Spiegel durch eine mattschwarze Platte ersetzt. Beide Körper lassen kein Licht durch sich hindurch. Durch farblose Fensterscheiben wird das Tageslicht im Zimmer kaum merklich geschwächt, während farbige Scheiben die Zimmer verdunkeln. Hieraus geht hervor:

Die Körper vermögen das in sie eindringende und von ihnen zurückgehaltene (absorbierte) Licht ganz oder teilweise auszulöschen.

Die meisten Körper, von denen Licht in unser Auge gelangt, erscheinen uns in gewissen Farben. In welcher Farbe uns ein Körper im Tageslichte erscheint, hängt offenbar davon ab, welche von den farbigen Bestandteilen des in ihn eingedrungenen Lichtes ausgelöscht werden, denn nur der nicht ausgelöschte Teil kann, indem er zurückgeworfen oder durchgelassen wird, als Licht in unser Auge gelangen. Geeignete Versuche ergeben nun, daß ein farbiger Körper von dem im Sonnenlichte enthaltenen farbigen Strahlen ungleiche Mengen auslöscht, sodaß also der Farbeindruck durch das Zusammenwirken verschiedener Bestandteile des Lichtes entsteht, ähnlich wie durch verschiedene einfache Töne die Klangfarbe hervorgerufen wird.

Versuch. Läßt man das Sonnenspektrum auf farbiges Papier fallen, oder schaltet man nahe am Prisma eine farbige Glasscheibe in das Strahlenbündel ein, so erscheinen gewisse Farben verdunkelt, andere hell. — Schmale einfarbige Papierstreifen oder dergl. erscheinen auf schwarzem Grunde, durch ein stark brechendes Prisma betrachtet, mehrfarbig.

Die Farbe, welche ein Körper im Tageslichte zeigt, wird seine natürliche Farbe genannt.

Die natürliche Farbe eines Körpers ist durch die von ihm zurückgeworfenen oder durchgelassenen Strahlen bedingt. Die Körperfarben sind Mischfarben, deren Bestandteile das Auge in der natürlichen Farbe nicht zu erkennen vermag.

Ein durchsichtiger Körper erscheint uns im Tageslichte farbig, wenn er nur gewisse Strahlengattungen, farblos, wenn er alle farbigen Bestandteile des Lichtes in gleichem Verhältnisse durchläßt.

Ein undurchsichtiger Körper erscheint weifs, wenn er alle farbigen Bestandteile des Sonnenlichtes in gleichem Verhältnisse unregelmässig zurückwirft, farbig, wenn er nur gewisse Strahlengattungen zurückwirft, schwarz, wenn gar keine Strahlen zurückgeworfen, also alle Strahlen von ihm absorbiert werden.

Grau ist ein lichtschwaches Weifs; es entsteht, wenn der Körper von allen Strahlen des Sonnenlichtes in demselben Verhältnis eine grössere Menge absorbiert.

Betrachten wir farbige Körper in verschiedenem Lichte, so zeigt sich die überraschende Erscheinung, dafs die Farben der Körper sich mit dem Lichte ändern. Im gewöhnlichen Lampenlichte z. B. sieht Gelb beinahe wie Weifs aus, Blau wird darin leicht mit Grün verwechselt. Pflanzenblätter erscheinen bei bengalischer Beleuchtung in rotem Lichte beinahe schwarz, in gelbem grau, in grünem wieder grün u. s. w.

***Versuch.** Im vollständig dunklen Zimmer erscheinen die Farben einer Spektraltafel, bunter Bilder, Blumen oder dergl., wenn sie durch eine mit Kochsalzlösung gefärbte Weingeistflamme beleuchtet werden, mehr oder weniger grau; nur die gelbe Farbe verändert sich nicht u. s. w.

Ein Körper kann nur dann in seiner natürlichen Farbe erscheinen, wenn das ihn treffende Licht Strahlen dieser Farbe enthält. Im einfarbigen Lichte verschwinden alle Farbenunterschiede der Körper.

Die tägliche Erfahrung lehrt, dafs dunkle Körper sich im Sonnenlichte stärker erwärmen als helle. (Beispiele!) Da bei solcher Erwärmung Licht durch Absorption verschwindet, so liegt der Gedanke nahe, dafs aus dem vernichteten Lichte Wärme entstanden sein könne. Genaue Versuche lassen schliessen, dafs überall, wo Licht von einem Körper verschluckt wird, eine Verwandlung des absorbierten Lichtes und zwar in den meisten Fällen eine Verwandlung des Lichtes in Wärme stattfindet (vgl. § 146).

Fluorescenz und Phosphorescenz. Gewisse Körper vermögen Licht, das in sie eingedrungen ist, wieder auszustrahlen und zwar manche nur so lange, als die Bestrahlung andauert, andere auch noch nach der Bestrahlung. Zu ersteren gehören insbesondere verschiedene durchsichtige Flüssigkeiten. Petroleum z. B. strahlt im Sonnenlichte ein bläuliches Licht aus, desgl. Wasser, in welchem Rinde von Rofskastanien eine Zeitlang gelegen hat. Wirft man zerkleinerte Pflanzenblätter in Weingeist, so nimmt man in der nach einiger Zeit grün gefärbten Flüssigkeit beim Einfallen von Sonnenstrahlen (Strahlenkegel mittelst Linse) einen

blutroten Schimmer wahr. Das gelbliche Uranglas schimmert bei der gewöhnlichen Tagesbeleuchtung hellgrün, Flußspat blau u. s. w. Diese Körper besitzen die Eigenschaft, das in sie eingedrungene Licht zu verändern und erscheinen demnach im durchgehenden Licht in einer anderen Farbe. *Man bezeichnet diese Erscheinung als Fluorescenz; sie findet nur während der Bestrahlung des Körpers statt.*

Körper, welche noch nach der Bestrahlung fortzuleuchten vermögen, sind z. B. die sogen. Leuchtsteine (Lichtsauer), die dadurch hergestellt werden, daß man alkalische Erden (Kalk, Strontian oder Baryt) mit Schwefel glüht. Dieselben strahlen tagelang ein mattes Licht aus, wenn sie nur kurze Zeit dem Sonnenlichte ausgesetzt waren. Man verwendet sie zur Herstellung von leuchtenden Zifferblättern auf Taschenuhren, zu Feuerzeug-Behältern u. s. w. *Die Erscheinung des Selbstleuchtens eines Körpers nach der Bestrahlung wird Phosphorescenz genannt.*

Bem. Das Leuchten des Phosphors wird durch eine langsame Oxydation, also durch einen chemischen Vorgang hervorgerufen. Faulendes Holz phosphoresciert durch das leuchtende Wurzelgeflecht von Pilzen, welche darin wuchern, während das Leuchten des Meeres durch zahllose mikroskopische Organismen verursacht wird. — Die Fluorescenz hat ihren Namen von dem Mineral Flußspat (Fluorcalcium), die Phosphorescenz vom Phosphor.

Übungsstoff. 1. Welche K. verhalten sich gegen den Schall ähnlich wie undurchsichtige K. gegen das Licht? — 2. Inwiefern kann man sagen, daß wir an farbigen K. nur Reste vom Sonnenlichte erblicken? — 3. Vgl. die Entstehung der Körperfarben und Klangfarben miteinander. — 4. Einfluß auf das Spektrum des Sonnenlichtes, wenn man die Strahlen durch eine farbige Glasscheibe leitet, deren Farbe eine möglichst reine Spektralfarbe ist? — 5. In Wirklichkeit zeigt das Spektrum bei diesem Verfahren stets mehr oder weniger deutlich noch andere Farben; w.? — 6. Wie erklärt es sich, daß die Farbenunterschiede in einfarbigem Lichte verschwinden? — 7. Gegen eine von farbigen Glasstreifen umgebene durchsichtige und farblose Glasscheibe schein die Sonne. Welche Unterschiede werden sich dann zu erkennen geben, wenn man nach längerer Zeit die Hand dagegen hält? Erkl.! — 8. Was läßt sich daraus schließen, daß eine farblose durchsichtige Glasscheibe ebenso wie ein weißer K. sich in der Sonne nach und nach erwärmt? — 9. Wird sich ein mattschwarzer oder ein polierter schwarzer K. in der Sonne schneller erwärmen, u. w.? — 10. Legt man rotes und grünes Glas aufeinander, so ist es fast ganz undurchsichtig; w.? — 11. Unterschied in der Lichtwirkung einer grauen und einer farbigen Schutzbrille? (Einfluß auf die Farbeindrücke!) — 12. Wenn man einen gelben Farbstoff mit einem blauen mischt, so erhält man Grün. Inwiefern ist dies nach § 108 (Versuch e) auffällig, und wie erklärt sich die Abweichung? — 13. Vgl. die Fluorescenz und Phosphorescenz mit der Resonanz und dem Mitklingen.

§ 112. Reines Sonnenspektrum. Spektrum irdischer Körper. Spektralanalyse. Da das Sonnenlicht aus einer großen Anzahl verschiedenfarbiger Strahlen besteht, so muß das Sonnenspektrum aus ebensoviele Bildern zusammengesetzt sein, von denen jedes seine besondere Farbe hat. Diese Sonnenbilder müssen um so mehr übereinander fallen, je größer sie sind und je geringer die Zerstreuung der farbigen Strahlen ist. Man erhält daher nicht die reinen Spektralfarben, wenn man ein Sonnenspektrum nach Anleitung von Fig. 406 darstellt; zu diesem Zwecke muß man vielmehr ein **reines Spektrum** entwerfen, d. h. *ein solches, in welchem die einzelnen Farben nicht übereinander fallen.*

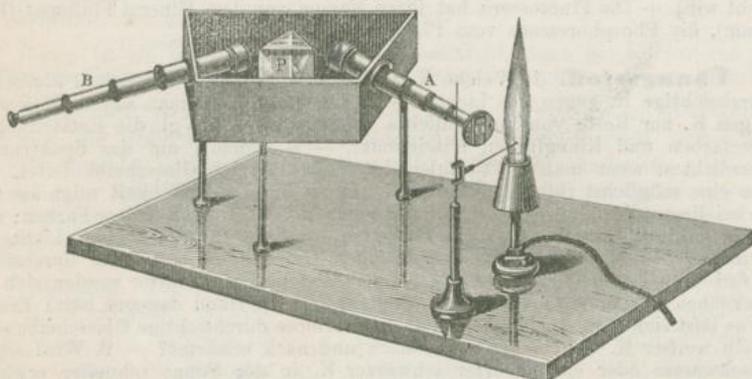
Versuch a. Um ein reines Spektrum zu entwerfen, läßt man die Sonnenstrahlen durch einen schmalen Spalt auf eine Sammellinse fallen,

welche vom Spalt um mehr als ihre Brennweite entfernt ist. Die durch die Linse konvergierend gemachten Strahlen werden durch ein mit seiner brechenden Kante parallel dem Spalt gestelltes Prisma so aufgefangen, daß die Ablenkung am kleinsten ist. Das entstehende Spektrum enthält zahlreiche feine, dem Spalt parallele dunkle Linien, unter denen einige besonders hervortreten (siehe die Spektraltafel, auf welcher die deutlichsten Linien mit den Buchstaben A bis H bezeichnet sind).

Die Entdeckung, daß das reine Sonnenspektrum dunkle Querlinien enthält, wurde 1802 von Wollaston gemacht, Fraunhofer bestimmte diese Linien genau (1814) und erkannte ihre Bedeutung für die Wissenschaft. Nach ihm werden dieselben **Fraunhofersche Linien** genannt.

Zur Untersuchung des Sonnenlichtes, sowie auch des Lichtes anderer Lichtquellen bedient man sich gewöhnlich eines sogen. **Spektralapparates** oder **Spektroskopes** (Fig. 417). Ein solcher Apparat besteht im wesentlichen aus einem oder

Fig. 417.



mehreren *Prismen*, einem *Spaltrohre* und einem *Fernrohre*. Das Prisma (P) ist in einem innen geschwärzten Kasten aufgestellt, in dessen Wandung an zwei einander gegenüberliegenden Stellen das Spaltrohr und das Fernrohr befestigt sind. Das Spaltrohr (A) ist vorn durch eine mit engem Spalt versehene Metallplatte, hinten durch eine Konvexlinse verschlossen, deren Brennpunkt mit dem Spalt zusammenfällt, sodafs die Strahlen, nachdem sie durch die Linse hindurchgegangen sind, eine parallele Richtung haben. — Durch das Fernrohr (B) wird das Spektrum in mäfsiger Vergrößerung betrachtet.

Zur Untersuchung des Lichtes glühender Körper stellt man vor dem Spalt eine nicht leuchtende Flamme (Bunsenbrenner) auf. Ein kleines Stativ dient zum Halten eines Platindrahtes, mit welchem man die zu erhaltenden Körper in die Flamme bringt.

Untersucht man mittelst des Spektroskopes das Licht irdischer Lichtquellen, so ergiebt sich folgendes:

a. Das Licht eines weifsglühenden festen oder flüssigen Körpers (etwa eines glühenden Platindrahtes) erzeugt ein **zusammenhängendes Spektrum**, das alle Farben des Sonnenspektrums enthält.

Das Licht weifsglühender Körper enthält alle Strahlengattungen.

Im Spektrum gelbglühender Körper, wie z. B. der glühenden Kohlentheilchen unserer Flammen, fehlt das blau-violette Ende fast ganz.

b. Das Licht glühender Gase oder Dämpfe erzeugt eine mehr oder minder große Anzahl durch dunkle Zwischenräume voneinander getrennter heller Linien oder Streifen: **Linien- oder Streifenspektrum.**

In dem Lichte glühender Gase oder Dämpfe fehlen demnach gewisse Strahlengattungen.

Durch Natriumdämpfe z. B. entsteht eine sehr helle gelbe, durch Lithiumdämpfe eine deutliche rote und eine schwache orangefarbige Linie; das Spektrum der Kaliumdämpfe enthält eine rote und eine violette Linie (siehe die Spektraltafel). Wasserstoff zeigt eine rote und zwei blaue Linien. Das Spektrum des Sauerstoffes und des Stickstoffes ist aus einer größeren Anzahl farbiger Linien zusammengesetzt. Bei Dämpfen von schweren Metallen, z. B. Eisendämpfen, beläuft sich die Anzahl der farbigen Linien auf mehrere Hundert.

Da jeder Stoff im Spektrum bestimmte Linien giebt, welche stets an derselben Stelle erscheinen, so ist man imstande, aus dem Auftreten bestimmter Spektrallinien auf das Vorhandensein gewisser Stoffe zu schließen und zwar genügt eine verschwindend kleine Menge des betreffenden Stoffes zur Hervorbringung der charakteristischen Linien (0,000000 mg Natrium oder 1,000000 mg Lithium ist spektroskopisch noch nachweisbar). Man kann demnach die chemischen Bestandteile verbrennender Körper durch Untersuchung ihres Spektrums erforschen. Dieses von Bunsen und Kirchhoff (1869) erfundene Verfahren führt den Namen **Spektralanalyse**. Durch dasselbe sind verschiedene vorher unbekannte chemische Grundstoffe entdeckt worden, so von Bunsen selbst das Cäsium und Rubidium (siehe die Spektraltafel) und von anderen Forschern das Thallium, Indium und Gallium.

c. Leitet man das Licht eines weißglühenden Körpers durch das Licht glühender Gase oder Dämpfe, so werden die Strahlen derjenigen Farben absorbiert, welche die Gase oder Dämpfe selbst besitzen. Dadurch entstehen dunkle Linien in dem sonst zusammenhängenden Spektrum an denselben Stellen, an denen durch das Gas oder den Dampf allein farbige Linien entstehen würden: *Umkehrung der Spektrallinien*. Ein derartiges Spektrum heißt **Absorptionsspektrum**.

Durch glühende Gase oder Dämpfe werden diejenigen Lichtstrahlen absorbiert, welche die Gase und Dämpfe selbst auszustrahlen vermögen.

Geht weißes Licht z. B. durch glühende Natriumdämpfe, so entsteht an Stelle der hellen Natriumlinie eine dunkle Linie; nach Entfernung des weißen Lichtes erscheint diese Linie wieder farbig u. s. w.

Dafs bei der Umkehrung der Spektrallinien die sonst farbigen Linien dunkel erscheinen, hat nicht in einem vollständigen Fehlen des Lichtes, sondern nur in einem Mangel an Lichtstärke seinen Grund. Das Licht des glühenden Gases oder Dampfes nimmt nämlich durch den scheinbar ausgelöschten Teil des weißen Lichtes in Wirklichkeit an Stärke zu, ohne jedoch dadurch die Lichtstärke des weißglühenden Körpers selbst zu erreichen. Die dunklen Linien sind demnach farbige Schatten einer schwachen Lichtquelle auf sehr hellem Grunde, welche unser Auge als solches nicht zu erkennen vermag (Kontrastwirkung). Verwandte Erscheinung: Schatten einer Kerzenflamme auf weißer Wand in direktem Sonnenlichte.

Absorptionsspektralanalyse. Wenn beim Durchgange von allfarbigem Lichte durch feste oder flüssige Körper gewisse Strahlen absorbiert werden, so fehlen dieselben in dem Spektrum, welches also ebenfalls ein Absorptionsspektrum mit dunklen Absorptionsstreifen ist. Diese letzteren sind abhängig von der chemischen Beschaffenheit des absorbierenden Stoffes, welche demnach mittelst des Spektroskopes festgestellt werden kann (Untersuchung von Farbstoffen und Nahrungs-

mitteln; Nachweis geringer Mengen von Blut durch die dem Blut eigentümlichen Absorptionstreifen, Anwendung dieser Methode in der gerichtlichen Medizin).

Anwendung der Spektralanalyse auf die Himmelskörper. Bedeutung der Fraunhoferschen Linien. Da nach den sorgfältigsten Beobachtungen gewisse dunkle Linien im Sonnenspektrum genau an denselben Stellen liegen, an denen im Spektrum weißglühender Körper, wenn man das Licht derselben durch bestimmte Gase oder Dämpfe leitet, dunkle Linien entstehen, so ist man zu dem Schlusse gelangt, daß auch das Licht der Sonne durch glühende gasförmige Stoffe hindurchgeht und auf diesem Wege einen Teil seiner Strahlen durch Absorption verliert. Hieraus haben sich folgende Schlüsse über die Beschaffenheit des Sonnenkörpers ergeben:

Die Sonne ist ein in Weißglut befindlicher Himmelskörper, der von einer aus glühenden Gasen und Dämpfen bestehenden Atmosphäre umgeben ist. — Die Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums sind die Absorptionslinien der Gase und Dämpfe.

Nach den spektroskopischen Untersuchungen besteht die Sonnen-Atmosphäre hauptsächlich aus brennendem Wasserstoff und aus glühenden Dämpfen von Eisen und verschiedenen anderen Metallen (Natrium, Magnesium). Bei totalen Sonnenfinsternissen erscheint sie als schwach leuchtender Ring, in welchen rötlich gefärbte, wolkenartige Gebilde (Protuberanzen) hineinragen, deren Form und Größe häufig wechselt. Durch direkte Beobachtung der mit Hilfe besonderer Spektroskope täglich wahrnehmbaren Protuberanzen und der durch dieselben entstehenden farbigen Spektrallinie ist die Richtigkeit der obigen Annahme bestätigt worden.

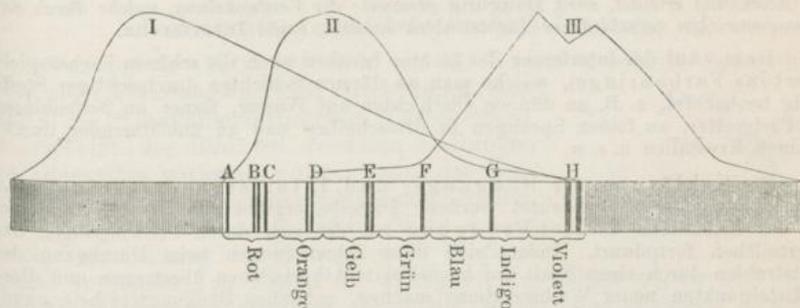
Die Fixsterne haben ein dem Sonnenspektrum ähnliches Spektrum, sind also auch von derselben physikalischen Beschaffenheit, wie die Sonne. Das Spektrum der Planeten ist dem der Sonne gleich (Absorptionstreifen). Manche Nebelflecke zeigen ein aus hellen Linien bestehendes Spektrum, woraus geschlossen werden muß, daß sie sich nicht in Sterne auflösen lassen. Der Kern der Kometen zeigt ein Linienspektrum, der Schweif das Spektrum des Sonnenlichtes.

Bem. Aus gewissen Verschiebungen der Spektrallinien läßt sich (nach dem Dopplerschen Princip, § 92) auf eine Annäherung oder Entfernung der Lichtquelle schließen und auf diese Weise die Bewegung und Geschwindigkeit der Fixsterne berechnen.

Übungsstoff. 1. Wenn man bei der Erzeugung des Sonnenspektrums die Strahlen durch eine kreisförmige Öffnung eintreten läßt und den Schirm mehr und mehr dem Prisma nähert, so erhält man schließlich einen Lichtstreifen, welcher in der Mitte weiß und nur an den Enden farbig ist. Erkl.! — 2. Welchen Einfluß muß die Vergrößerung dieses Abstandes a. auf die Reinheit, b. auf die Lichtstärke des Spektrums ausüben? — 3. Warum muß beim Spektroskope der Spalt um die Brennweite von der Linse entfernt sein? — 4. Vgl. W. und Schwefelkohlenstoff hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als lichtbrechende Substanz zu spektroskopischen Untersuchungen. — 5. Wie läßt sich durch gleichzeitige Anwendung mehrerer Prismen erreichen, daß die Spektrallinien weiter auseinanderfallen? (Anordnung der Prismen!) — 6. Was für ein Spektrum muß entstehen, wenn das Licht eines weißglühenden Platindrahtes a. durch Natrium-, b. durch Lithium-, c. durch Kaliumdämpfe geht? Erkl.! — 7. Die Erdatmosphäre (Wasserdampf) absorbiert die ultravioletten Strahlen ziemlich stark. Welchen Einfluß muß dies auf die Beschaffenheit des Sonnenspektrums ausüben, je nachdem die Beobachtung früh morgens, mittags oder spät nachmittags angestellt wird? — 8. Das Spektrum des Mondlichtes stimmt mit dem des Sonnenlichtes genau überein; w.? — 9. Angenommen, eine einzelne dunkle Linie oder eine Gruppe zusammengehöriger dunkler Linien verschwände im Laufe der Zeit im Sonnenspektrum. Was würde man daraus schließen können? — 10. Durch das Spektroskop lassen sich in der Luft stets Spuren von Kochsalz nachweisen. Welche allgemeine Eigenschaft der K. tritt hierdurch auffällig hervor?

§ 113. Wirkungen farbiger Strahlen. Beugung und Interferenz. Die Betrachtung des Spektrums lehrt, daß nicht alle Spektralfarben gleiche Leuchtkraft haben. *Am hellsten erscheint uns der gelbe, am dunkelsten der violette Teil desselben.* Linie II, Fig. 418,

Fig. 418.



gibt die Größe der **leuchtenden Kraft** der einzelnen Strahlengattungen an. In dem Maße, wie diese Linie vom Spektrum auf- und absteigt, nimmt die leuchtende Kraft zu und ab.

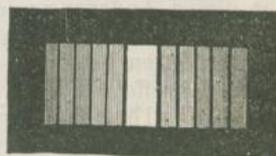
Wird ein sehr empfindliches Thermoskop oder Thermometer in die verschiedenen Teile des Spektrums gebracht, so ist wahrzunehmen, daß die **Wärmewirkung vom Violett bis über das Rot hinaus allmählich zunimmt, also am größten jenseits des roten Endes ist, wo das Auge keine Farbe mehr sieht, von da ab aber schnell wieder abnimmt** (Linie I).

Läßt man die durch das Prisma zerstreuten Strahlen im dunklen Zimmer auf photographisches Papier fallen, so giebt sich durch das Braunwerden des Papiers eine **chemische Wirkung** zu erkennen, *welche im Gelb beginnt und sich bis über das Violett hinaus fortsetzt; im Violett ist dieselbe am stärksten* (Linie III, welche zugleich zeigt, daß die chemischen Strahlen zwei Maxima haben).

Auf der chemischen Wirkung des Lichtes beruht die Photographie (§ 105). Man pflegt die Strahlen, welche diese Wirkung hervorbringen, **chemische Strahlen** zu nennen, obgleich diejenige chemische Wirkung, welche in der Natur und zwar für das Pflanzenwachstum von hervorragender Bedeutung ist, namentlich von den Strahlen ausgeht, welche die größte Leuchtkraft haben. Diese Wirkung besteht in der Bildung von organischer Substanz aus Kohlensäure und Wasser und vollzieht sich in den grünen Zellen der Pflanzen (Assimilation).

Beugung und Interferenz. Lichterscheinungen besonderer Art zeigen sich, wenn man die Sonne oder ein sehr helles Licht durch ein möglichst feines Gitter von gewebtem Zeug oder durch den Bart einer Vogelfeder betrachtet. Diese Erscheinungen kennzeichnen sich dadurch, daß in verschiedener Anordnung zahlreiche Spektren entstehen, in denen dunkle mit hellen Linien abwechseln. Fig. 419 zeigt eine derartige Erscheinung, dadurch hervorgerufen, daß man durch zwei in einiger Entfernung voneinander befindliche enge Spalte Licht in ein dunkles Zimmer fallen läßt. Ohne Anwendung eines Prismas entsteht auf einem dem Spalte gegenüber befindlichen weißen Schirm ein heller Streifen, welcher breiter ist, als er nach der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes sein dürfte. Zu beiden Seiten des Licht-

Fig. 419.



chen
eu-
ach-
gen,
urch
dem
toffe
tion
nen-

einer
leben
on s.

häre
Lisen
nen-
rbe,
öße
kope
igen

sind
pek-
ache
ssen
eten

sich
ung
keit

die
und
r in
fluß
ärke
die
stoff
chen
erer
der
eifs-
um-
vio-
des
oder
mit
nkle
aufe
—
ach-
?

streifens wechseln bei Anwendung von einfarbigem Lichte Streifen von geringerer Helligkeit und dunkle Streifen miteinander ab, während weißes Licht (Sonnenlicht) jederseits eine Reihe farbiger Spektren erzeugt, deren Lichtstärke mit der Entfernung vom mittleren Streifen schnell abnimmt.

Die Erscheinung, daß Licht an den Rändern eines undurchsichtigen Körpers eine Ablenkung erleidet, wird Beugung genannt; die Verdunkelung, welche durch das Zusammenwirken verschiedener Lichtstrahlen entsteht, heißt Interferenz.

Bem. Auf der Interferenz des Lichtes beruhen auch die schönen Farbenspiele (Newtons Farbenringe), welche man an dünnen Schichten durchsichtiger Stoffe häufig beobachtet, z. B. an dünnen Ölschichten auf Wasser, ferner an Seifenblasen und Perlmutter, an feinen Sprüngen in Glasscheiben und an abblätternden durchsichtigen Krystallen u. s. w.

Die Erklärung der Beugungs- und Interferenzerscheinungen kann hier nur kurz angedeutet werden. Dieselbe ergibt sich aus der Annahme, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, die sich durch Schwingungen der Ätherteilchen fortpflanzt. Indem sich diese Schwingungen beim Durchgang der Lichtstrahlen durch einen Spalt auf benachbarte Ätherteilchen übertragen und diese zu Mittelpunkten neuer Wellensysteme machen, entstehen Beugungserscheinungen; die Durchkreuzung verschiedener Ätherwellen, sowie die Reflexion derselben an der vorderen und hinteren Grenzfläche einer dünnen Schicht eines durchsichtigen Körpers bringt Interferenzerscheinungen hervor (vergl. § 146).

Übungsstoff. 1. Inwiefern kann man sagen, daß das menschliche Auge nur für die Wahrnehmung gewisser im Sonnenlichte enthaltenen Strahlen eingerichtet ist? — 2. Wie erklärt es sich, daß blühende Rapsfelder auf weit größere Entfernung hin leuchten als andere Felder? — 3. Wie muß in einem photographierten Sonnenspektrum Hell und Dunkel verteilt sein? — 4. Rote und gelbe Kleidungsstücke werden beim Photographieren fast immer dunkel, blaue und violette dagegen hell; w.? — 5. Wie müssen glanzlose grüne Blätter auf Photographien aussehen? (Photographien von Landschaften.) — 6. Warum läßt sich die photographische Wirkung der Körperfarben nach dem Spektrum nicht sicher beurteilen? — 7. Bei welcher Farbe ist nach Fig. 418 sowohl die Licht- als auch die Wärmewirkung ziemlich groß? — 8. Bei welchen Farben sind diese Wirkungen sehr gering? — 9. Warum dürfen die Fensterscheiben in dem Raume, in welchem der Photograph die Platte präpariert, nicht aus gewöhnlichem Glase bestehen? — 10. Angenommen, man legte schmale Streifen von scheinbar einfarbigen Zeugstoffen auf eine schwarze Unterlage und betrachtete dieselben durch ein Prisma. Wie ließe sich dadurch die photographische Wirkung der Farben annähernd ermitteln? — 11. Wie ist es zu erklären, daß verschiedene lichtschwache Planeten und Nebelflecke mittelst der Photographie überhaupt erst entdeckt worden sind?

E. Polarisation und Doppelbrechung.

§ 114. Die Veränderungen, welche Lichtstrahlen durch die von ihnen getroffenen Körper erleiden, sind im wesentlichen folgende: 1. eine *Richtungsänderung* (Zurückwerfung und Brechung), wobei je nach der Art dieser Änderung und nach der Beschaffenheit des Lichtes eine Zerlegung desselben in seine elementaren Bestandteile (Farbenzerstreuung) eintreten kann; 2. eine *Umwandlung in Wärme*, wenn der vom Lichte getroffene Körper die eingedrungenen Strahlen ganz oder teilweise auslöscht (Absorption). — Die Zurückwerfung und Brechung der Lichtstrahlen erfolgt nach den früher erläuterten Gesetzen, denen die gewöhnlichen Strahlen ausnahmslos unterworfen sind. Unter Umständen kann jedoch Licht durch einmalige Reflexion oder Brechung besondere Eigenschaften

erhalten, derart z. B., daß es sich bei einer zweiten Reflexion anders verhält wie gewöhnliches Licht. Man nennt solches Licht *polarisiert*, und bezeichnet die *Polarisation* desselben als vollkommen oder unvollkommen, je nachdem es diese besonderen Eigenschaften in höherem oder geringerem Grade angenommen hat.

Polarisation durch Reflexion und Brechung.

Versuch a. Betrachtet man ein im Wasser sichtbares Spiegelbild (Bild einer Flamme, Fig. 420) durch einen Glassatz (12—15 aufeinanderliegende Glasscheiben), so erscheint das Bild bei gewissen Stellungen des Glassatzes ausgelöscht, wenn der Einfallswinkel der auf das Wasser fallenden Strahlen eine bestimmte Größe hat (53°). Wird darauf durch Verschiebung der Flamme jener Einfallswinkel vergrößert, so nimmt die Helligkeit des Bildes wieder zu, wenn auch die Lage des Glassatzes gegen die reflektierten Strahlen dieselbe bleibt. — In ähnlicher Weise wirken auch andere (nicht metallische) spiegelnde Flächen.

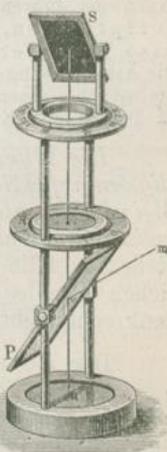
Fig. 420.



Hieraus folgt, daß *reflektiertes* Licht unter gewissen Bedingungen durch einen durchsichtigen Körper nicht hindurchgeht. Eine solche Eigentümlichkeit des Lichtes kann auch durch *Brechung* und *Absorption* hervorgerufen werden.

Versuch b. Dünne Platten von Turmalin, einem Mineral von bräunlich-grüner Färbung, sind hierzu besonders geeignet. Läßt man Licht durch eine Turmalinplatte gehen, so nimmt es infolge der stattfindenden Absorption die Farbe des Krystalles an, zeigt aber im übrigen zunächst keine weitere Veränderung. Wenn man aber zwei Turmalinplatten aufeinander legt und die eine derselben über der anderen dreht, so wird das Licht bei bestimmter Stellung ganz hindurchgelassen und bei anderer Stellung ausgelöscht. Die beiden Stellungen, bei welchen die größte Helligkeit und Dunkelheit miteinander wechseln, werden durch Drehung der Platte um 90° erhalten. Der Lichtstrahl wird beim Durchgang durch die erste Platte polarisiert und von der zweiten Platte nur dann durchgelassen, wenn ihre Krystallachse mit der der ersten parallel ist.

Fig. 421.



Jede Vorrichtung, welche dazu dient, das Licht zu polarisieren, kann auch dazu benutzt werden, durchsichtige Gegenstände im polarisierten Licht zu untersuchen. Eine sehr zweckmäßige Form eines solchen Apparates zeigt Fig. 421: den **Polarisationsapparat von Nörremberg**. Die wesentlichsten Teile desselben sind die Spiegelglasplatte P, welche den Lichtstrahl durch Reflexion polarisiert (*Polarisator*), und der aus schwarzem Glas bestehende Spiegel S, welcher den polarisierten Strahl nach der Reflexion vom Spiegel n abermals reflektiert und dadurch zerlegt (*Analysator*).

Versuch c. Läßt man auf die Glasplatte P unter einem Einfallswinkel von annähernd 55° (genau $54^\circ 35'$) Licht von einer Kerzenflamme fallen, so ist das Bild

der Flamme im Spiegel S deutlich sichtbar, wenn Spiegel und Glasplatte parallel sind, die Reflexionsebene (mon) der Platte und die des Spiegels S also zusammenfallen. Dreht man aber den Spiegel um die Richtung des einfallenden Strahles als Achse, sodafs der Einfallswinkel während der Drehung unverändert bleibt, so nimmt die Helligkeit des Gesichtsfeldes solange ab, bis die Reflexionsebenen beider Platten sich rechtwinklig kreuzen (siehe die Figur). In dieser Lage erscheint das Licht vom Spiegel ausgelöscht. Dreht man den Spiegel weiter, so wird das Gesichtsfeld wieder hell; es erreicht seine grösste Helligkeit, wenn die Reflexionsebenen wieder zusammenfallen. Dieser Wechsel in der Helligkeit wiederholt sich, so oft man den Spiegel in derselben Richtung um 90° dreht. War das Gesichtsfeld ursprünglich hell, so wird es demnach bei fortgesetzter Drehung um 90° , 180° , 270° und 360° zunächst dunkel, darauf wieder hell, dann noch einmal dunkel und zuletzt wieder hell.

Licht läfst sich durch Reflexion und durch Brechung so verändern, dafs es sich nach verschiedenen Seiten verschieden verhält, also nicht mehr wie gewöhnliches Licht von einem Körper in jeder Lage desselben zurückgeworfen oder durchgelassen werden kann: **Polarisiertes Licht.**

Strahlen, welche durch Reflexion polarisiert sind, werden nach Versuch o vollständig zurückgeworfen, wenn die zweite Reflexionsebene mit der ersten zusammenfällt, hingegen vollständig ausgelöscht, wenn die beiden Reflexionsebenen eine rechtwinklig gekreuzte Stellung gegeneinander einnehmen. Ist der Einfallswinkel gröfser oder kleiner, so findet nur eine unvollständige Auslöschung der Strahlen statt. Die Strahlen werden im ersteren Falle vollständig, im letzteren unvollständig polarisiert.

Die Erklärung der Polarisationserscheinungen geht wie die der Beugungs- und Interferenzerscheinungen von der Annahme aus, dafs das Licht eine Wellenbewegung ist. Mit Hilfe der Polarisationserscheinungen läfst sich der Nachweis führen, dafs die Schwingungen, welche den Lichtstrahl fortpflanzen, rechtwinklig zur Richtung desselben erfolgen und also Transversalwellen sind. Bei einem gewöhnlichen Lichtstrahl erfolgen die Ätherschwingungen in allen Ebenen, die auf der Fortpflanzungsrichtung senkrecht stehen; bei einem polarisierten Strahl nur in einer Ebene, da die Schwingungen in den anderen Ebenen eben durch die Polarisierung aufgehoben werden (vergl. § 146).

Die Ebene, in welcher ein polarisierter Lichtstrahl am vollständigsten reflektiert wird, heifst die Polarisationsebene des Strahles, der Winkel, unter welchem Lichtstrahlen auffallen müssen, damit eine vollständige Polarisierung eintreten kann, Polarisationswinkel. — Bei der Reflexion fällt die Polarisationsebene mit der Einfallsebene des gewöhnlichen Strahles zusammen, während sie bei der Brechung auf derselben senkrecht steht. — Durch genaue Versuche hat man gefunden:

Der Polarisationswinkel ist für verschiedene Stoffe verschieden; er wächst mit dem Brechungsexponenten und ist derjenige Winkel, für welchen der reflektierte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht.

Der Polarisationswinkel beträgt für Wasser 53° , für Glas 55° , für Schwefelkohlenstoff 59° . — Wenn der von einem durchsichtigen Körper zurückgeworfene Strahl vollständig polarisiert ist, so erscheint der gebrochene nur unvollständig polarisiert und zwar in einer Ebene, welche auf der Brechungsebene senkrecht steht. Doch läßt sich die Polarisation durch wiederholte Brechung vervollständigen (Anwendung mehrerer Glasplatten, Fig. 420). — Das Tageslicht ist meist mehr oder weniger polarisiert, so z. B. das Licht des blauen Himmels (am stärksten 90° vom Sonnenstande entfernt) und das von Gewässern zurückgeworfene Licht. Auch das von glatten Gegenständen, wie z. B. von Tischen, Fenstern u. s. w. zurückgeworfene Licht ist teilweise polarisiert. Das Licht weißer, mächtig erleuchteter Wolken ist dagegen nicht polarisiert. Durch Metallspiegel wird das Licht nur sehr unvollständig polarisiert.

Polarisation durch Doppelbrechung.

Das beste Mittel zur Polarisation des Lichtes bietet die Doppelbrechung. Alle durchsichtigen Krystalle, welche nicht dem regulären Krystallsystem angehören, z. B. der Kalkspat, haben die Eigenschaft, Lichtstrahlen, welche durch sie hindurchgehen, im allgemeinen in zwei Strahlen zu spalten, sodafs die durch sie betrachteten Gegenstände doppelt erscheinen (Fig. 422). Beide Strahlen sind vollständig polarisiert. Bei jedem derartigen Krystalle giebt es wenigstens eine Richtung, in der eine solche Spaltung der Strahlen nicht eintritt: beim Kalkspat in der Richtung seiner Hauptachse (Gerade, welche die beiden Ecken verbindet, in denen 3 stumpfe Winkel zusammenstoßen). Jede solche Richtung wird optische Achse genannt. Gegenstände, welche in dieser Richtung durch den Krystall betrachtet werden, erscheinen einfach.

Fig. 422.



Für den praktischen Gebrauch eignen sich besonders die schönen Krystalle des sogen. isländischen Doppelspates, welche man paarweise so zu einem Prisma zusammensetzt, dafs sie nur einen der beiden polarisierten Lichtstrahlen durchlassen (Nicolsches Prisma). Bei Untersuchungen des polarisierten Lichtes wird ein solches Prisma als polarisierende, ein anderes als analysierende Vorrichtung anstatt des Spiegels S in Fig. 421) angewandt.

Chromatische Polarisation. Drehung der Polarisationsebene. Wenn polarisches Licht durch dünne Blättchen von Glimmer-, Gips- oder anderen Krystallen hindurchgeht und durch eine analysierende Vorrichtung betrachtet wird, so erscheinen die an sich farblosen Krystalle mit prachtvollen Farbenringen, welche beim Drehen des Analysators in andere Farben übergehen. Man erklärt diese Farbenerscheinungen durch die Interferenz des polarisierten Lichtes. Dieselben sind nicht nur für die theoretischen Vorstellungen vom Wesen des Lichtes von grosser Bedeutung, sondern auch von unmittelbar praktischer Wichtigkeit. Es haben nämlich einige Krystalle (z. B. Quarze) und verschiedene Flüssigkeiten die merkwürdige Eigenschaft, die *Polarisationsebene zu drehen*, d. h. bei bestimmter Drehung des Analysators gewisse Farben zu erzeugen. Hierauf beruht die Anwendung der Polarisation zur Bestimmung des Zuckergehaltes der Rübensäfte. Die zu diesem Zwecke erfundenen Vorrichtungen heifsen *Saccharometer* (Zuckermesser) und beruhen im wesentlichen darauf, dafs polarisiertes Licht durch die in einer Glasröhre enthaltene Zuckerlösung hindurchgeht und durch einen Analysator betrachtet wird. Aus dem für eine gewisse Farbenerscheinung erforderlichen Drehungswinkel läfst sich der Zuckergehalt der Lösung unmittelbar bestimmen.

Übungsstoff. 1. Inwiefern hängt es von der Stellung des Beobachters ab, ob die in einem Gewässer am Ufer sichtbaren Spiegelbilder die in Versuch a angegebenen Erschn. zeigen? — 2. In welcher Weise läfst sich eine glänzend

schwarze Schultafel von demselben Standpunkte aus so betrachten, daß sie ihren Glanz verliert und wieder erhält? — 3. Warum läßt sich an Körpern, welche das Licht unregelmäßig zurückwerfen, bei einer derartigen Betrachtung ein Unterschied in der Helligkeit kaum wahrnehmen? — 4. Der Glanz eines Wasserspiegels erscheint, durch ein Nicolsches Prisma oder einen Glassatz betrachtet, bei der Drehung desselben abwechselnd matt und wieder heller, während die im W. befindlichen Gegenstände immer gleichdeutlich erscheinen. Erkl.! — 5. Bedeckt man ein bedrucktes Papierblatt mit einer Glasscheibe, so kann man die Schrift nicht lesen, wenn man sich so stellt, daß das vom Glase reflektierte Licht ins Auge fällt. Dreht man aber eine Turmalinplatte vor dem Auge, so erscheint bei bestimmter Lage derselben die Schrift wieder ganz klar. W.? — 6. Wird ein Regenbogen an Schönheit verlieren, wenn man ihn durch ein Nicolsches Prisma betrachtet?

V. Abschnitt.

Die Lehre von der Wärme.

(I. Lehrstufe, §§ 30—36.)

A. Wirkungen der Wärme.

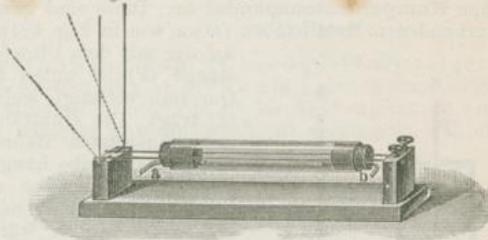
(Siehe §§ 30—33.)

§ 115. Ausdehnung durch Wärme. Der Ausdehnung der Körper wirkt im allgemeinen zweierlei entgegen: bei festen und flüssigen Körpern (von innen) die Kohäsion und bei allen Körpern (von außen) der Druck der atmosphärischen Luft. Hiernach wird es erklärlich, daß sich am stärksten die luftförmigen Körper ausdehnen (§ 30) und die festen bei gleicher Temperaturerhöhung weniger stark als die Flüssigkeiten; inwiefern? — Da nun die flüssigen und festen Körper hinsichtlich der Kohäsion untereinander verschieden sind, so ist zu erwarten, daß auch ihre Ausdehnung bei gleicher Erwärmung verschieden sein wird. Diese Unterschiede sind bei den festen Körpern im allgemeinen sehr gering (am größten bei den Metallen), und es bedarf deshalb besonderer Vorrichtungen, um sie zur Anschauung zu bringen. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß man Stäbe, welche an einem Ende befestigt sind und am anderen Ende auf einen hebelartigen Zeiger einwirken (sogen. Hebelpyrometer) zunächst durch schmelzendes Eis bis auf 0° abkühlt und darauf durch kochendes Wasser bis auf 100° C erhitzt. Zum Nachweis der ungleichen Ausdehnung läßt sich auch folgendes Verfahren anwenden:

Versuch. Ein Eisen- und ein Zink- oder Messingstab von 30—40 cm Länge und etwa 1 cm Dicke sind mit ihrem einen Ende nebeneinander in einem Klotze befestigt, während die freien Enden einem anderen Klotze fest aufliegen (Fig. 423, folg. Seite). Klemmt man dann unter jedes der beiden freien Enden den kurzen Schenkel eines dünnen, rechtwinklig umgebogenen Messing- oder Aluminiumdrahtes, sodafs dessen

langer Schenkel aufrecht gerichtet ist, so drehen sich bei Erhitzung der Stäbe beide Zeiger ungleichweit und zeigen dadurch die ungleiche Ausdehnung der Metalle an. Die Erhitzung kann entweder durch direkte Einwirkung der Flamme oder durch Dämpfe von siedendem Wasser geschehen, welche man durch eine beide Stäbe umgebende Glasröhre hindurchleitet. Derartige Versuche lehren:

Fig. 423.



Die festen Körper dehnen sich bei gleicher Temperaturerhöhung verschieden aus. Zwischen 0° und 100° ist die Ausdehnung eines festen Körpers im allgemeinen eine gleichmäßige, d. h. sie steht in gleichem Verhältnis zur Zunahme der Temperatur.

Die Zahl, welche angibt, um den wievielten Teil seiner Länge ein Körper bei der Erwärmung um 1° sich ausdehnt, heißt der (lineare) Ausdehnungskoeffizient.

Bezeichnet α den Ausdehnungskoeffizienten, l_0 die Länge eines Stabes bei 0° l die Länge desselben bei t° , so ist $l = l_0 + l_0 \alpha t = l_0 (1 + \alpha t)$.

Lineare Ausdehnung einiger fester Körper.

Die Ausdehnung eines Stabes von 1 m Länge beträgt bei einer Temperaturerhöhung um 1° C für:

	mm	Ausdehn.-Koeff.		mm	Ausdehn.-Koeff.
Glas	0,008	0,000 008	Kupfer	0,017	0,000 017
Platin	0,009	0,000 009	Silber }	0,019	0,000 019
Guß Eisen	0,011	0,000 011	Messing }	0,028	0,000 028
Stabeisen }	0,012	0,000 012	Blei	0,029	0,000 029
Stahl }			Zink		

Die meisten festen Körper dehnen sich nach allen Richtungen gleichstark aus. Für diesen Fall ist die kubische Ausdehnung eines Würfels, dessen Kantenlänge bei $0^{\circ} = 1$ und nach der Erwärmung um $1^{\circ} = 1 + \alpha$ ist: $(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$, worin die beiden letzten Ausdrücke wegen ihrer außerordentlich geringen Größe vernachlässigt werden können. Hiernach ist der Koeffizient für die kubische Ausdehnung $= 3\alpha$ oder das Dreifache des linearen Ausdehnungskoeffizienten.

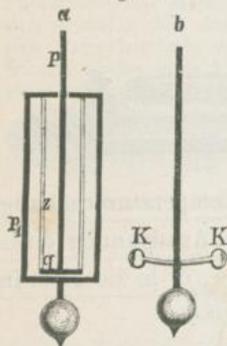
Bei Krystallen, welche nicht zum regulären System gehören, ist die Ausdehnung nach verschiedenen Richtungen verschieden. — Feuchtes Holz, Thon u. dgl. schwinden bei der Erwärmung, ziehen sich mithin zusammen und machen scheinbar eine Ausnahme von dem Gesetze. Der Grund dieser Erscheinung liegt namentlich in dem Verdunsten des Wassers, das die Körper enthalten. Kautschuk dagegen zieht sich beim Erwärmen nachweisbar zusammen.

Die ausdehnende Wirkung der Wärme übt einen Einfluß auf den Gang der Uhren aus. Da nämlich ein Pendel um so langsamer schwingt, je länger es ist, so muß jede Temperaturerhöhung, wenn nicht besondere Einrichtungen getroffen sind, ein Zurückbleiben, jede Temperaturniedrigung ein Vorlaufen der Uhr zur Folge haben. Bei den sogen. Regulatoren wird diese Ungenauigkeit dadurch sehr beschränkt, daß man zur Pendelstange nicht Metall, sondern eine

Holzart verwendet, welche durch Temperaturschwankungen wie durch Feuchtigkeitswechsel nur äußerst wenig beeinflusst wird (sehr trockenes, mit Öl getränktes Fichtenholz).

Bei Uhren, deren Gang eine größere Genauigkeit erfordert, wendet man **Kompensationspendel** an. Diese sind gewöhnlich aus rostenartig miteinander verbundenen Metallstäben

Fig. 424.



(etwa wie in Fig. 424a) zusammengesetzt (Rostpendel). An der mit dem Uhrwerke verbundenen stählernen Pendelstange (P) ist unten statt der Pendelscheibe ein kurzer Querstab befestigt, welcher an jedem Ende einen Zinkstab (Z) trägt. Die Zinkstäbe tragen einen aus Stahlstäben zusammengesetzten Rahmen, an dessen unterem Querstabe die Pendelscheibe hängt. Durch die stärkere Ausdehnung der beiden Zinkstäbe wird der äußere Rahmen mit der Pendelscheibe um ebensoviel gehoben, als die Pendelscheibe sich sonst senken würde. (Die Verlängerung von Z ist gleich der Summe der Verlängerungen von P und P₁.) — Bei dem in Fig. 424b dargestellten Kompensationspendel ist nahe über der Pendelscheibe auf der Pendelstange ein Querstäbchen befestigt, das aus zwei zusammengelöteten Metallstreifen besteht, die sich bei Erwärmung ungleichstark ausdehnen. Dadurch krümmt sich dieser Kompensationsstreifen und die an ihm befestigten Kugeln werden ein wenig gehoben. Auf diese Weise wird der Einfluss der Verlängerung wieder aufgehoben.

Derartige Kompensationsstreifen finden ferner Verwendung zur Herstellung von Metallthermometern (§ 117). Auf die Ausdehnung metallener Maßstäbe durch die Wärme muß bei sehr genauen Messungen Rücksicht genommen werden.

Bei **Flüssigkeiten** kann es sich nur um die kubische (körperliche) Ausdehnung handeln. Dieselbe läßt sich mit Hilfe eines offenen thermometerähnlichen Gefäßes bestimmen, indem man nach dem Steigen der Flüssigkeit in der Röhre die Größe der Ausdehnung berechnet, oder auch dadurch, daß man die Flüssigkeiten bei verschiedenen Temperaturen in Maßflaschen abwägt. In beiden Fällen ist die Ausdehnung des Glases mit zu berücksichtigen. Auf diese Weise hat man gefunden:

Die Flüssigkeiten dehnen sich verschieden und unregelmäßig aus und zwar bei hohen Temperaturen viel stärker als bei niedrigen.

Bei Bestimmung des spezifischen Gewichtes ist auf die Ausdehnung der Flüssigkeiten Rücksicht zu nehmen; inwiefern könnte die besonders starke Ausdehnung von Alkohol und Petroleum auch beim Verkauf dieser Flüssigkeiten in Betracht kommen?

Quecksilber dehnt sich zwischen 0° und 100° regelmäßig aus; der Ausdehnungskoeffizient desselben ist $\frac{1}{10000}$. Bei genauen Barometerbeobachtungen muß die Ausdehnung des Quecksilbers berücksichtigt werden.

Um die Ausdehnung der Gase zu bestimmen, benutzt man entweder ein offenes thermometerähnliches Gefäß mit wagerechter Röhre, in der man die Luft durch einen Qu.-Tropfen absperrt (*Ausdehnung bei unverändertem äußeren Druck*), oder man verbindet das Gefäß mit einem Uförmigen offenen Manometer und gießt nach der Ausdehnung des Gases soviel Qu. nach, daß das Gas wieder denselben Raum einnimmt; es folgt dann, daß sich das Gas ebensostark ausgedehnt haben würde, als die Spannkraft zugenommen hat (*Zunahme der Spannkraft bei unverändertem Volumen*, § 85), sodaß sich aus diesem Verhältnis die Größe der Ausdehnung berechnen läßt. Genaue Versuche lehren:

Alle gasförmigen Körper dehnen sich gleichmäßig aus und zwar für jeden Grad Temperaturerhöhung um $\frac{1}{273} = 0,00367$ ihres Volumens, vorausgesetzt, daß der äußere Druck sich nicht ändert (Gesetz von Gay-Lussac).

Bei einer Temperaturerhöhung von 0° bis 100° vergrößern demnach die Gase ihr Volumen um etwas mehr als $\frac{1}{3}$ (genau um 0,3665). Wird ein Gas bei unverändertem äußeren Drucke von 0° bis 273° erhitzt, so verdoppelt sich sein Rauminhalt; ist letzterer unveränderlich, so verdoppelt sich die Spannung des Gases.

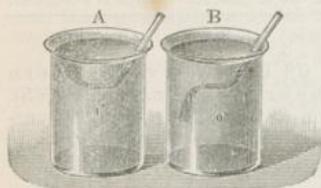
Übungstoff. 1. Ein Metallstab sei aus zwei der Länge nach zusammengetieteten Stäben von Eisen und Messing zusammengesetzt; nach welcher Seite wird derselbe sich a. bei starker Erwärmung, b. bei starker Abkühlung krümmen, u. w.? — 2. In emaillierten Kochtöpfen springt der innere glasartige Überzug leicht ab, wenn die Töpfe leer aufs Feuer gestellt werden. Erkl.! — 3. Platindrähte lassen sich in Glas einschmelzen, ohne daß letzteres beim Erkalten zerspringt, Drähte aus anderem Metall nicht. Grund! — 4. In einem mit kaltem W. gefüllten Kessel muß das W. beim Erwärmen zunächst ein wenig sinken. Nachfolgende Ersch.? — 5. Bei Anfertigung von Fässern werden die Dauben auswendig angefeuchtet und innen erwärmt; w.? — 6. Versuche ein Rostpendel zu zeichnen, bei welchem die Pendelstange (P, Fig. 424) am oberen Querbalken des stählernen Rechtecks befestigt ist und die Zinkstäbe die umgekehrte Lage haben. — 7. Die Temp. einer Eisenbahnschiene von 4 m Länge betrage im Sommer 80° C mehr als im Winter. Um wv. ungefähr wird die Schiene innerhalb eines Jahres sich verlängern und verkürzen? (Man nehme an, die Schiene sei bei 0° 4 m lang und werde bis auf 80° C erwärmt.) — 8. Desgl. ein Telegraphendraht von 10 km Länge (Temp.-Unterschied = 50°). — 9. Warum wird bei der Füllung der Therm. Qu. anderen Flgkn. vorgezogen? — 10. Vgl. die Genauigkeit, mit welcher Lufttherm. die Temp. anzeigen, mit derjenigen der Qu.-Therm. Gründe! — 11. Welchen Raum (ccm) nimmt ein Liter Qu. von 0° a. bei 100° , b. bei 50° , c. bei 20° C ein? — 12. Der Barometerstand sei 760 mm bei 20° C. Wie groß würde derselbe demnach bei 0° (auf 0° reduziert) sein?

§ 116. Unregelmäßige Ausdehnung des Wassers. Die bekannte Erscheinung, daß stillstehendes Wasser zuerst nur an der Oberfläche sich mit Eis überzieht, macht es wahrscheinlich, daß Wasser während seiner Abkühlung sich anders verhält als andere Flüssigkeiten. Kühlt sich nämlich Wasser von oben an dauernd ab, so müßte, wenn seine Dichtigkeit dabei stetig zunähme, offenbar bis zum Gefrieren ein Untersinken des kälter gewordenen Wassers erfolgen, wie umgekehrt ein Aufsteigen erfolgt, wenn Wasser von gewöhnlicher Temperatur in einem Gefäße von unten erhitzt wird (§ 55). Das Wasser würde demnach auch in tieferen Schichten bis zum Gefrierpunkte erkalten und gleichmäßig erstarren, wie sich z. B. Öl beim Gefrieren wirklich verhält. In welcher Weise sich die Dichtigkeit des Wassers bei Abkühlung und Erwärmung ändert, lehren folgende Versuche.

***Versuch a.** Wenn man mittelst einer knieförmig gebogenen Glasröhre gefärbtes Wasser von 0° so in reines Wasser von 4° C fließen läßt, daß es in wagerechter Richtung einige cm unter dem Wasserspiegel langsam ausfließt, so steigt das kältere Wasser in dem wärmeren auf (Fig. 425, folg. Seite). Läßt man in gleicher Weise gefärbtes Wasser von 4° in reines Wasser von 0° fließen, so sinkt es unter. — Was läßt sich hieraus schließen?

Versuch b.)* Ein großes Becherglas fülle man zur Hälfte mit kaltem Wasser, auf welchem man bis nahe zum Rande Eisstücke schwimmen läßt. Über dem Glase befestigt man zwei in das Wasser eintauchende Thermometer so, daß die Kugel des einen sich nahe am Boden, die des anderen an der Oberfläche des Wassers befindet. Läßt man das Glas nun einige Zeit in einem kalten Zimmer (etwa $+2^{\circ}$) ruhig stehen, so zeigt das untere Thermometer ziemlich genau 4° , das obere 0° .

Fig. 425.



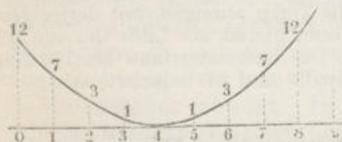
Versuch c. Wird eine kleine, thermometerartig eingerichtete und ganz mit Wasser von 0° gefüllte Kochflasche ganz allmählich erwärmt, so sinkt das Wasser in der Röhre zunächst etwas, darauf steigt es andauernd.

Wasser hat bei etwa $+4^{\circ}$ C. seine größte Dichtigkeit: **Dichtigkeitsmaximum des Wassers.**

Dieses Dichtigkeitsmaximum hat nur das Süßwasser. Meerwasser zieht sich bis zu seinem Gefrierpunkte (je nach dem Salzgehalt etwas veränderlich, etwa $-2,5^{\circ}$ C) stetig zusammen.

In Fig. 426 ist die eigentümliche Ausdehnung des Wassers durch eine Linie dargestellt. Die Senkrechten mit den darüber stehenden Zahlen geben an, um wieviel cbmm 100 000 cbmm oder 0,1 Liter Wasser von 4° C sich bei weiterer Abkühlung oder Erwärmung ausdehnen.

Fig. 426.



Die am Fuße der Senkrechten stehenden Zahlen geben die betreffenden Temperaturen an. Aus der Figur ist zugleich ersichtlich, daß W. bei $+8^{\circ}$ C ziemlich genau dieselbe Dichte hat, wie bei 0° .

Das abweichende Verhalten des Wassers ist im *Haushalte der Natur* von großer Bedeutung, indem dadurch das Eindringen der Kälte in die tieferen Schichten der Gewässer verhindert und die Eisbildung wesentlich beschränkt wird.

Wenn nämlich die Gewässer bei Beginn des Winters sich von oben abkühlen, so sinken die kälteren Schichten des Wassers infolge ihrer größeren Dichtigkeit nach unten und wärmere treten von unten an ihre Stelle. Dies setzt sich solange fort, bis das ganze Wasser eine Temperatur von $+4^{\circ}$ C erreicht hat. Durch weitere Abkühlung dehnen sich die oberen Schichten wieder aus und können daher selbst beim Gefrieren nicht mehr untersinken. In *stehenden Gewässern von genügender Tiefe* behalten demnach die unteren Schichten bei dem geringen Leitungsvermögen des Wassers im Winter eine Temperatur von nahezu 4° .

In *Flüssen* kann das bis auf 0° abgekühlte Wasser durch Strömungen nach unten gelangen und hier mit dem Grunde des Flußbettes in Berührung kommen, sodafs die dort befindlichen festen Körper sich mit Eis überziehen (Grundeis). Hat das Grundeis sich zu größeren Massen angesammelt, so reißt es sich durch den Auftrieb los. An der Oberfläche häufen sich solche Eisstücke oft so sehr, daß sie untereinander und mit dem am Ufer entstandenen Eise zusammenfrieren, sodafs eine zusammenhängende Eisdecke entsteht. — Nach Tiefseeforschungen herrscht im *Meere* in einer Tiefe von ungefähr 700 bis 1000 m eine durchschnittliche Temperatur

*) Nach Weinholds „Vorschule der Experimentalphysik.“

von $+4^{\circ}$ C. Von da ab bis zum Grunde des Meeres ist die Temperatur in der heißen und gemäßigten Zone zwischen 0° und $+2^{\circ}$, während sie in den Polar-gegenden bis etwa $-2,5^{\circ}$ herabsinkt.

Übungsstoff. 1. Was würde eintreten, wenn die bei Versuch c benutzte Flasche W. von gewöhnlicher Temp. enthielte und man tauchte sie dann schnell a. in kälteres, b. in wärmeres W.? Erkl.! — 2. Aus dem Sinken des W. in der Röhre (Versuch c) kann nicht ohne weiteres geschlossen werden, daß das W. sich zunächst zusammenzog, denn die Ersch. hätte auch eintreten können, wenn das W. sich weniger ausdehnte als Glas, oder seinen Rauminhalt gar nicht geändert hätte. Erkl.! — 3. Bei gleichmäßiger Erwärmung steigt das W. in der Röhre erst von 6° ab; bis dahin sinkt es. Erkl.! — 4. Wie würde es zu erklären sein, wenn der Stand des W. sich von 4° bis 6° nicht änderte? — 5. Ein Therm. enthalte W. statt Qu.; welche Ziffer würde dann auf demselben am tiefsten stehen müssen, wenn die Kugel des Therm. ihren Rauminhalt nicht änderte, u. w.? — 6. Warum würde eine für Qu. bestimmte Teilung für W. nicht brauchbar sein, selbst wenn man das Dichtigkeitsmaximum berücksichtigte? — 7. Warum kann Grundeis erst dann aufsteigen, wenn es sich in größerer Menge gebildet hat? — 8. Warum kann auf kleinen Gewässern sich leichter eine Eisdecke bilden als auf großen?

§ 117. Thermometer. Da Veränderungen im Wärmestande der Körper sich am leichtesten und sichersten nach den dadurch hervorgerufenen Veränderungen des Rauminhaltes beurteilen lassen, so dient diese Wirkung der Wärme, wie bereits früher hervorgehoben wurde, allgemein zur Bestimmung der Temperatur. Außer den beiden in § 30 beschriebenen Thermometerskalen von Réaumur und Celsius ist noch die Skala von Fahrenheit zu erwähnen (Fig. 427), welche sich dadurch unterscheidet, daß ihr Nullpunkt 32° unter dem natürlichen Gefrierpunkte liegt. Der Siedepunkt des Wassers ist auf dieser Skala mit 212 bezeichnet, sodafs der Temperaturabstand zwischen dem Gefrier- und dem Siedepunkte des Wassers 180° umfaßt. Das Verhältnis der Anzahl der Grade dieser 3 Thermometerskalen ist demnach $80 : 100 : 180 = 4 : 5 : 9$.

Bei der Umrechnung der Grade nach F in Grade nach C oder R hat man hiernach zunächst zu beachten, wieviel Grad die Temperatur über oder unter dem Eispunkte liegt, und darauf die erhaltenen Grade mit $\frac{5}{9}$ oder $\frac{4}{5}$ zu multiplizieren, während man bei der Umrechnung der Grade nach C oder R in Grade nach F zunächst mit $\frac{9}{5}$ oder $\frac{5}{4}$ zu multiplizieren und dann zu berechnen hat, wieviel Grad die Temperatur über oder unter dem Nullpunkte des Fahrenheitschen Thermometers liegt.

Beispiele:

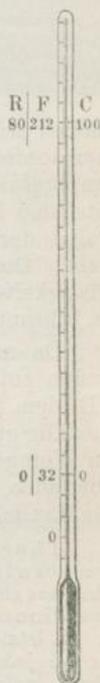
$$\begin{aligned} +100^{\circ} \text{ F} &= 100 - 32 = 68^{\circ} \text{ über d. E.-P., also } +\frac{5}{9} \cdot 68^{\circ} \text{ C oder } +\frac{4}{5} \cdot 68^{\circ} \text{ R.} \\ +10^{\circ} \text{ F} &= 32 - 10 = 22^{\circ} \text{ unter d. E.-P., also } -\frac{5}{9} \cdot 22^{\circ} \text{ C oder } -\frac{4}{5} \cdot 22^{\circ} \text{ R.} \\ -100^{\circ} \text{ F} &= 32 + 10 = 42^{\circ} \text{ unter d. E.-P., also } -\frac{5}{9} \cdot 42^{\circ} \text{ C oder } -\frac{4}{5} \cdot 42^{\circ} \text{ R.} \\ +20^{\circ} \text{ R} &= \frac{5}{4} \cdot 20 = 45^{\circ} \text{ über d. E.-P., also } +45 \text{ und } 32 = +77^{\circ} \text{ F.} \end{aligned}$$

u. s. w.

$$\begin{aligned} \text{Allgemein: } t^{\circ} &= \frac{5}{9}(t - 32)^{\circ} \text{ C oder auch } = \frac{4}{5}(t - 32)^{\circ} \text{ R.} \\ t^{\circ} &= \frac{9}{5}t^{\circ} \text{ R oder auch } = \frac{9}{5}t^{\circ} + 32^{\circ} \text{ F.} \\ t^{\circ} &= \frac{5}{4}t^{\circ} \text{ C oder auch } = \frac{5}{4}t^{\circ} + 32^{\circ} \text{ F.} \end{aligned}$$

Wärme-

Fig. 427.



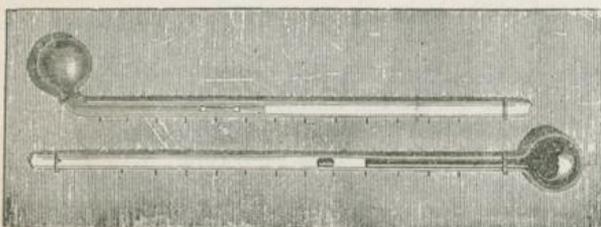
Thermometer mit der Skala nach Fahrenheit sind besonders in England und Nordamerika in Gebrauch.

Für die Beurteilung der Temperaturschwankungen, welche z. B. in der atm. Luft vorkommen, ist es häufig erwünscht, nicht nur die augenblickliche Temperatur, sondern auch die höchste und niedrigste Temperatur etwa eines Tages ermitteln zu können. Zu diesem Zwecke giebt man den Thermometern besondere Einrichtungen.

Thermometer, welche so eingerichtet sind, daß sie die innerhalb eines Zeitraumes stattgefundene höchste oder tiefste Temperatur dann noch anzeigen, wenn die Temperatur sich bereits wieder geändert hat, werden Maximum- und Minimum-Thermometer genannt.

Fig. 428 stellt die bekannteste Einrichtung eines derartigen Instrumentes dar (*Thermometrograph von Rutherford*). Das **Maximum-Thermometer** (oberes Therm.) zeigt die höchste stattgefundene Temperatur an. Vor dem Quecksilberfaden liegt ein Stahlstäbchen, das beim Steigen der Temperatur fortger-

Fig. 428



schoben wird, beim Sinken derselben liegen bleibt. — Das **Minimum-Thermometer** (unteres Therm.) giebt die niedrigste stattgefundene Temperatur an und enthält Weingeist statt Quecksilber. Im Flüssigkeitsfaden liegt ein Glasstäbchen, das beim Sinken der Temperatur infolge der Adhäsion mit zurückgeht, beim Steigen derselben liegen bleibt. Durch Neigen der Röhren bringt man die Stäbchen mit den Flüssigkeitsoberflächen in Berührung und stellt so das Thermometer für die jedesmalige Beobachtung ein.

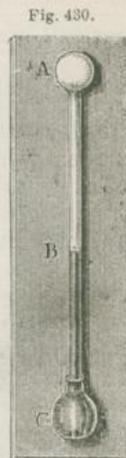
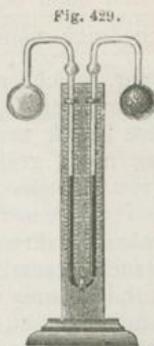
Da mit dem Gebrauch desselben manche Unzuträglichkeiten verbunden sind, so giebt man anderen Maximumthermometern den Vorzug, z. B. dem sogen. *Sixthermometer*. Dasselbe besteht aus einer zweischenklig gebogenen Glasröhre, in der durch die Ausdehnung einer Mischung von Weingeist und anderen Flüssigkeiten und deren Dämpfen ein Quecksilberfaden und durch diesen zwei Stahlstäbchen verschoben werden, die das Maximum und Minimum angeben.

Thermometer, bei denen die Ausdehnung *fester Körper* zur Temperaturbestimmung dient, sind die **Metallthermometer**. Sie bestehen aus einem schmalen, schraubenförmig gewundenen Metallstreifen (Kompensationsstreifen), welcher seiner Länge nach aus 2 Metallen zusammengelötet ist. Da letztere sich ungleichstark ausdehnen, so ändern die Windungen des Streifens bei jeder Temperaturveränderung ihre Krümmung; dadurch wird ein Zeiger gedreht, welcher die Temperatur auf einer Kreisteilung angiebt.

Zum Nachweise sehr geringer Temperaturveränderungen läßt sich mit Vorteil ein **Differentialthermometer** anwenden (Fig. 429, folg. Seite). Es besteht bei der hier angegebenen Einrichtung aus einer doppelt U-förmig gebogenen engen Glasröhre, deren Enden kugelig aufgeblasen sind, und welche eine

gefärbte Flüssigkeit (Alkohol) enthält. Eine der beiden Kugeln ist zur Anwendung bei Versuchen über strahlende Wärme (§ 125) mit Rufs geschwärzt.

Dafs die Veränderungen des Rauminhaltes, welche die Körper durch Erwärmung und Abkühlung erleiden, ein sehr brauchbares Mittel zu Temperaturbestimmungen sind, wurde zuerst von Galilei erkannt. Die ersten (noch sehr unvollkommenen) Thermometer bestanden aus einer am oberen Ende (A, Fig. 430) kugelig aufgeblasenen Glasröhre (B), welche in ihrem unteren Teile gefärbten Alkohol enthielt und in ein mit derselben Flüssigkeit gefülltes Gefäß (C) eingetaucht war. Über der Flüssigkeit enthielt die Röhre Luft. Die Einteilung dieser Thermometer war eine willkürliche. Später gab man dem Thermometer seine jetzige Gestalt. Es dauerte aber noch längere Zeit, bis man sichere und leicht bestimmbare Fundamentalpunkte einföhrte. Dies geschah erst, nachdem man erkannt hatte, dafs ein Thermometer in schmelzendem Schnee oder Eis, sowie in siedendem Wasser immer dieselbe Temperatur anzeigt. Nachdem schon Huyghens (1665) auf diese Thatsache aufmerksam gemacht hatte, wurde das erste mit festen Fundamentalpunkten versehene Thermometer von Fahrenheit in Danzig (1709) hergestellt.



Bem. Da sehr hohe Temperaturen sich weder mit Qu.- noch mit Weingeist-Thermometern bestimmen lassen, so wendet man zu diesem Zwecke besondere Instrumente an, welche **Pyrometer**¹⁾ genannt werden. Die Einrichtung derselben ist sehr verschieden (vergl. § 115) und beruht im wesentlichen auf der Ausdehnung schwer schmelzbarer Stoffe oder einer in einem Platingefäße enthaltenen Luftmenge.

Übungsstoff. 1. Warum ist die Einrichtung des ältesten Therm. unvollkommen? (Einfluß des Luftdruckes!) — 2. Warum eignen sich die Temp. von schmelzendem Eis oder Schnee und von siedendem W. ganz besonders zu Fundamentalpunkten für Therm.? — 3. Den Gefrierpunkt des nach R und C eingerichteten Therm. pflegt man zum Unterschiede von demjenigen nach F als den natürlichen zu bezeichnen; w.? — 4. Wv. beträgt die Temp. der heißen Quellen in Wiesbaden (70° C) und Karlsbad (75° C) in Graden nach R und F? — 5. Beim Bohren nach Steinsalz fand man in Sperenberg bei Berlin in einer Tiefe von ungef. 600 m eine Temp. von +26,5° R, in einer Tiefe von ungef. 1080 m +37° R, in einer Tiefe von 1334 m nahezu 41° R. Wv. Grad C und F sind dies? — 6. In London beträgt die mittlere Temp. im Januar +37° F, im August +63,5°; in Jakutzk (Sibirien) sinkt die Temp. im Januar bisweilen bis gegen -80° F, die Sonnenwärme steigt im Juli durchschnittlich bis gegen +64° F. Wv. Grad R und C sind dies?

§ 118. Veränderlichkeit der Schmelz- und Siedepunkte.

1. Schmelzpunkte. Die Temperatur, bei welcher ein Körper schmilzt oder siedet, ist im allgemeinen durch den Stoff bestimmt (§ 32); es läßt sich jedoch durch Versuche nachweisen, dafs der Schmelzpunkt, namentlich aber der Siedepunkt nicht ausschließlicly von der Natur der Körper abhängig ist. Bei allen *festen Körpern* übt der äußere Druck in folgender Weise einen Einfluß auf die Höhe des Schmelzpunktes aus:

¹⁾ πῦρ (pyr), Feuer.

Durch starken Druck wird der Schmelzpunkt bei denjenigen Körpern, welche sich beim Schmelzen ausdehnen, erhöht, bei denjenigen dagegen, welche sich beim Schmelzen zusammenziehen, erniedrigt.

Alle Körper, welche sich beim Schmelzen ausdehnen, haben, indem sie sich ausdehnen, den Druck der Luft zu überwinden. Wird nun der äußere Druck vergrößert, so ist der Widerstand, welcher überwunden werden muß, größer als vorhin; solche Körper müssen daher stärker erhitzt werden, ehe sie schmelzen. Bei Körpern, welche sich beim Schmelzen zusammenziehen, wird die Wärme durch die Vergrößerung des Druckes in ihrer Wirkung unterstützt; Körper von dieser Beschaffenheit brauchen somit nicht so stark erhitzt zu werden. In beiden Fällen indes kann der Einfluß, welchen der äußere Druck auf den Schmelzpunkt ausübt, nur sehr gering sein, da die Wirkung der Molekularkräfte hierbei bedeutend überwiegt.

Beim Wasser beträgt die Erniedrigung des Schmelzpunktes bei einer Zunahme des Druckes um 1 Atm. nahezu $\frac{1}{111}^{\circ}$ C. Eis zeigt die eigentümliche Erscheinung, daß Stücke desselben bei gegenseitiger Berührung unter Druck wieder zusammenfrieren. Wird z. B. um ein Stück Eis eine mit Gewichten belastete Drahtschlinge gehängt, so durchdringt diese das Eis zwar allmählich, das entstehende Schmelzwasser aber gefriert über dem Drahte wieder, sodaß das Eisstück ganz bleibt und beim Zerschlagen ebenso leicht in jeder anderen Richtung zerspringt, als in der, in welcher es vom Draht durchschnitten wurde. Bildet sich Eis aus Schnee unter starkem Druck (beim Pressen in Formen, Schneeball in der Hand), so wird es zähe und biegsam. Aus dieser Eigenschaft des Eises (*Regelation*) erklärt man die Erscheinungen der Gletscher, welche sich wie eine zähe Masse langsam thalabwärts bewegen und somit gleichsam im Fließen begriffene Eisströme sind; der am unteren Ende namentlich im Sommer durch Abschmelzen der Gletscherzunge eintretende Verlust wird durch steten Nachschub von oben wieder ausgeglichen.

Im Innern der Erde muß der Schmelzpunkt der festen Massen des Erdkörpers, da der Druck mit der Tiefe zunimmt, auch entsprechend höher sein als an der Erdoberfläche.

Erstarrungsverzug oder Überschmelzung. Während sich feste Körper nicht über ihren Schmelzpunkt erwärmen lassen, ohne zu schmelzen, können sich umgekehrt viele Flüssigkeiten, wenn ihre Temperatur langsam sinkt und Erschütterungen und Luftzutritt vermieden werden, ziemlich tief unter ihren Gefrierpunkt abkühlen, ehe sie erstarren.

Bei strenger Winterkälte kann man diesen als *Erstarrungsverzug*, *Überschmelzung* oder *Unterkühlung* bezeichneten Vorgang häufig an Wasser beobachten, welches im kalten Zimmer längere Zeit gestanden und sich langsam unter 0° abgekühlt hat. Sobald das Wasser erschüttelt wird (z. B. durch Ausgießen), verwandelt es sich in einen Brei von Eisnadeln und die Temperatur desselben steigt auf 0° . Am leichtesten tritt der Erstarrungsverzug bei Wasser ein, welches man vorher durch Auskochen luftleer gemacht hat; hierauf beruht ein unter dem Namen *Wasserhammer* bekannter Apparat (Fig. 436), der luftfreies Wasser enthält, welches man leicht auf -6° bis -8° abkühlen kann, ohne daß es erstarbt. — Der Erstarrungsverzug tritt auch häufig bei Wassertröpfchen ein, welche in der Luft frei schweben und erst durch Erschütterung (beim Herabfallen z. B.) erstarren (Wichtigkeit dieses Vorganges bei der Bildung von Glatteis, Raureif, Graupeln und Hagel).

In sehr anschaulicher Weise läßt sich der Erstarrungsverzug an *unterschwefligsaurem Natron* beobachten (vergl. § 119, Versuch c).

Eine eigentümliche Veränderung ihrer Schmelzpunkte zeigen Metalle beim Zusammenschmelzen (*Metallgemische* oder *Legierungen*). Bei diesen liegt näm-

lich der Schmelzpunkt gewöhnlich tiefer als das Mittel aus den Schmelzpunkten der Bestandteile.

Während z. B. Blei erst bei ungefähr 300°, Zinn bei 230° C schmilzt, liegt der Schmelzpunkt des sogen. Schnell- oder Weichlotens, einer Legierung aus beiden Metallen (1 Teil Blei und 2 Teile Zinn) bei 170°. — Schmilzt man 2 Teile Blei, 2 Teile Zinn, 7 bis 8 Teile Wismut (Schmelzpunkt 270° C) und 2 Teile Kadmium (Schmelzpunkt 320° C) zusammen, so erhält man eine Legierung, welche schon bei 65° bis 70° C (z. B. beim Eintauchen in nahezu kochendes Wasser) schmilzt (Wood'sches Metallgemisch).

Zum Schmelzen der Eisenerze in Hochöfen wendet man, um die Erze leichter in Fluß zu bringen, als Zusatz gewisse Mineralien an (Flussspat, Kalk, Quarz).

2. Siedepunkte. Eine Flüssigkeit kann in offenen Gefäßen erst dann sieden, wenn die Dampfspannung dem Luftdrucke gleich ist, da letzterer von den Dämpfen überwunden werden muß (§ 33). Hiernach läßt sich erwarten, daß eine Flüssigkeit stärker als gewöhnlich erhitzt werden muß, wenn der äußere Druck vergrößert wird, dagegen schon bei einer niedrigen Temperatur siedet, wenn man den äußeren Druck vermindert. Ersteres lehren die beim Gebrauch dicht verschlossener Kochgefäße (sogen. *Papinsche Töpfe*, Fig. 432) und namentlich bei Dampfmaschinen eintretenden Erscheinungen; letzteres läßt sich daraus schließen, daß auf hohen Bergen das Wasser in offenen Gefäßen bei weniger als 100° siedet, auf dem St. Bernhard (2500 m Höhe) z. B. bei 92°, auf dem Montblanc (4600 m Höhe) bei 85°.

Versuch a. Unter dem Recipienten einer Luftpumpe siedet Wasser von 50 bis 60° C. schon nach einigen Kolbenzügen (s. § 87, Versuch d.).

***Versuch b.** Läßt man W. in einer Kochflasche (Fig. 431) kurze Zeit kochen, verschließt darauf die Flasche möglichst dicht und kehrt sie um, so fängt das Wasser wieder an zu sieden, sobald man sie durch Übergießen mit kaltem Wasser oder durch Eis und Schnee von außen abkühlt (Erklärung!). Das Sieden erfolgt stofsweise.

Der Siedepunkt einer Flüssigkeit hängt nicht allein von der Natur der Flüssigkeit, sondern auch von der Größe des äußeren Druckes ab.

Unter dem *normalen Siedepunkt* versteht man *diejenige Temperatur, bei welcher eine Flüssigkeit unter dem mittleren Luftdrucke von 760 mm siedet*; die Spannkraft ihrer Dämpfe ist dann gleich diesem Drucke.

Folgende Tabelle zeigt für Wasser die Abhängigkeit des Siedepunktes vom Luftdrucke, der durch eine in mm angegebene Quecksilbersäule gemessen ist.

Siedepunkt ° C	Druck in mm Quecksilber	Siedepunkt ° C	Druck in mm Quecksilber
50	92,0	97	682,0
60	148,8	98	707,3
70	233,1	98,5	720,1
80	354,6	99	733,2
90	525,4	99,5	746,5
95	633,8	100	760,0
96	657,5	101	787,6

In einem offenen Gefäße läßt sich demnach eine Flüssigkeit nicht über den Siedepunkt erhitzen, welcher dem gleichzeitigen Luftdrucke entspricht; in einem geschlossenen Gefäße dagegen steigert sich die Dampfspannung und damit erhöht sich auch der Siedepunkt, der z. B. bei 2 Atmosphären Druck 121°, bei 3 Atm. 134° beträgt (vgl. § 122). Eine Anwendung hiervon wird bei dem sogen. Papinschen

Fig. 431.



ör-
gen
gt.

dem
ird
ber-
her
sich
fse-
Be-
In
auf
der

iner
iche
ruck
be-
das
Eis-
ung
sich
der
elase
asse
me
ber-
hen.
Erde-
s an

rper
sich
Er-
ren

mel-
ches
hat.
h in
ich-
Aus-
ner
auf
tritt
erst
ages

flig-
weim
äm-

Topf oder Dampfkochtopf gemacht (Fig. 432); warum ist derselbe an Orten, die eine beträchtliche Meereshöhe haben, für Haushaltzwecke sehr wichtig? — Das

Fig. 432.



Sieden bei geringem Drucke findet eine Anwendung bei der Zuckerfabrikation. Um aus den Zuckersäften der Rüben in kurzer Zeit möglichst viel krystallisierten Zucker zu gewinnen und eine Zersetzung der Säfte zu verhüten, läßt man dieselben in geschlossenen Pfannen, sogen. *Vakuum-pfannen*, aus denen man zur Erniedrigung des Siedepunktes Luft und Dämpfe mittelst Luftpumpen entfernt, bei 60° bis 70° C kochen.

Der Siedepunkt von Flüssigkeiten kann auch dadurch erhöht werden, daß man *Salze* in denselben auflöst (eine gesättigte Lösung von Kochsalz z. B. siedet bei 108,5°). Ferner übt auf das Sieden das Vorhandensein oder Fehlen von *Gasen* in einer Flüssigkeit einen Einfluß aus; das Sieden luftfreien (ausgekochten) Wassers z. B. tritt erst bei höherer Temperatur und dann stofsweise unter Bildung großer Dampfblasen ein, da die dem Sieden sonst vorausgehende Bildung von Luftbläschen, welche Dampfteilchen aufnehmen können, fehlt. Diese Erscheinung heißt *Siedeverzug* oder *Überhitzung*.

Manche Flüssigkeiten, z. B. Öl, kochen gewöhnlich stofsweise. Um dies zu verhüten, braucht man nur Thonscherben oder dergl. hineinzuwerfen. (Erkläre dies!)

Siedeverzüge können auch leicht eintreten, wenn nicht die Flüssigkeit erhitzt, sondern der äußere Druck stark vermindert wird (vergl. Versuch b. Fig. 431). Bleibt daher die Temperatur der Flüssigkeit weit über demjenigen Siedepunkte, welcher dem äußeren Drucke entspricht (bei Dampfkesseln z. B. während einer längeren Arbeitsruhe, wenn die Kesselwand über dem Wasserspiegel sich stärker abkühlt als das Wasser), so kann die plötzliche Dampfbildung eine Explosion zur Folge haben.

Leidenfrostsche Tropfen. Ein *Versuch mit einigen Wassertropfen, die man auf eine bis nahe zum Rotglühen erhitzte, sehr flache Blechschale fallen läßt, zeigt, daß geringe Flüssigkeitsmengen auf einer sehr stark erhitzten metallischen Unterlage eine tropfenähnliche Gestalt annehmen und schließendlich mit heftigem Zischen verdampfen.

Erklärung: Durch die starke Hitze des Metalles entsteht unter dem Tropfen eine Dampfschicht (Fig. 433), von welcher derselbe getragen und so vor

Fig. 433.



der unmittelbaren Einwirkung der Wärme geschützt wird. Da ferner dem Tropfen durch die fortgesetzte Dampfbildung Wärme entzogen wird, so liegt seine Temperatur immer noch mehrere Grade unter dem Siedepunkte. Kühlt sich die Unterlage bis nahe zum Siedepunkte der Flüssigkeit ab, so verschwindet die Dampfschicht und der Tropfen kommt mit dem Metalle in Berührung; dadurch steigt seine Temperatur so schnell, daß eine plötzliche Verdampfung stattfindet.

Eine ähnliche Erscheinung tritt auch ein, wenn sehr heißes Metall in Wasser getaucht wird (Ablöschen von glühendem Eisen), oder wenn Dampfkessel erst dann gespeist werden, nachdem die Kesselwand über dem Wasser sich bereits bis zum Glühen erhitzt hat (Ursache mancher Kesselexplosionen). — Die merkwürdige, schon seit alten Zeiten in Schmelzhütten bekannte Erscheinung, daß man die Hände kurze Zeit in geschmolzenes Metall eintauchen kann, ohne sich zu verbrennen, scheint sich ebenfalls aus der Bildung einer dünnen Dampfschicht zu

erklären, welche die feuchte Haut vor der Berührung mit dem glühenden Metall schützt. (Feuerproben des Mittelalters.)

Übungsstoff. 1. Warum lassen sich Gegenstände aus Blei oder Zinn mit einer Legierung aus Blei und Zinn löten? — 2. Die Deckel der Kochtöpfe werden bisweilen belastet. Welchen Einfluß hat dies auf die Temp. der Speisen und welche Vorsicht ist dabei anzuwenden? — 3. In einem Dampfkessel sei das W. über 100° erhitzt. Was wird eintreten, a. wenn man die Dämpfe abströmen läßt, b. wenn die obere Kesselwand sich schneller abkühlt als das W.? — 4. Angenommen, die Π förmige Röhre (Fig. 110) sei aus 2 durch einen kurzen Gummischlauch verbundenen Teilen zusammengesetzt; wie liefse sich dann nach dem Sieden des W. der Dampf leicht absperren, und ohne Flamme ein Sieden bewirken? — 5. Warum muß hierzu, wie bei Versuch b (Fig. 431), der Dampf erst einige Zeit ausgeströmt sein, ehe man ihn absperrt? — 6. Wie groß würde nach der obigen Tabelle der Luftdruck an einem Orte sein, an dem W. in einem offenen Gefäße bei $98, 95, 90^{\circ}$ siedet? — 7. Wie könnte man darnach die Höhe eines Ortes über dem Meere durch Beobachtung an einem Therm. bestimmen? — 8. Warum sind an den zu diesem Zwecke verwendeten Therm. (sogen. Hypsothermometern) nur wenige Grade der Skala (unterhalb des Siedepunktes) nötig, und warum müssen diese in sehr kleine Bruchteile geteilt sein? — 9. Ausgekochtes W. siedet in einem Gefäße, das längere Zeit leer gestanden hat, leichter, als wenn man es in ein Gefäß gießt, in welchem unmittelbar vorher W. gekocht wurde; w.? — 10. Wird Weingeist oder W. auf heißen Unterlagen länger einen Leidenfrostschen Tropfen bilden können?

§ 119. Schmelz- und Erstarrungswärme. Nach den bisherigen Betrachtungen über die Wirkungen der Wärme könnte es scheinen, als ob die Temperatur eines Körpers unter allen Umständen durch Aufnahme von Wärme steigen und durch Abgabe von Wärme sinken müßte, wie es thatsächlich auch der Fall ist, wenn der Körper seinen Aggregatzustand beibehält, wenn also z. B. der feste Körper fest, der flüssige flüssig bleibt. Sobald jedoch mit der Erwärmung oder Abkühlung eine Änderung des Aggregatzustandes verbunden ist, treten besondere Erscheinungen ein, wie folgende Versuche lehren.

***Versuch a.** Wird Schnee oder zerstoßenes Eis von 0° in einem Gefäße erwärmt, so bleibt die Temperatur (bei genügendem Umrühren der Masse) solange dieselbe, bis der Schnee oder das Eis vollständig geschmolzen ist. — Mischt man Schnee oder gestoßenes Eis mit ebensoviel kochendem Wasser, so kühlt sich letzteres dadurch viel stärker ab, als durch Zusatz von gleichviel kaltem Wasser.

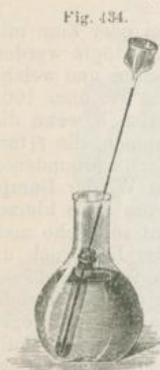
Wird 1 kg Schnee oder Eis von 0° in ebensoviel Wasser von nahezu 80° geschmolzen, so erfolgt eine Abkühlung des Wassers bis 0° .

Beim Schmelzen oder Auflösen von anderen festen Körpern treten ähnliche Erscheinungen ein. Mischt man 1 Teil Schnee mit 2 Teilen Kochsalz, so schmelzen beide Körper und die Temperatur sinkt bis gegen -20° C: Kältemischung.

Schnee und Kochsalz wird als Kältemischung namentlich bei physikalischen Versuchen angewandt. Durch Mischung von Schnee und Schwefelsäure läßt sich die Temperatur bis auf -60° erniedrigen.

***Versuch b.** Schüttet man Glaubersalz, Soda, Salpeter, Salmiak oder dergl. unter Umrühren in Wasser von gewöhnlicher Temperatur, so sinkt die Temperatur des Wassers je nach der Natur der gelösten Körper, wie sich durch Anwendung eines Differentialthermometers oder Thermoskopes leicht nachweisen läßt.

***Versuch c.** In einem weithalsigen Kochfläschchen schmelze man unterschwefligsaures Natron (Schmelzpunkt 57°C) und lasse die geschmolzene Masse, nachdem man ein Thermoskop (Fig. 434) hineingestellt hat, sich langsam auf $+12^{\circ}$ bis 15°C abkühlen (Erstarrungsverzug). Wirft man dann einige Körnchen desselben Salzes in die Flüssigkeit, so krystallisiert diese ziemlich schnell, wobei das Thermoskop sehr deutlich eine Temperaturerhöhung anzeigt. Aus diesen Erscheinungen muß man schließen:



Alle festen Körper verbrauchen Wärme beim Schmelzen (**Schmelzwärme**); alle flüssigen Körper erzeugen Wärme beim Erstarren (**Erstarrungswärme**).

Genauere Untersuchungen lehren:

Die Erstarrungswärme eines Körpers ist der Schmelzwärme gleich.

Das Thermometer zeigt den Wärmezustand eines Körpers an, nicht aber die Wärmemengen, welche ein Körper zum Schmelzen verbraucht oder beim Erstarren erzeugt. Zur Vergleichung dieser Wärmemengen muß eine geeignete Wärmeeinheit festgesetzt werden.

Unter einer Wärmeeinheit oder Kalorie¹⁾ versteht man diejenige Wärmemenge, welche 1 kg Wasser aufnimmt, wenn es von 0° bis 1°C erwärmt wird, also auch abgibt, wenn es von 1° bis 0° abgekühlt wird.

Beim Verflüssigen eines festen Körpers gehen die Teilchen desselben aus dem festen Zusammenhange in den Zustand großer Beweglichkeit über; beim Erstarren verlieren sie diese Beweglichkeit wieder. Im ersteren Falle muß der Widerstand der Kohäsion (*innerer Widerstand*) nahezu ganz überwunden werden. Dehnt sich ein Körper beim Schmelzen aus, so ist außerdem noch der Widerstand des Luftdruckes (*äußerer Widerstand*) zu überwinden. Nach dem Verflüssigen des festen Körpers ist daher die von demselben aufgenommene Wärme als solche nicht mehr vorhanden. Nach den früheren Vorstellungen vom Wesen der Wärme, die man sich als einen Stoff vorstellte, konnte man nicht annehmen, daß ein Teil dieses Wärmestoffes beim Schmelzen verloren gehe; mithin dachte man sich denselben in einen besonderen Zustand übergeführt, in dem er keine Einwirkung auf das Thermometer äußern könne: *latente* oder *gebundene Wärme*. Die neuere Theorie, welche das Wesen der Wärme als einen Bewegungsvorgang erkannt hat, macht diese Annahme überflüssig, indem sie den Verbrauch von Wärme beim Schmelzen einfach dadurch erklärt, daß zur Trennung der Teilchen des festen Körpers eine gewisse Arbeit erforderlich ist, welche durch die Wärme geleistet wird. Erstarrt der geschmolzene Körper, so kommt diese innere Arbeit in der Form von Wärme wieder zum Vorschein, sie ist nun im Sinne der älteren Anschauungen wieder *freie Wärme* (vergl. auch § 147).

Beispiele: 1 kg Eis oder Schnee verbraucht beim Schmelzen nahezu 80 Wärmeeinheiten (genauer 79,25), 1 kg Wasser erzeugt, wenn es erstarrt, dieselbe

¹⁾ calor, Wärme.

Anzahl von Wärmeeinheiten. — Die Schmelz- und Erstarrungswärme beträgt für 1 kg Zink ungefähr 28, Zinn 14, Silber 11, Blei und Schwefel nur 5 Wärmeeinheiten. Eis hat von allen Körpern die größte Schmelzwärme.

Dadurch, daß Eis und Schnee beim Schmelzen viel Wärme verbrauchen und Wasser beim Gefrieren viel Wärme erzeugt, werden die Temperaturübergänge während der kalten Jahreszeit etwas gemildert. Ohne die hohe Schmelzwärme würde auch das Auftauen des Eises und Schnees bedeutend schneller erfolgen.

Übungsstoff. 1. Welchen Einfluß muß es auf die Temp. einer Flgk. ausüben, wenn man Zucker oder einen anderen festen K. in derselben auflöst? — 2. Obst oder dergl. läßt sich in Kellern dadurch gegen das Gefrieren schützen, daß man flache Schalen mit W. daneben stellt. Zur Erklärung der Ersch. sagt man „das W. ziehe die Kälte an“. Welches ist der wahre Grund? — 3. Warum kann man heißes W. durch Schnee oder Eis stärker abkühlen als durch ebensoviel eiskaltes W.? (Anwendung der sogen. „Eisbeutel“.) — 4. Um wv. Grad kann 1 kg W. von 0° sich erwärmen, bis es ebensoviel Wärme aufgenommen hat als 1 kg Schnee oder Eis beim Schmelzen verbraucht? — 5. Wie kann man im warmen Zimmer W. auf einem Teller gefrieren lassen? — 6. W. erklärt es sich, daß das W., welches durch die Einwirkung von Kochsalz auf Schnee entsteht, bei starkem Sinken der Temp. nicht wieder gefriert und warum streut man bei Schneefall Kochsalz auf die Schienen der Pferdeisenbahnen? — 7. Wv. kochendes W. ist erforderlich, um 50 kg Eis von 0° zu schmelzen? — 8. Wv. Eis von 0° kann durch 20 kg kochendes W. geschmolzen werden? — 9. Wv. W. könnte durch die Wärme, welche bei der Bildung von 1 kg Eis entsteht, um 1° C erwärmt werden? — 10. Warum ist von der beim Gefrieren der Gewässer entstehenden Wärme in der Natur wenig wahrzunehmen?

§ 120. Verdampfungs- und Kondensationswärme.

Versuch a. Wird die nicht geschwärzte Kugel des Differential-Thermometers (Fig. 429) nacheinander mit Äther, Weingeist und Wasser benetzt, so zeigt der Flüssigkeitsfaden des Thermometers beim Äther die stärkste, beim Wasser die geringste Temperaturerniedrigung an.

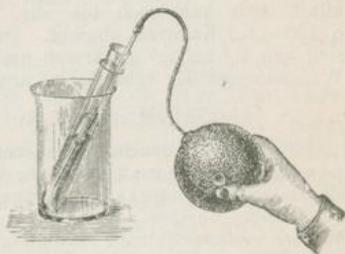
***Versuch b.** Läßt man in einem Probierglase, das in ein mit kaltem Wasser gefülltes weiteres Glas gestellt ist (Fig. 435), reinen Äther verdunsten, daß man mittelst eines Blasebalges Luft hindurchtreibt, so sinkt die Temperatur des Äthers in kurzer Zeit unter 0° und es bildet sich eine Eisschicht zwischen den Gläsern.

Unter dem Recipienten der Luftpumpe verdampft Äther sehr schnell und bringt Wasser in einem Uhrschälchen leicht zum Gefrieren (vergl. § 87, Versuch d).

***Versuch c.** Erwärmt man gleiche Mengen kalten Wassers (etwa 200 cem) in 2 Glascylindern, indem man in den einen Cylinder Dämpfe von kochendem Wasser leitet und in den andern ebensoviel kochendes Wasser gießt, so steigt die Temperatur im ersten Cylinder bedeutend höher als im zweiten, obgleich Dämpfe von kochendem Wasser nicht heißer sind als das Wasser selbst.

Während des Siedens von Wasser in einem offenen Gefäße bleibt das Thermometer bei 100° C stehen (§ 32, Versuch c); die zugeführte

Fig. 435.



Wärmemenge ist also zur Dampfbildung verbraucht worden. Umgekehrt wird beim Übergang des Dampfes in den flüssigen Zustand die vorher gebundene Wärme wieder frei.

Ähnliche Erscheinungen treten stets ein, wenn Flüssigkeiten dampfförmig oder wenn Dämpfe flüssig werden.

Alle Flüssigkeiten verbrauchen Wärme, wenn sie dampfförmig werden (Verdampfungswärme); alle Dämpfe erzeugen Wärme, wenn sie flüssig werden (Kondensationswärme).

Die Kondensationswärme eines Körpers ist gleich seiner Verdampfungswärme.

Die Verdampfungswärme wird wie die Schmelzwärme zur Überwindung eines inneren und eines äußeren Widerstandes (der Kohäsion und des Luftdruckes) verbraucht. Sie hat also eine Arbeit geleistet und ist nach der Verdampfung der Flüssigkeit als Wärme nicht mehr vorhanden; wenn der Dampf sich wieder zu Flüssigkeit kondensiert, so kommt die vorher verbrauchte Wärme als solche wieder zum Vorschein.

Auf diesem Vorgange beruht das Verfahren zur Ermittlung der Verdampfungswärme: Man leitet Dampf durch ein schlangenförmig gewundenes Metallrohr, welches in einem Kühlgefäße von einer bestimmten Menge kalten Wassers umgeben ist. An dieses giebt der Dampf, indem er sich im Schlangenrohr kondensiert, die Dampfwärme ab, welche mithin aus dem Gewicht und der Temperaturerhöhung des Kühlwassers berechnet werden kann. Sind z. B. q gr Wasserdampf von 100° zu Wasser von 100° verdichtet worden, so hat der Dampf qx Wärmeinheiten abgegeben, wenn x die Verdampfungswärme bezeichnet. Dieses Kondensationswasser kühlt sich nun noch bis zur Temperatur des Kühlwassers (t_2) ab, wobei es $q(100 - t_2)$ Kalorien abgiebt. Die Menge des Kühlwassers betrage q_1 kg, welche sich von t_1° auf t_2° erwärmen und mithin $q_1(t_2 - t_1)$ Kalorien aufnehmen. Da diese Wärmemenge der vom Dampf abgegebenen gleich ist, so gilt mithin die Gleichung

$$qx + q(100 - t_2) = q_1(t_2 - t_1), \quad \text{woraus sich } x \text{ leicht bestimmen läßt.}$$

Genaue Versuche haben ergeben, daß Wasser die größte Verdampfungswärme hat und zwar beträgt dieselbe 537 Wärmeinheiten. 1 kg siedender Weingeist verbraucht ungefähr 210, 1 kg siedender Äther nur 90 Wärmeinheiten. Zum Verdunsten ist noch mehr Wärme erforderlich; 1 kg Wasser verbraucht zum Verdunsten bei gewöhnlicher Temperatur gegen 600 Wärmeinheiten. Dadurch, daß die zum Verdunsten nötige Wärme der Umgebung entzogen wird, entsteht Verdunstungskälte. Die Verdunstungskälte ist bei manchen Flüssigkeiten sehr bedeutend. So entsteht z. B. beim Verdunsten flüssiger Kohlensäure eine Kälte von ungefähr -60° . Wird die dabei sich bildende schneeähnliche feste Kohlensäure mit Äther gemengt und unter den Recipienten der Luftpumpe gebracht, so läßt sich durch Verdünnung der Luft eine Kälte von -110° erzeugen. (Anwendung der Verdunstungskälte zur Verdichtung von Gasen bei gleichzeitiger Erhöhung des Druckes, siehe Seite 119 und 310.)

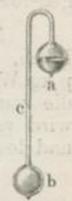
Die Eigenschaft des Wassers, beim Verdunsten sehr viel Wärme zu verbrauchen, sowie diejenige des Wasserdampfes, ebensoviel Wärme bei seiner Kondensation wieder zu erzeugen, ist im Haushalte der Natur für die Milderung klimatischer Gegensätze äußerst wichtig. Die erwärmten Luftmassen, welche über den Meeren heißer Gegenden täglich aufsteigen, sind sehr reich an Wasserdämpfen, von denen ein großer Teil durch Winde kälteren Ländern zugeführt wird. Sobald diese Dämpfe sich zu Wolken verdichten, geben sie die bei ihrer Entstehung aufgenommene Wärme wieder ab.

Von der Kondensationswärme des Wasserdampfes macht man bei der Dämpf-
heizung eine wichtige Anwendung.

Durch den Wärmeverbrauch, welcher bei der Verwandlung einer Flüssigkeit
in Dampf stattfindet, wird es möglich, Eis in größerer Menge künstlich
herzustellen. Man verwendet hierzu Flüssigkeiten, welche einen niedrigen Siede-
punkt haben, wie z. B. Äther oder Ammoniak, und bringt dieselben durch besondere
Vorrichtungen zum schnellen Verdunsten (Eismaschinen).

Übungsstoff. 1. Zinnerne Gefäße schmelzen beim Erhitzen leicht, wenn sie
leer sind, nicht aber, wenn sie mit W. gefüllt sind. Erkl. und Anwendung auf Koch-
gefäße, deren Boden angelötet ist. — 2. Warum ist es verschwenderisch, unter Koch-
töpfen noch stark nachzuheizen, wenn das W. bereits siedet? — 3. Wird beim Kochen in
offenen oder in geschlossenen Gefäßen mehr Feuerung verbraucht? — 4. Warum läßt
sich W. durch Dämpfe bis zum Sieden erhitzen, nicht aber durch Hinzugießen von
kochendem W.? — 5. Erkläre die Abkühlung durch Besprengen des Fußbodens,
desgl. die des Trinkwassers in locker gebrannten, unglasierten Thonflaschen, das
Kältegefühl nach dem Baden und nach Durchnässung der Kleidung. — 6. In man-
chen Gegenden gräbt man an heißen Sommertagen Flaschen, deren Inhalt man
abkühlen will, in den feuchten Boden und zündet auf kurze Zeit Feuer darüber an.
Erkl.! — 7. Wird die untere der beiden Glaskugeln eines luftleeren Kryophors
(Eisträger, Fig. 436) in eine Kältemischung gestellt, so gefriert das in der oberen
Kugel enthaltene W. leicht. Erkl.! — 8. Bei vorigem Versuche bildet sich
eine Eisdecke; kühlt man den Apparat ganz allmählich (etwa im Freien)
stark ab, ohne ihn zu erschüttern, so entsteht beim kräftigen Schütteln ein
Eisbrei (§ 118). Erkl.! — 9. Tropfen von W., Weingeist und Äther lassen
sich auf der Hand leicht durch das Gefühl voneinander unterscheiden.
Erkl.! — 10. Warum muß es bedeutend länger dauern, bei derselben
Wärmefuhr kochendes W. in Dampf zu verwandeln, als ebensoviel W. von
0° bis zum Sieden zu erhitzen? — 11. Wv. kg eiskaltes W. kann man mit
derjenigen Wärmemenge, welche zum völligen Verdampfen von 1 kg kochen-
den W. nötig ist, bis zum Sieden erhitzen? — 12. Wievielmals soviel Wärme
verbraucht 1 kg W. beim Verdampfen als 1 kg Eis beim Schmelzen?

Fig. 436.



§ 121. Specifiche Wärme. Die in den beiden vorigen
Paragraphen angeführte Thatsache, dafs zum Schmelzen wie zum Ver-
dampfen gleicher Gewichtsmengen verschiedener Körper un-
gleiche Wärmemengen erforderlich sind, legt uns die Frage nahe,
ob die Körper ähnliche Verschiedenheiten auch bei gleicher Temperat-
zunahme zeigen werden. Gewisse Beobachtungen scheinen dies zu be-
stätigen. So erwärmt sich z. B. bei gleicher Bestrahlung durch die
Sonne das Wasser bedeutend langsamer als der feste Boden und die
Luft, wie es sich andererseits unter sonst gleichen Verhältnissen auch
langsamer wieder abkühlt. (Bekannte Erfahrung beim Baden in offenen
Gewässern.) Wasser scheint somit zu gleicher Temperaturerhöhung mehr
Wärme zu erfordern als andere Körper.

Die Vermutung, ob gleiche Gewichtsmengen
verschiedener Körper zu gleicher Temperatur-
erhöhung ungleicher Wärmemengen bedürfen,
läßt sich durch folgenden Versuch prüfen.

Versuch. 1. Legt man gleichschwere Kugeln
aus verschiedenen Metallen (z. B. Eisen und Blei),
die in kochendem Wasser erhitzt werden, auf eine
Scheibe von Wachs (Fig. 437), so schmelzen dieselben verschieden tief ein.

Fig. 437.



2. Wenn man gleiche Gewichtsmengen bis zu gleicher Temperatur erhitze Eisenfeilspäne und Bleischnitzel nacheinander mit einer bestimmten Menge kalten Wassers mischt, so wird dasselbe ungleichstark erwärmt.

Da gleiche Gewichtsmengen der betreffenden Metalle bei gleicher Temperaturabnahme ungleiche Wärmemengen abgeben, so müssen sie umgekehrt bei gleicher Temperaturzunahme auch verschiedene Wärmemengen aufgenommen haben. Diese Folgerung führt zum Begriff der „spezifischen Wärme“.

Unter der spezifischen Wärme oder Wärmekapazität¹⁾ eines Körpers versteht man die Wärmemenge, welche 1 kg desselben zu einer Temperaturerhöhung von 1° C bedarf.

Zur genauen Bestimmung der spec Wärme fester und flüssiger Körper dienen folgende Methoden:

1) **Die Mischungsmethode.** Der gewogene und bis zu einer bestimmten Temperatur erhitze Körper wird zur Abkühlung in eine bestimmte Menge Wasser getaucht. Hierauf berechnet man aus dem Gewichte und der Temperaturerhöhung des Wassers die vom Körper abgegebene Wärmemenge, wonach sich seine spec. Wärme bestimmen läßt.

Man bedient sich hierbei eines Kalorimeters, d. h. eines Gefäßes aus Blech, welches mit schlechten Wärmeleitern umgeben ist. Werden in demselben p kg Wasser durch den hineingebrachten Körper von t_1^0 auf t_2^0 erwärmt, so beträgt die vom Wasser aufgenommene Wärme $p(t_2 - t_1)$ Kalorien. Diese Wärmemenge wird vom Körper abgegeben, dessen Gewicht P kg, dessen Anfangstemperatur T^0 und dessen gesuchte spec. Wärme x genannt werden soll. Mithin besteht die Gleichung:

$$P(T - t_2)x = p(t_2 - t_1), \text{ woraus sich } x = \frac{p(t_2 - t_1)}{P(T - t_2)} \text{ ergibt.}$$

Bei genauen Bestimmungen muß berücksichtigt werden, daß auch das Kalorimeter selbst und das eingetauchte Thermometer Wärme aufnehmen.

Mischt man Wasser mit Wasser, so vereinfacht sich die vorige Gleichung (da $x = 1$ ist), und es ergibt sich die sogen. Richmannsche Regel, welche zur Berechnung der Mischungstemperatur dient.

$$P(T - t_2) = p(t_2 - t_1), \text{ woraus folgt: } t_2 = \frac{PT + pt_1}{P + p}.$$

2) **Die Methode des Eisschmelzens.** Man läßt den Körper in Eis bis auf 0^0 erkalten und berechnet aus dem Gewichte des abfließenden Schmelzwassers, wieviel Wärmeeinheiten zum Schmelzen verbraucht worden sind.

Hierzu bedient man sich entweder besonderer Apparate, der sogen. Eiskalorimeter, oder man bringt den erhitzten Körper in eine in einem Eisblock hergestellte Höhlung, die man mit einem Stück Eis verschließt. Sind durch die vom Körper abgegebene Wärme p kg Schmelzwasser entstanden, so werden hierzu $80 \cdot p$ Kalorien verbraucht. Es ergibt sich mithin, wenn das Gewicht des Körpers P kg und seine Temperatur t^0 beträgt, die Gleichung:

$$Ptx = 80p, \text{ woraus folgt: } x = \frac{80p}{P \cdot t}.$$

In folgender Tabelle sind in abgerundeten Zahlen einige Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen über die spec. Wärme verschiedener Körper zusammengestellt.

¹⁾ *capacitas, Geräumigkeit (Fassungsvermögen).*

Wasser	1,00	Kochsalz	0,21	Äther	0,52
Eis	0,50	Erdboden	0,22	Sauerstoff	0,22
Blei, Gold, Platin, Qu.	0,03	Gips	0,26	Atm. Luft	0,24
Zinn und Silber	0,06	Terpentinöl	0,42	Stickstoff	0,24
Zink und Kupfer	0,10	Alkohol	0,60	Wasserdampf	0,48
Eisen und Nickel	0,11	(Dichte 0,81)		Wasserstoff	3,41
Quarz und Glas	0,20	Schwefelkohlenstoff	0,22		

Im allgemeinen hat ein Körper im flüssigen Zustande zu gleicher Temperaturerhöhung mehr Wärme nötig als im festen Zustande. Dies ist namentlich der Fall bei Eis und Wasser.

Da sich bei den Gasen weit mehr als bei den flüssigen und festen Körpern der Rauminhalt durch äusseren Druck ändert, so hat man bei der Bestimmung der spec. Wärme der Gase zwei Fälle zu unterscheiden: 1) Das Gas kann sich durch Erwärmung bei gleichbleibendem äusseren Drucke ausdehnen; 2) das Gas ist so eingeschlossen, daß es sich durch die Erwärmung nicht ausdehnen kann, sein Rauminhalt also derselbe bleibt. Im ersteren Falle ist zu gleicher Temperaturerhöhung mehr Wärme nötig, da dann die Wärme bei der Ausdehnung des Gases einen äusseren Widerstand zu überwinden hat. Auf jenen Fall beziehen sich auch die in obiger Tabelle für Gase angegebenen Zahlen.

Durch die hohe spezifische Wärme des Wassers üben die Meere einen mildernden Einfluß auf das Klima aus. Da nämlich das Wasser zu seiner Erwärmung sehr viel Wärme erfordert, so steigt die Temperatur des Meeres unter der Einwirkung der Sonnenstrahlen sehr langsam und ebenso langsam erfolgt auch die Abkühlung. Der feste Boden hat eine geringe spezifische Wärme und ein großes Ausstrahlungsvermögen. Die Temperaturveränderungen des Meeres müssen daher bedeutend geringer ausfallen, als diejenigen des Festlandes. Durch die Nähe des Meeres werden somit die Länder gegen starken Temperaturwechsel geschützt. Diese ausgleichende Wirkung, welche das Meer auf das Klima ausübt, macht sich namentlich auf den Inseln bemerklich (vergl. § 128).

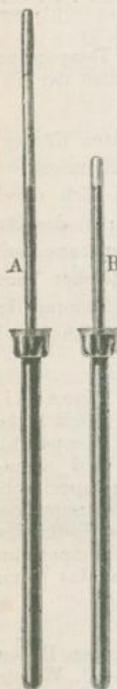
Übungsstoff. 1. Landwirte bezeichnen nassen Boden als kalten Boden. Suche Gründe für die geringere Erwärmungsfähigkeit desselben auf! — 2. Welche Flgk. läßt sich schneller erwärmen: W. oder Qu., u. w.? — 3. Wv. Wärmeeinheiten sind ausreichend, um eine Mischung von 1 kg W. und 1 kg Qu. um 10° zu erwärmen? — 4. Eine rotglühende eiserne Kugel von 1 kg Gew. wird in 10 kg W. von 10° abgekühlt. Um wv. erhöht sich die Temp. des W., wenn die Temp. der Rotglut zu 500° angenommen wird? — 5. Wv. kg Luft können durch die von 1 kg W. abgegebene Wärme, wenn sich dasselbe um 5° abkühlt, um 5° erwärmt werden? — 6. Wv. cbm Luft können durch die Wärme, welche aus 1 kg kondensiertem Wasserdampf frei wird, um 1° C wärmer werden? (Luft ist ungefähr 770 mal so leicht als W.) — 7. Umgiebt man eine bis zu 100° C erhitze kupferne Kugel von 1 kg ganz mit Eis, so wird 0,12 kg Eis dadurch geschmolzen. a. Wv. Wärmeeinheiten hat die Kugel abgegeben? b. Wie groß ist hiernach die spec. Wärme des Kupfers? — 8. Wv. kg Eisen, Zink und Blei von 100° würden zum Schmelzen jener Menge Eis erforderlich sein? — 9. Um wv. Grad können diese Metalle mit derselben Wärmemenge erwärmt werden, durch welche die Temp. eines gleichen Gew. W. um 10° C erwärmt wird?

§ 122. Spannung der Dämpfe. Dämpfe und Gase.

Die Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten besitzen eine Spannung (§ 33), vermöge welcher sie sich auszudehnen suchen und sich also wie Gase verhalten. Es bleibt nun festzustellen, ob die Spannung der Dämpfe in gleicher Weise von Temperatur und Druck abhängt, wie es bei Gasen nach dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz der Fall ist (vgl. § 85).

Zu diesem Zwecke läßt man die Dampfbildung im luftleeren Raume vor sich gehen, wozu sich am besten die Torricellische Leere eignet; in der beweglichen Quecksilbersäule hat man ein Mittel, die Spannkraft der eingeschlossenen Dämpfe zu messen.

Fig. 433.



Versuch. Läßt man in den luftleeren Raum einer Torricellischen Röhre einige Tropfen Äther hinaufsteigen, so wird das Qu. durch die entstehenden Ätherdämpfe bis zu einer bestimmten Tiefe hinabgedrückt (A, Fig. 438). Je nachdem nun aller Äther sich in Dampf verwandelt, oder ein Teil desselben als Flüssigkeit zurückbleibt, ergeben sich ganz verschiedene Erscheinungen.

1. Ist der Äther vollständig verdampft, so ändert sich die Spannung des Dampfes mit der Vergrößerung und Verkleinerung des Raumes im allgemeinen wie bei den Gasen. Zieht man die Röhre aus dem mit Qu. gefüllten Gefäße heraus, so steigt die Qu.-Säule A, es findet also eine Abnahme der Dampfspannung statt; taucht man die Röhre tiefer ein, so sinkt die Qu.-Säule, woraus man auf Zunahme der Dampfspannung schließen muß. Erwärmung der Röhre bewirkt ebenfalls eine Zunahme, Abkühlung eine Abnahme der Dampfspannung.

2. Ist ein Teil des Äthers als Flüssigkeit auf dem Qu zurückgeblieben, so behalten die beiden Qu.-Oberflächen beim Herausziehen der Röhre denselben Abstand von einander; auch beim tieferen Eintauchen der Röhre tritt eine Änderung des Qu.-Standes nicht ein (B, Fig. 438). Die Dampfspannung bleibt somit dieselbe. Erwärmung des Dampfes dagegen hat ein Sinken des Quecksilbers, also eine Zunahme der Dampfspannung. Abkühlung ein Steigen desselben, mithin eine Abnahme der Dampfspannung zur Folge. Zugleich zeigt sich, daß bei der Vergrößerung des Dampfraumes und bei der Erwärmung noch etwas Flüssigkeit verdampft, bei der Verkleinerung und bei der Abkühlung dagegen ein Teil des Dampfes sich wieder zu Flüssigkeit verdichtet. Hieraus ergibt sich zunächst, daß ein abgeschlossener Raum bei einer bestimmten Temperatur nur eine bestimmte Menge von Dampf aufnehmen kann.

Ein Raum, der die seiner Temperatur entsprechende Dampfmenge aufgenommen hat, ist mit Dampf gesättigt; der Dampf heißt in diesem Falle gesättigter Dampf.

Wird gesättigter Dampf auf einen kleineren Raum zusammengedrückt, so muß sich (nach der vorhergehenden Erklärung) ein Teil desselben zu Flüssigkeit verdichten. Dadurch unterscheiden sich die gesättigten Dämpfe von den Gasen, welche bei Verkleinerung des Volumens eine erhöhte Spannkraft erhalten. Man kann demnach auch sagen, daß gesättigte Dämpfe solche sind, welche für die betreffende Temperatur das Maximum ihrer Spannkraft und Dichtigkeit besitzen.

Das Anwachsen der Spannkraft gesättigten Wasserdampfes mit der Temperaturzunahme ist aus Tabelle I (folg. Seite) ersichtlich.

Wie sich durch Druck die Spannkraft gesättigter Dämpfe nicht vergrößern läßt, so läßt sie sich auch durch Ausdehnung nicht verkleinern, da in diesem Falle noch ein Teil der Flüssigkeit verdampft, bis der Raum wieder mit Dampf gesättigt ist. Enthält jedoch der Dampf-raum keine Flüssigkeit mehr, so muß jede Vergrößerung desselben den Zustand der Sättigung aufheben, weil die zu derselben notwendige Dampfmenge jetzt nicht mehr vorhanden ist. Der Dampf heißt dann ungesättigt. Gesättigter Dampf läßt sich auch dadurch in den ungesättigten Zustand überführen, daß man ihn getrennt von seiner Flüssigkeit erwärmt; weil die Temperatur des erwärmten Dampfes höher ist als die des gesättigten Dampfes von gleicher Spannkraft, so wird ersterer auch als überhitzter Dampf bezeichnet.

Ungesättigter (überhitzter) Dampf läßt sich dementsprechend sowohl durch Verkleinerung des Raumes, den er einnimmt, wie auch durch Abkühlung in gesättigten Dampf verwandeln.

Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten zeigen im wesentlichen dieselben Erscheinungen; die Größe ihrer Spannkraft bei derselben Temperatur ist von der Höhe des Siedepunktes ihrer Flüssigkeit abhängig (vergl. II. Tabelle). In einem mit Luft oder einem anderen Gase erfüllten Raume geht die Verdampfung langsamer von statten; die Dämpfe zeigen aber dieselben Eigenschaften wie im luftleeren Raume. Es gelten demnach die Gesetze:

Überhitzte Dämpfe verhalten sich hinsichtlich ihrer Spannung wie Gase, sie folgen also (im allgemeinen) dem Mariotteschen Gesetz (§ 85).

Die Spannung gesättigten Dampfes hängt nur von seiner Temperatur ab. Bei derselben Temperatur haben Dämpfe von verschiedenen Flüssigkeiten eine um so größere Spannung, je niedriger der Siedepunkt ihrer Flüssigkeit ist.

I. Temperatur, Spannung und Rauminhalt gesättigter Wasserdämpfe.

(Der Rauminhalt bezieht sich auf den Dampf von 1 Liter Wasser.)

Temperatur	Spannung	Rauminhalt	Temperatur	Spannung	Rauminhalt
Grade nach C	Atmosphären	Kubik-decimtr.	Grade nach C	Atmosphären	Kubik-decimtr.
50	$\frac{1}{8}$	11800	144	4	477
65	$\frac{1}{4}$	6198	152	5	388
82	$\frac{1}{2}$	3229	159	6	326
100	1	1700	165	7	282
121	2	900	171	8	248
134	3	620	180	10	200

II. Spannungstabelle für Wasser, Alkohol und Äther.

Temp. °C	Spannung in mm Quecksilber.		
	Wasser	Alkohol	Äther
- 10	2,1	6,5	113,2
0	4,6	12,7	182,3
+ 10	9,2	24,1	286,5
20	17,4	44,0	434,8
50	92,0	220,3	1268,0
100	760,0	1685,0	4920,4

Dämpfe und Gase. Die Gase, welche man früher den Dämpfen gegenüberstellte, sind als überhitzte und von ihrem Sättigungspunkt sehr weit entfernte Dämpfe anzusehen, denn sie können durch Abkühlung und Zusammenpressen in gesättigte Dämpfe und schließlich in Flüssigkeiten übergeführt werden (§ 52). Bei einigen Gasen gelingt die Kondensation schon bei einer Temperatur von 0° und einem Druck von einigen Atmosphären (schweflige Säure bei 3, Chlor bei 4 Atm.); bei anderen ist bedeutende Abkühlung und starker Druck erforderlich. Durch letz-

teren allein ist die Verflüssigung nicht zu erreichen (die permanenten Gase werden bei 3000 Atm. Druck noch nicht flüssig), da es für jeden Dampf eine sogen. „kritische Temperatur“ giebt, oberhalb welcher er bei noch so großem Druck dampfförmig bleibt. Die Kondensation des Dampfes ist mithin nur dann möglich, wenn seine Temperatur unter der kritischen liegt; erst nachdem man die permanenten Gase unter ihre kritische Temperatur abkühlte (Sauerstoff z. B. bis unter -118°), gelang auch die Verflüssigung derselben. Man kann demnach jeden luftförmigen Körper bei einer Temperatur unterhalb der kritischen als Dampf und oberhalb derselben als Gas bezeichnen.

Übungsstoff. 1. Welchen Einfluss übt eine Temp.-Veränderung a. auf Gase, b. auf gesättigte Dämpfe aus, wenn der Raum derselbe bleibt, und welchen Einfluss übt eine Verkleinerung des Raumes aus, wenn die Temp. dieselbe bleibt? — 2. Sind die Dämpfe in einem Dampfkessel gesättigt oder ungesättigt? — 3. Wie werden sich die von einem luftgefüllten und einem ebenso großen luftverdünnten Raume a. in sehr kurzer Zeit, b. in längerer Zeit aufgenommenen Dampfmenngen zu einander verhalten? — 4. Inwiefern ist es für die Verwendung des Qu. in Barometern sehr günstig, daß Qu.-Dämpfe bei gewöhnlicher Temp. eine äußerst geringe Spannung haben? (Bisweilen sieht man in der Torricellischen Leere Qu.-Tropfen am Glase hängen; Einfluss auf den Barometerstand?) — 5. Der kurze Schenkel der Manometerröhre, Fig. 289, sei etwas erweitert und in seinem oberen Teile ganz mit W. gefüllt. Wie ließe sich dann die Spannung der Dämpfe für Temperaturen über 100° bestimmen? (Dampfbarometer.) — 6. Wievielmals so leicht ist gesättigter Wasserdampf von 100° als atm. Luft von 0° bei einem Drucke von 760 mm? (§ 88.) — 7. 1 cbm Luft von 0° werde bei unverändertem äußeren Drucke (760 mm) auf 100° und auf 121° erwärmt. Welchen Raum nimmt die Luft bei diesen Temperaturen ein, und wie verhalten sich die Spannungen zu der Spannung gesättigter Wasserdämpfe von 100° und 121° ? — 8. Vergl. die Spannungen gesättigter Wasserdämpfe und Luft von 180° . Was folgt hieraus für die Verwendbarkeit von Luft und Wasserdämpfen zu Kraftmaschinen? — 9. Wv. W. muß verdampft werden, damit 1 cbm gesättigter Wasserdampf von 2, 6 und 10 Atm. Spannung entsteht?

§ 123. Die Dampfmaschine.

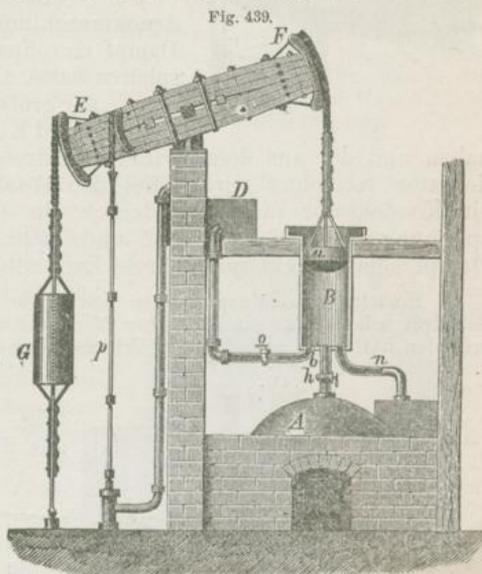
I. Geschichtliche Entwicklung. Die ersten Versuche, die Spannkraft des Wasserdampfes als bewegende Kraft zu verwenden, wurden schon im Altertum gemacht: *Heron von Alexandrien* (wahrscheinlich im 2. Jahrh. v. Chr.) erfand einen Apparat, bei dem durch den Rückstoß ausströmenden Dampfes eine Hohlkugel von Metall in Umdrehung versetzt wurde (vergl. das Segnersche Wasserrad, Fig. 53). Es vergingen jedoch noch mehr als 1½ Tausend Jahre, ehe sich die Erkenntnis Bahn brach, daß man die im erhitzten Wasserdampf verborgene Kraft zum Ersatz menschlicher und tierischer Arbeitskraft verwenden könne und ehe man Vorrichtungen zur zweckmäßigen Ausnutzung der Dampfkraft konstruieren lernte. Von den verschiedenen Erfindungen, welche zu diesem Zwecke gemacht wurden, hat nur diejenige eine hervorragende Bedeutung erlangt, bei welcher durch die abwechselnde Wirkung von Wasserdampf und atmosphärischer Luft und später durch Wasserdämpfe allein eine *Kolbenbewegung* zustande gebracht wurde.

Gegen Ende des 17. Jahrhunderts (1690) gelang es *Papin* in Marburg, in einem oben offenen Cylinder einen Kolben dadurch auf- und abzubewegen, daß er abwechselnd Wasser unter dem Kolben erhitzte und den Cylinder darauf von außen wieder abkühlte (vergl. Fig. 111). Der Kolben wurde darauf zunächst durch die Dämpfe gehoben und dann durch die atm. Luft wieder niedergedrückt.

Von der praktischen Ausführung seiner Maschine wurde Papin durch ungünstige äußere Verhältnisse abgehalten.

Die ersten Versuche, die Dampfmaschine in das praktische Leben einzuführen, waren schon einige Zeit vorher in England gemacht worden; aber erst durch *New-*

comen (spr. Njukö'men) erhielt dieselbe die für einen derartigen Zweck geeignete Form (1705). Die Maschine von Newcomen war eine sogen. atmosphärische Maschine, durch welche das Papinsche Verfahren im großen angewandt wurde. Die Erzeugung der Dämpfe geschah in einem besonderen Kessel (A, Fig. 439), die Abkühlung derselben im Cylinder B durch Einspritzen von kaltem Wasser, nachdem der Kolben durch die Dämpfe und ein Gegengewicht (G) gehoben war. Das rechtzeitige Einstromen des Dampfes und des Kühlwassers wurde durch das abwechselnde Öffnen und Schließen zweier Hähne (h und o) vermittelt. Eine Wippe (EF) diente dazu, die Kolbenbewegung auf die Last zu übertragen, und setzte gleichzeitig eine Pumpe in Bewegung, durch welche das zum Abkühlen erforderliche Wasser in einen hoch gestellten Behälter (D) gehoben wurde, von wo es durch eine Röhre in den Cylinder gelangte. Durch die Röhre n wurde das Wasser aus dem Cylinder entfernt. Auf dem Kolben befand sich eine Schicht Wasser, um gegen die Cylinderwandung einen dampfdichten Verschluss herzustellen. — Die Newcomenschen Maschinen wurden namentlich in England zur Hebung des Wassers in den dortigen Steinkohlengruben angewandt. Eine wesentliche Verbesserung derselben war die Selbststeuerung, welche darin bestand, daß das Öffnen und Schließen der Hähne von der Maschine selbst besorgt wurde. (Die Selbststeuerung wurde von Potter 1713 erfunden.)



Durch die Umgestaltung, welche die atmosphärische Maschine späterhin durch Watt erfuhr, ist aus derselben die Dampfmaschine der Gegenwart entstanden. Die wichtigsten der von Watt in den Jahren 1765—1785 erfundenen Verbesserungen sind folgende:

1. Um den mit der Abkühlung des Cylinders verbundenen Wärmeverlust zu vermeiden, leitete Watt die Dämpfe zur Abkühlung in einen mit kaltem Wasser gefüllten Behälter, Kondensator, in welchem das erwärmte Wasser fortwährend durch kaltes Wasser ersetzt wurde (1765).

2. Watt stellte Cylinder her, die an beiden Enden geschlossen waren, in denen also nur der Dampfdruck auf den Kolben einwirken konnte. Dadurch wurde der Luftdruck ausgeschlossen und die atmosphärische Maschine somit in eine einfach wirkende Dampfmaschine verwandelt (1769).

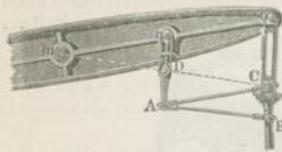
3. Um die Nutzleistung der Maschine zu erhöhen, liefs Watt die Dämpfe auf beide Seiten des Kolbens abwechselnd mit gleicher Kraft einwirken und erfand so die doppelwirkende Maschine (1782).

4. Ferner verwandelte er die geradlinige Bewegung des Kolbens dadurch in eine drehende, daß er das vom Cylinder abgewandte Ende der Wippe durch eine Kurbel zur Umdrehung einer mit Schwungrad versehenen Welle benutzte, mit welcher die in Thätigkeit zu setzenden Arbeitsmaschinen in geeigneter Weise verbunden wurden. So entstand eine Maschine, welche eine vielseitigere Verwendung gestattete.

5. Um auch eine bessere Geradföhrung der mit der Wippe verbundenen Kolbenstange zu bewirken, schaltete Watt zwischen beiden eine sinnreiche Stangenverbindung ein von der Form eines Parallelogrammes, dessen Ecken Gelenke bildeten (Fig. 440, folg. Seite): *Wattsches Parallelogramm* (1784).

Durch diese wichtigen Erfindungen, zu denen noch der Centrifugalregulator und später (etwa 1790) die Schiebersteuerung hinzukam, gab Watt der Dampfmaschine eine Gestalt, die sie im wesentlichen jetzt noch hat.

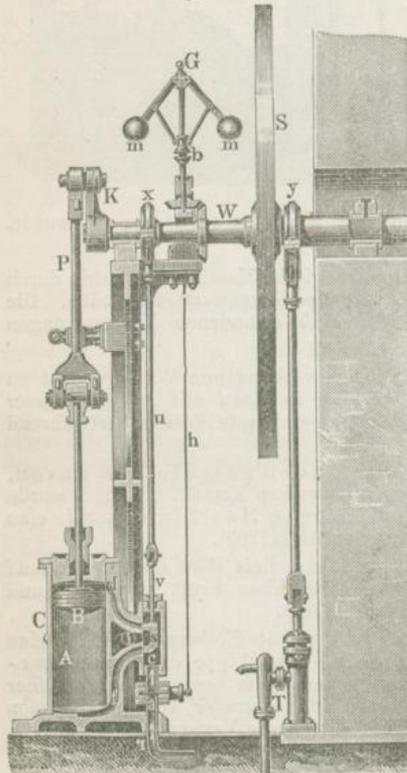
Fig. 440.



Die Watt'schen Maschinen waren **Niederdruckmaschinen**, d. h. solche, bei denen der Dampf eine Spannung von höchstens $1\frac{1}{2}$ Atmosphären hatte. Niederdruckmaschinen sind nur dann einer größeren Arbeitsleistung fähig, wenn Cylinder und Kolben einen großen Durchmesser haben und der aus dem Cylinder austretende Dampf durch einen Kondensator verdichtet wird. Bei den **Hochdruckmaschinen** dagegen ist ein Kondensator nicht erforderlich, da sie mit einer höheren Dampfspannung (neuerdings bis 12 und mehr Atmosph.) arbeiten und der Dampf somit direkt in die freie Luft entweichen kann.

Hochdruckmaschinen werden seit Ende des vorigen Jahrhunderts gebaut, nachdem schon 1725 ein deutscher Mechaniker *Leupold* eine Hochdruckmaschine erfunden hatte, die aber keine praktische Verwendung fand.

Fig. 441.



2. Eine **Hochdruckmaschine** (Fig. 441) besteht im wesentlichen aus folgenden Teilen:

- 1) aus dem *Dampfkessel*;
- 2) aus dem *Cylinder* (C) mit *Kolben* (B);
- 3) aus der *Kurbel* (K), welche durch die *Pleuelstange* (P) mit der *Kolbenstange* gelenkartig verbunden ist;
- 4) aus der *Steuerung*, welche das abwechselnde Ein- und Austreten des Dampfes zur Bewegung des Kolbens vermittelt. Hauptteile derselben: der *Schieber* (s) und die auf der *Kurbelwelle* befestigte *excentrische Scheibe* (x);
- 5) aus dem auf der *Kurbelwelle* befestigten *Schwungrade* (S), das den Zweck hat, einen gleichförmigen Gang der Maschine zu bewirken;
- 6) aus dem *Regulator* (G), welcher das Schwungrad in seiner Wirkung dadurch unterstützt, daß er bei seiner Abnahme der Bewegung etwas mehr, bei einer Zunahme der Bewegung dagegen weniger Dampf in den Cylinder eintreten läßt.

Der *Dampfkessel* besteht aus zusammengeneteten Platten von Schmiedeeisen. Die Heizfläche wird möglichst groß hergestellt, damit die *Dampfbildung*

schnell erfolgt; bei Lokomotiven z. B. läßt man die Feuerluft durch sogen. *Rauchrohre* (eiserne Röhren) streichen, welche den Wasserraum des Kessels seiner ganzen Länge nach durchziehen.

Zur Speisung des Kessels dient gewöhnlich eine *Druckpumpe*, welche durch die Maschine selbst in Bewegung gesetzt wird (T, Fig. 441). Der *Wasserstandsanzeiger* des Kessels ist entweder ein einfaches Wasserstandsglas (§ 15), oder ein Schwimmer, welcher durch eine luftdicht in den Kessel hinabreichende Stange auf einen über demselben befestigten Hebel einwirkt. — Zum Messen des Dampfdruckes dienen *Manometer* (Seite 207). Um einem übermäßigen Dampfdrucke vorzubeugen, ist jeder Dampfkessel mit einem *Sicherheitsventile* versehen (Kesselprobe: Seite 191).

Der *Cylinder* und die *Steuerung* (Fig. 442 und 443). Der im Kessel erzeugte Dampf wird durch ein Rohr zunächst in den *Schieberkasten* geleitet, dessen Innenraum (c) die *Dampfammer* heißt. Der vom Schieberkasten überdeckte Teil der Cylinderwand enthält zwei Kanäle (d und f), durch welche je nach der Stellung des *Schiebers* der Dampf abwechselnd in den Cylinder einströmen und aus demselben wieder ausströmen kann. Hat der Schieber die in Fig. 442 angegebene Stellung, so kann durch den unteren Kanal frischer Dampf in den Cylinder eintreten, durch den oberen Kanal (d) dagegen der gebrauchte Dampf aus dem Cylinder wieder austreten und durch ein in den Hohlraum des Schiebers mündendes Rohr (i) nach außen gelangen. (Erkläre Fig. 443).

Die *Schiebersteuerung* ist die gebräuchlichste. Bei den meisten Maschinen läßt man den Schieber bei seiner Bewegung dem Kolben etwas voraneilen, sodafs beide Dampfkanäle schon ein wenig geöffnet sind, wenn der Kolben seine Hin- oder Rückbewegung beginnt. Der Dampf kann dann beim Steigen des Kolbens sofort seine volle Wirkung auf denselben ausüben und zugleich wird das Anschlagen des Kolbens an den Cylinder verhütet, da der schon eingeströmte Gegendampf wie ein elastisches Kissen wirkt. Wird der Dampfzufufs schon abgesperrt, wenn der Kolben erst einen Teil seines Weges zurückgelegt hat, so kommt noch die Expansionsfähigkeit des abgesperrten Dampfes zur Wirkung; Maschinen mit dieser Einrichtung heißen deshalb *Expansionsmaschinen*. Eine neuerdings angewendete Verbesserung derselben besteht darin, dafs man den Dampf aus dem Hochdruckcylinder nicht ins Freie entweichen, sondern in einem gröfseren Niederdruckcylinder nochmals durch *Expansion* wirken läßt (Compound- oder Verbundsystem).

Die *Kurbel* und die *excentrische Scheibe*. Beide sind an der Schwungradwelle befestigt. Die Kurbel dient dazu, die geradlinige Bewegung des Kolbens in eine drehende zu verwandeln; die excentrische Scheibe dagegen (Fig. 444) macht mittelst des sie umschließenden Ringes (x und x_1) aus der drehenden eine hin- und hergehende Bewegung und überträgt diese durch die Stange (u) auf den Schieber (s).

Fig. 442.

Fig. 443.

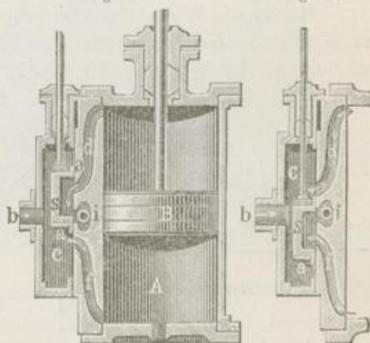
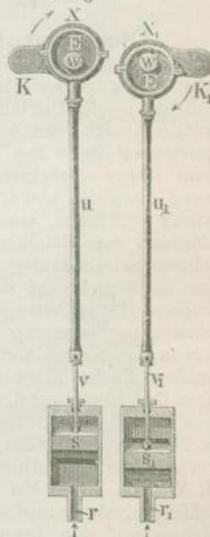


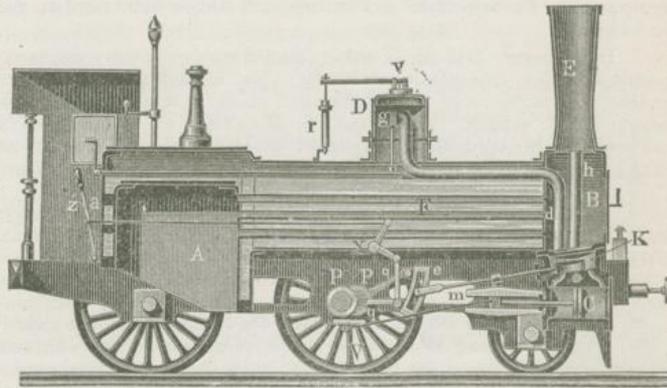
Fig. 444.



den Kesseldampf, ehe er in den Cylinder eintritt, hindurchströmen; w.? — 12. Damit der Schieber dem Excenter voraneilen kann, muß letzterer mit der Kurbel einen Winkel bilden, welcher etwas größer ist als 90° . Erkl.!

§ 124. Die Dampfmaschine. (Fortsetzung.) Eine besonders wichtige Hochdruckmaschine ist die Lokomotive (Fig. 446). Die-

Fig. 446.



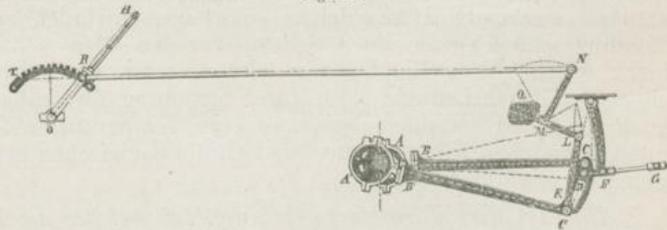
selbe hat 2 Cylindern mit je einem Schieberkasten und 2 oder mehr große Triebäder, auf deren Welle sich die Arbeit des Dampfes zunächst überträgt. Auf dem Dampfessel ist, um zu verhüten, daß durch die Erschütterung

während der Fahrt Wasser in das Dampfrohr eindringe, ein *Dampfdom* (D) angebracht, d. h. ein erhöhter Dampfraum, in welchen das Dampfrohr einmündet. Die hoch über dem Wasserspiegel gelegene Mündung (g) des Dampfrohres kann durch den Maschinisten von außen verschlossen werden. Ein Sicherheitsventil (v) dient dazu, bei zu hoher Dampfspannung dem Dampfe einen Ausweg zu verschaffen. Ein eigentliches Schwungrad fehlt den Lokomotiven. Dasselbe wird durch die *Triebäder* ersetzt, und außerdem trägt das Beharrungsvermögen der ganzen sich fortbewegenden Masse wesentlich dazu bei, die Bewegung gleichförmig zu machen. In der Überwindung der beiden toten Punkte unterstützen sich die beiden rechtwinklig zu einander gerichteten Triebadkurbeln gegenseitig

Zur Umsteuerung der Maschine befinden sich auf der Achse der beiden

Fig. 447.

großen Triebäder zwei *excentrische Scheiben* (A und A₁, Fig. 447) in entgegengesetzten Stellungen, deren Stangen an ihren äußeren Enden mit einem Steuer-



rahmen (sogen. *Coulisse*) gelenkartig verbunden sind (CC₁). In letzterem gleitet ein an der Lenkstange befestigter *Zapfen*, sodafs die eine oder andere der beiden excentrischen Scheiben je nach Erfordernis auf die Steuerung einwirken kann. Dies

wird vom Maschinisten durch ein *Gestänge* bewerkstelligt, dessen eines Ende mit dem Steuerrahmen so verbunden ist, daß derselbe sich mit den beiden Stangen der excentrischen Scheiben heben und senken läßt. Diese Art der Umsteuerung wird als *Coulissensteuerung* bezeichnet.

Die Lokomotive wurde 1826 von *Stephenson* in England erfunden. Das erste Dampfschiff baute *Fulton* in Amerika (1807).

Kleine Hochdruckmaschinen, welche zum Betriebe von Dreschmaschinen, Centrifugalpumpen, Feuerspritzen u. s. w. vielfach angewandt werden, nennt man *Lokomobilen*.

In neuerer Zeit sind auch Maschinen erfunden worden, bei denen die Spannkraft des Dampfes durch die der erhitzten Luft oder eines explodierenden Gemenges von Leuchtgas und Luft ersetzt wird. Die Maschinen der ersteren Art (sogen. *kalorische Maschinen* oder *Heißluftmotoren*) sind weniger in Aufnahme gekommen als die letzteren, welche unter dem Namen *Gaskraftmaschinen* oder *Gasmotoren* im Kleinergewerbe vielfach benutzt werden.

Übungsstoff. 1. Warum sind bei Lokomotiven Sicherheitsventile mit Federbelastung denen mit Gewichtsbelastung (siehe Fig. 432) vorzuziehen? — 2. Wie läßt sich durch den Steuerhebel HO, Fig. 447, die Umsteuerung bewirken? Erkl.! — 3. Bei einer Hochdruckmaschine ohne Kondensation habe der Dampf während der ganzen Kolbenbewegung eine Spannung von 6 Atm., der Durchmesser des Kolbens sei 30 cm. Wie groß ist der Überdruck des Dampfes auf die ganze Kolbenfläche? — 4. Wv. Arbeit vermag eine solche Maschine zu leisten a. während einer einfachen Kolbenbewegung, wenn der Kolbenhub 70 cm beträgt, b. während 1 Sek., wenn der Kolben sich in 1 Minute 40 mal hin- und herbewegt? (in Pferdekraften?) — 5. Wv. Nutzarbeit verrichtet die Maschine, wenn 0,6 der berechneten Arbeit nutzbar gemacht werden kann? — 6. Weshalb kann man behaupten, daß die Verwandlung von Wärme in Arbeit durch die Dampfmaschine nur in sehr unvollkommener Weise stattfindet (bei den besten Dampfmaschinen wird etwa $\frac{1}{3}$ der an den Kessel abgegebenen Wärme in Arbeit umgesetzt) und welche Dampfmaschine würde die vollkommenste sein? (Vergl. auch § 146.)

B. Fortpflanzung der Wärme.

(Siehe §§ 34 und 35.)

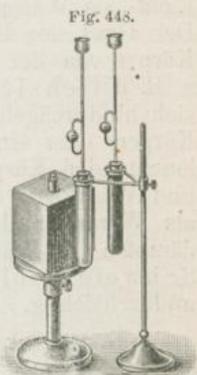
§ 125. Wärmestrahlung. Gewisse Erscheinungen lassen darauf schließen, daß es außer der Wärmeleitung und der Verbreitung der Wärme durch Strömung noch eine andere Art der Wärme-*fortpflanzung* geben muß. Wenn man z. B. in die Glut eines Ofens sieht, so empfindet man, selbst wenn der Luftzug stark nach innen gerichtet ist, eine stechende Hitze, welche sofort verschwindet, sobald man die Ofenthür schließt oder einen Schirm vor den Ofen stellt. Die Wärme, durch welche diese Empfindung hervorgerufen wird, kann vom Feuer aus weder durch Leitung, noch durch Strömung fortgepflanzt werden. — Auch die Sonnenstrahlen bewirken eine Temperaturerhöhung der von ihnen getroffenen Körper, ohne daß sich die dazwischen befindlichen Luftschichten erwärmen.

*Die Art der Wärme-*fortpflanzung*, bei welcher die Temperatur der zwischen der Wärmequelle und dem erwärmten Körper befindlichen Körper nicht steigt, heißt Wärmestrahlung.*

Der Körper, auf welchen Wärme durch Strahlung übergeht, absorbiert oder verschluckt die strahlende Wärme.

Die tägliche Erfahrung lehrt, daß die strahlende Ofenwärme durch Blechschirme, die Zimmerwärme durch die Fensterscheiben zurückgehalten werden kann, während sie durch die Luft hindurchgeht, ferner daß die geschwärzten Eisenplatten geheizter Öfen viel mehr Wärme ausstrahlen als glänzende Kacheln, daß wir in dunklen Kleidern die strahlende Wärme der Sonne mehr empfinden als in hellen Kleidern u. s. w.

* **Versuch.** Eine dunkle Wärmequelle, etwa die berufste Seite eines mit kochendem Wasser gefüllten, verschlossenen Blechgefäßes wird 2 Thermoskopen (Fig. 448) gegenüber gestellt; es ist keine merkliche Temp.-Erhöhung wahrzunehmen, wenn man eine durchsichtige Glasscheibe einschaltet. — Entfernt man aber die Scheibe, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre des geschwärzten Thermoskopes bedeutend schneller als in dem anderen. Das Steigen der Flüssigkeit in beiden Thermoskopen hört fast ganz auf, wenn man ihnen die blanke Seite des Gefäßes zuwendet.



Der Versuch zeigt, daß Glas Wärmestrahlen nicht hindurchgehen läßt, und daß sowohl die Wärmestrahlung, als auch die Absorption strahlender Wärme von der Oberflächenbeschaffenheit der Körper abhängt. (Inwiefern?) — Untersuchungen, welche sich mittelst großer Hohlspiegel und geeigneter Linsen unter Benutzung äußerst empfindlicher Thermoskope (Thermomultiplikator, § 144) ausführen lassen, ergeben:

Wärmestrahlen verbreiten sich nach denselben Gesetzen wie Lichtstrahlen*); dieselben sind aber zum Teil nicht leuchtend und an sich nicht warm.

Ein warmer Körper sendet wie ein leuchtender Körper nach allen Seiten geradlinig Strahlen aus, welche ebenso wie Lichtstrahlen zurückgeworfen, gebrochen oder absorbiert werden können.

Das Vermögen der Körper, Wärme auszustrahlen, hängt bei gleicher Temperatur namentlich von der Beschaffenheit der Oberfläche ab. — Glatte metallische Flächen strahlen am wenigsten Wärme aus, mit Ruß bedeckte Flächen am meisten, dunkle und rauhe im allgemeinen mehr als helle und glatte.

Das Vermögen der Körper, strahlende Wärme zu absorbieren, ist um so größer, je größer ihr Austrahlungsvermögen ist.

Das Strahlungs- und Absorptionsvermögen von Ruß ist ungefähr 10 mal so groß als das von polierten Metallen. Werden kalte Metallflächen mit Lack, Firnis oder dergl. überstrichen, so nimmt ihr Vermögen, Wärme auszustrahlen und zu absorbieren, stark zu. — Daß Wasser bei starker Strahlung weit langsamer erkaltet als der feste Boden, hat seinen Grund wesentlich in der hohen spezifischen

*) Vergl. § 146.

Wärme des Wassers. Zur Erwärmung wie zur Abkühlung des Wassers ist daher unter sonst gleichen Bedingungen mehr Zeit erforderlich.

Genauere Untersuchungen über die Durchlässigkeit der Körper für Wärmestrahlen haben zu dem Ergebnis geführt, daß manche durchsichtige Körper für dunkle Wärmestrahlen mehr oder weniger undurchlässig sind und umgekehrt manche undurchsichtige Körper Wärmestrahlen durchlassen. Es giebt aber auch Körper, welche sowohl Licht- als Wärmestrahlen durchlassen oder für beide undurchlässig sind. Der Grad der Durchlässigkeit kann ferner bei einem und demselben Körper von der Beschaffenheit der Wärmequelle abhängig sein. So läßt z. B. durchsichtiges Glas die Sonnenwärme ziemlich leicht durch sich hindurchgehen, viel weniger gut aber die Wärme eines glühenden Körpers oder einer Flamme und noch weniger die Wärme eines nicht leuchtenden Körpers. Ähnlich verhält sich z. B. Gips, Alaun, Eis und Wasser. Steinsalz und trockene Luft lassen sowohl Licht- als Wärmestrahlen durch. Luft wird durch Aufnahme von Wasserdämpfen für Wärmestrahlen undurchlässiger. Eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff läßt die Wärmestrahlen hindurch, ist aber undurchsichtig. Metalle lassen weder Licht noch Wärmestrahlen durch.

Körper, welche die Wärmestrahlen hindurchlassen, nennt man diatherman oder durchwärmig; diejenigen, welche die Wärmestrahlen absorbieren, werden atherman oder undurchwärmig genannt.

Eine eigenthümliche mechanische Wirkung der Wärmestrahlen zeigt die sogen. Lichtmühle (Radiometer), ein kleiner luftleerer Glasballon, in welchem 4 auf Kreuzarmen befestigte Aluminiumblättchen, die auf einer Seite mit Ruß geschwärzt sind, bei genügender Bestrahlung sich um eine senkrechte Achse drehen. Die Drehung erfolgt umgekehrt, wenn die Blättchen Wärme ausstrahlen.

Aus der Wärmestrahlung erklärt sich die starke nächtliche Abkühlung, welche der Bildung des *Taus* und *Reifes* vorhergeht (§ 36). Die Erde strahlt Tag und Nacht Wärme gegen den Himmelsraum aus. Da sie nun durch die Sonnenstrahlen nur am Tage Wärme empfängt, so muß während der Nacht eine Abkühlung ihrer Oberfläche stattfinden. Kurz vor Sonnenaufgang muß daher die Temperatur am niedrigsten sein. Je klarer und trockener die Luft ist, desto besser läßt sie die Wärmestrahlen durch sich hindurch. Dies hat zur Folge, daß der feste Boden sich oft um mehrere Grad unter die Lufttemperatur abkühlt. Stehen Wolken am Himmel, so bilden diese einen schützenden Schirm. (Anwendung von Rauchfeuern in Weinbergen.)

Auf dem verschiedenen Verhalten des Glases gegen Licht- und Wärmestrahlen beruhen vielfache Anwendungen im praktischen Leben. Während das Licht ungehindert durch die Fenster in unsere Zimmer eindringt, wird die Ofenwärme durch das Glas zurückgehalten. In ähnlicher Weise erklärt sich die Wirkung der Gewächshäuser und Mistbeete, die Anwendbarkeit gläserner Schirme bei Kaminheizung, der Schutz des Glases gegen die Glut geschmolzener Massen, z. B. in Glashütten, in denen die Mauer des Schmelzofens Glasscheiben enthält, durch welche die Arbeiter in die Glut hineinsehen können, ohne sie nachtheilig zu empfinden u. s. w.

Übungsstoff. 1. Warum schwärzt man metallene Heizröhren an der dem Zimmer zugewandten Seite? — 2. Polierte oder vernickelte eiserne Öfen verhalten sich ähnlich wie Kachelöfen; inwiefern? — 3. An welchen Stellen der Kochgefäße ist das Vorhandensein von Ruß vorteilhaft, und an welchen nachtheilig? — 4. Vorteil, metallene Thee- und Kaffeekessel, Cylinder der Dampfmaschinen u. s. w. blank zu erhalten? — 5. An Wänden reifen Trauben, Pfirsiche u. dgl. eher als im Freien; w.? — 6. Äcker und besonders Wiesen kühlen sich in kalten Nächten viel

stärker ab als Wege. Erkl.! — 7. Wenn man die Kugel eines Therm. mit Ruß schwärzt, so steigt und fällt das Qu. rascher als sonst. Erkl.! — 8. Blankes Stanniol ist im Brennpunkte einer Linse schwer zu schmelzen. Durch welche Veränderung der Oberfläche wird es leichter schmelzbar? — 9. Vergl. Fensterglas, W. und Luft hinsichtlich ihres Verhaltens gegen Licht- und dunkle Wärmestrahlen miteinander. — 10. Eis an den Fenstern unserer Wohnzimmer taut in direktem Sonnenlichte oft schon auf, wenn die Temp. der Umgebung noch unter Null ist. Erkl.! — 11. Wie erklärt es sich, daß Eis und Schnee leichter taut, wenn es mit Asche bestreut wird, ferner: daß dunkle Blätter im Sonnenscheine in das Eis einschmelzen? — 12. Auf hohen Bergen empfindet man im Sonnenscheine eine stechende Wärme, während die Luft eisig kalt ist. Grund! — 13. Durch eine Linse von klarem Eise lassen sich brennbare K. im direkten Sonnenlichte entzünden. (Versuch von *Mariotte*.) Erkl.! — 14. Durch 2 große Hohlspiegel soll bewirkt werden, daß Schießpulver durch die Wärme einer glühenden Kugel in Abständen von einigen m entzündet wird. Wie ist dies auszuführen?

C. Quellen der Wärme.

§ 126. Die wichtigste Wärmequelle im täglichen Leben ist die *Verbrennung*. Wenn ein Körper in der atm. Luft verbrennt, so vereinigen sich die Grundstoffe desselben mit dem Sauerstoffe der Luft. Eine solche Vereinigung (Oxydation) ist stets von Wärmeentwicklung begleitet. Letztere ist um so bedeutender, je mehr Sauerstoff dabei verbraucht wird. Da dies ein chemischer Vorgang ist, so pflegt man die Verbrennung als eine **chemische Wärmequelle** zu bezeichnen. Damit der Verbrennungsvorgang eintreten kann, müssen die Körper gewöhnlich erst bis zu einer bestimmten Temperatur (*Verbrennungstemperatur*) erhitzt werden.

Außer den kohlenstoffhaltigen Körpern, welche für die Erzeugung größerer Wärmemengen allein von Bedeutung sind, vermögen auch andere Stoffe, z. B. Phosphor, Schwefel, die Metalle, durch ihre Vereinigung mit Sauerstoff Wärme zu erzeugen, wie überhaupt bei jeder Vereinigung von Grundstoffen zu chemischen Verbindungen Wärme erzeugt wird. Die Verbrennung in der Luft erfolgt um so rascher, je mehr Sauerstoff dem verbrennenden Körper zugeführt wird (Anwendung von Gebläsen, Schornsteinen, Lampencylindern u. dgl.). Ist der verbrennende Körper gasförmig oder geht er beim Verbrennen in den gasförmigen Zustand über, so entsteht zugleich eine Flamme, welche an denjenigen Stellen die meiste Wärme entwickelt, an denen sie mit Luft in Berührung steht.

Um Brennmaterialien nach ihrem Heizwerte miteinander vergleichen zu können, hat man durch genaue Versuche ermittelt, wieviel Wasser durch die von 1 kg jener Körper bei vollständiger Verbrennung erzeugte Wärme in Dampf verwandelt werden kann. Derartige Versuche lehren:

Jeder Körper entwickelt beim **Verbrennen** eine seinem Gewichte entsprechende bestimmte Wärmemenge. — Gleiche Gewichtsmengen verschiedener Körper liefern ungleiche Wärmemengen.

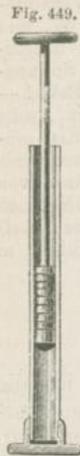
Zahl der Wärmeeinheiten,

welche durch das Verbrennen von 1 kg folgender Körper entstehen (ungef.):

Holz, lufttrocken	3000	Coaks	6600	Rüböl, gereinigt	9000
Torf, trocken	4800	Holz- u. beste Steinkohle	7000	Petrol. u. Leuchtgas	12000
Steinkohle, geringe	6000	Weingeist	7000	Wasserstoff	34000

Mechanische Wärmequellen. Auch die *mechanische Arbeit* ist ein Mittel zur Erzeugung von Wärme. Im praktischen Leben bedienen

wir uns dieses Mittels, um die Verbrennung zunächst einzuleiten, z. B. beim Anzünden von Streichhölzern durch Reibung, beim Feuer schlagen mittelst Stahl und Feuerstein. Auch in zahlreichen anderen Fällen hat die mechanische Einwirkung eine Temperaturerhöhung der Körper zur Folge. Werkzeuge erhitzen sich beim Gebrauche, die Achsen der Räder und die Wellen der Maschinen beim Umlaufen in ihren Lagern, Metalle, wenn sie gehämmert, gewalzt und geprefst werden, die Kugeln der Geschütze beim Anprallen an feste Gegenstände u. s. w., überhaupt alle Körper, wenn sie Reibung, Druck, Stofs oder dergl. erleiden, mögen sie fest, flüssig oder luftförmig sein. Wird z. B. Qu. aus kaum $\frac{1}{2}$ m Höhe einigemal aus einem Gefäße in ein anderes gegossen, so ist noch eine Wärmeentwicklung nachweisbar. — Luft läßt sich durch Zusammenpressen so stark erwärmen, dafs leicht brennbare Stoffe (Zündschwamm) sich darin entzünden (pneumatisches Feuerzeug, Fig. 449).



Alle angeführten Beispiele stimmen darin überein, dafs die Bewegung eines Körpers durch Bewegungshindernisse verlangsamt oder gar aufgehoben, also mechanische Arbeit verbraucht wurde, an deren Stelle Wärme entstand. Dies führt zu dem Satze:

Überall, wo durch Bewegungshindernisse mechanische Arbeit verbraucht wird, entsteht Wärme.

Sonnen- und Erdwärme. Die vorzüglichste Wärmequelle für die Oberfläche der Erde ist die Sonne. Zwar läßt sich aus gewissen Erscheinungen (Vulkane, heifse Quellen, Zunahme der Temperatur mit der Tiefe in Bergwerken und Bohrlöchern) schliessen, dafs die Erde eine Eigenwärme besitzt; für die Vorgänge jedoch, welche an der Oberfläche der Erde stattfinden, ist diese bedeutungslos. Dasselbe gilt in noch höherem Mafse von der Wärme, welche andere Gestirne gegen die Erde ausstrahlen. Aus früheren Paragraphen (§§ 97 und 111) geht hervor:

Ein Körper wird durch die Sonnenstrahlen um so stärker erwärmt, je mehr der Einfallswinkel der Strahlen sich einem rechten nähert und je gröfser das Absorptionsvermögen des Körpers ist.

Auf Grund genauer Beobachtungen hat man berechnet, dafs die gesamte Wärmemenge, welche der Erde in einem Jahre von der Sonne zugeführt wird, ausreichen würde, eine die ganze Erde umgebende Eisdecke von ungefähr 30 m Höhe zu schmelzen, gleichmäfsige Verteilung der Wärme vorausgesetzt. — Die Zunahme der Temperatur im Erdinnern beträgt bis zu einer Tiefe von etwa 1300 m durchschnittlich 1° C für 30 m; in gröfseren Tiefen ist die Zunahme geringer (im Bohrloch zu Schladebach in der Provinz Sachsen, das mit über 1700 m Tiefe gegenwärtig das tiefste Bohrloch der Erde ist, wurde eine Temperaturzunahme von 1° C auf je 35,7 m Tiefe beobachtet). Heifse Quellen kommen an verschiedenen Stellen der Erde vor (§ 117, Übungsstoff).

Übungsstoff. 1. Steinkohlen liefern bei bester Heizvorrichtung höchstens $\frac{2}{3}$ ihres Wärmeverrates als Nutzwärme. Wv. kg Wasser von 100° können hiernach durch 1 kg der besten Steinkohle ganz in Dampf verwandelt werden? (§ 120.) —

2. Wv. kg W. von 0° könnten durch die Wärmemenge, welche a. 1 kg Kohlenstoff, b. 1 kg Leuchtgas zu erzeugen vermag, bis zur Siedetemp. erhitzt werden, wenn alle Wärme nutzbar gemacht werden könnte? — 3. Wird eine Glasröhre in eine leuchtende Flamme gehalten, so schwärzt sie sich zunächst; je heißer sie aber wird, desto mehr verschwindet der schwarze Überzug wieder. Erkl.! — 4. Warum ist bei den Streichhölzern eine sehr geringe mechanische Arbeit ausreichend, um eine Entzündung zu bewirken? — 5. Es ist möglich, Eis durch bloße Reibung (ohne Zuführung von Wärme) flüssig zu machen (Versuch von *Doey*). Wofür ist dies ein Beweis? — 6. Warum muß sich eine Geschützkuugel auf dem Wege durch die Luft erwärmen? (Sternschnuppen und Feuerkugeln.) — 7. Mittelst eines mit Kienrufs geschwärzten Gefäßes, das ganz mit W. gefüllt und mit einem Therm. versehen ist (Pyrheliometer von *Pouillet*), läßt sich im direkten Sonnenlichte annähernd bestimmen, wv. Wärmeeinheiten einer bestimmten Fläche in bestimmter Zeit zugeführt werden. Erkl.! (Die Strahlen müssen senkrecht gegen die ebene Fläche fallen.)

D. Wärmeerscheinungen in der Atmosphäre.

Meteorologie.

(Siehe § 36.)

§ 127. Temperatur der Luft und des Bodens. Man beobachtet oft, daß ein im Sonnenschein aufgehängtes Thermometer eine bedeutend höhere Temperatur anzeigt als ein im Schatten hängendes. Gewöhnlich schließt man daraus, daß die Luft im Sonnenschein wärmer sein müsse als im Schatten, da man der Meinung ist, das Thermometer zeige die Temperatur der dasselbe umgebenden Luft an. Dieser Schluss ist falsch, denn bringt man ein Thermometer durch Hin- und Herbewegen schnell mit immer neuen Luftschichten in Berührung (Schleuderthermometer), so zeigt sich, daß die Luft im Sonnenschein nur sehr wenig wärmer ist als im Schatten.

Bem. Die gebräuchliche Aufhängung der Thermometer ist nicht dazu geeignet, die wirkliche Temperatur der Luft zu ergeben. Will man diese erhalten, so muß das aufgehängte Thermometer stets im Schatten bleiben (Nordseite des Gebäudes) und vom Boden, sowie von allen Wärme ausstrahlenden Gegenständen weit genug entfernt sein (wenigstens 2 cm über dem Boden und 30 cm von der Wand).

Zahlreiche Beobachtungen lehren, daß die Temperatur der untersten Luftschichten im allgemeinen mit derjenigen der Bodenoberfläche übereinstimmt, daß aber die Temperatur der übrigen Luftschichten mit der Höhe abnimmt und zwar um so schneller, je trockener die Luft ist und je wärmer die unteren Schichten derselben sind. Diese Temperaturabnahme beträgt daher im Sommer mehr als im Winter und bei geringerer Erhebung vom Erdboden mehr als in größeren Höhen (durchschnittlich 1° C für ungefähr 200 m Steigung).

Die Temperatur der Atmosphäre nimmt mit der Höhe ab. Die Atmosphäre erhält ihre Wärme von der Erdoberfläche, welche ihrerseits durch Bestrahlung von der Sonne erwärmt wird.

Die Sonnenstrahlen werden von den höheren Schichten der Atmosphäre ganz, von den unteren, mit Staub und Dunst erfüllten Schichten größtenteils durchgelassen; die Erdoberfläche dagegen absorbiert die Sonnenstrahlen, erwärmt sich dadurch und strahlt wie ein geheizter Ofen dunkle Wärme wieder aus. Da nun die

Atmosphäre dunkle Wärmestrahlen nicht so leicht durchläßt als Sonnenstrahlen, so muß ihre Temperatur infolge der Ausstrahlung des Bodens mehr steigen als durch die Einwirkung der Sonnenstrahlen. Dies gilt wiederum hauptsächlich von den untersten Schichten der Atmosphäre. Diesen Schichten (nicht den höheren, da Luft ein sehr schlechter Wärmeleiter ist) teilt sich die Wärme der Erdoberfläche außerdem durch Leitung mit. In der Höhe kann daher nur dadurch eine Erwärmung der Luft eintreten, daß die unteren erwärmten Luftschichten aufsteigen. Letzteres aber ist mit einem Wärmeverlust verbunden, denn indem die Luft sich in der Höhe ausbreitet, leistet sie eine Arbeit; trockene Luftmassen kühlen sich bei je 100 m Emporsteigen um 1° C ab.

Bei starker Wärmeausstrahlung des Bodens kommt es bisweilen vor, daß die Temperatur nach oben nicht ab-, sondern zunimmt. Diese Erscheinung zeigt sich besonders im Winter in abgeschlossenen Gebirgstälern, in welchen kalte und schwere Luft, von den Höhen herabsinkend, abwärts fließt, während darüber wärmere Luftschichten sich ausbreiten (ein ausgezeichnetes Beispiel bietet das Innthal und der Brennerpafs). Auch in klaren Sommernächten ist die Luft über Wiesengründen infolge starker Strahlung oft bedeutend kälter, als über benachbarten Anhöhen.

Im Laufe des Tages wie des Jahres macht sich eine gewisse Regelmäßigkeit in den Veränderungen der Lufttemperatur bemerklich. Diese besteht darin, daß die Temperatur bis zu einer gewissen Höhe steigt und dann wieder fällt, sowie daß sie diesen höchsten und tiefsten Punkt zu bestimmten Zeiten erreicht. Die Zeit des Eintrittes der höchsten wie der niedrigsten Temperatur hängt außer vom Sonnenstande auch von der Beschaffenheit der Erdoberfläche (ob Meer oder Land) ab. Tagsüber ist im allgemeinen die Luft etwa gegen 2 Uhr nachmittags am wärmsten und kurze Zeit vor Sonnenaufgang am kältesten. Der wärmste Monat ist in unseren Gegenden im allgemeinen der Juli, während der Januar der kälteste ist (für Inseln und Küstenländer tritt sowohl die höchste als auch die niedrigste Jahrestemperatur etwas später ein).

Die höchste Tagestemperatur tritt bald nach dem höchsten Sonnenstande, die niedrigste kurz vor Sonnenaufgang ein. Die höchste und die niedrigste Jahrestemperatur treten bald nach dem höchsten und niedrigsten Sonnenstande ein.

Da die Luft ihre Wärme von der Erdoberfläche erhält, so müssen die periodischen Temperaturveränderungen der Luft wesentlich von dem Verhältnis abhängen, in welchen die Ausstrahlung zur Einstrahlung steht. Während der *Nacht* findet nur eine Ausstrahlung statt, die Temperatur muß daher nachts sinken. Am *Tage* überwiegt mit wachsender Sonnenhöhe die Einstrahlung, mit abnehmender Sonnenhöhe die Ausstrahlung. Tagsüber muß daher die Temperatur so lange steigen, bis Aus- und Einstrahlung gleich sind, was erst kurz nach dem höchsten Sonnenstande der Fall sein kann. — Ähnliches gilt auch von den *jährlichen Temperaturschwankungen*. Stände die Sonne das ganze Jahr hindurch im Äquator, so würde ihre Wärmewirkung für eine bestimmte geographische Breite während des ganzen Jahres dieselbe sein. Da nun aber die Sonnenhöhe und damit auch die Tageslänge zu- und abnimmt, so muß auch die Temperatur innerhalb eines Jahres zu- und abnehmen, und zwar muß dieselbe

nach dem höchsten Sonnenstande noch eine Zeitlang steigen, nach dem niedrigsten Sonnenstande hingegen noch eine Zeitlang sinken, denn bis zum Eintritt dieser Wendepunkte (21. Juni und 21. Dezember) hat die Erde beim Wachsen der Sonnenhöhe monatelang mehr Wärme erhalten, als sie wieder auszustrahlen vermag, bei der Abnahme der Sonnenhöhe hingegen monatelang mehr Wärme ausgestrahlt, als sie erhielt. Diese Verzögerung des Eintrittes der Zeit, in welcher die Ausstrahlung der Einstrahlung gleich ist, wird noch dadurch begünstigt, daß die Sonnenhöhe sich um die Zeit der Sonnenwende nur wenig ändert.

Die periodischen Temperaturschwankungen zeigen nach der geographischen Breite folgende Unterschiede: In der *heissen Zone* sind die jährlichen Schwankungen sehr gering, während die täglichen (besonders im Binnenlande) stark hervortreten. Mit der Annäherung an die gemäßigten Zonen nehmen die jährlichen Schwankungen zu, die täglichen ab. In den *gemäßigten* und namentlich in den *kalten Zonen* sind die jährlichen Schwankungen bedeutend grösser als die täglichen. In allen Zonen werden die Temperaturschwankungen durch die Nähe des Meeres gemildert (siehe § 121).

Die täglichen Temperaturschwankungen des Bodens sind schon in 1 m Tiefe unmerklich, die jährlichen Schwankungen in etwa 30 m (in den Tropen schon in 6 m) Tiefe.

Übungsstoff. 1. Wenn die Erde keine Atm. hätte, so würden die Temp.-Schwankungen der Erdoberfläche grösser sein und regelmässiger erfolgen; w.? — 2. Inwiefern übt die zufällige Beschaffenheit der Atm., insbesondere ihr Wasserdampfgehalt, einen Einfluss auf dieselben aus? — 3. Welchen Einfluss muß es auf die Temp. bewegter Luft ausüben, a. wenn die Luft in Thalengen hineingetrieben wird, b. wenn sie aufsteigt? — 4. Im nördlichen Sibirien (z. B. in der Gegend von Jakutzk) ist der Boden in einiger Tiefe beständig gefroren; trotzdem läßt sich dort in der kurzen Sommerszeit Ackerbau treiben. Wie läßt sich dies erklären? — 5. Wie erklärt es sich, daß das Verhältnis der täglichen und jährlichen Temp.-Schwankungen in den Äquatorgegenden ein anderes ist als in unseren Gegenden? — 6. Der Gang der Temp. eines Tages soll in einem Quadratnetze durch eine gebrochene Linie dargestellt werden (sogen. graphische Darstellung). Zu diesem Zwecke sind die Temp.-Grade neben einer senkrechten, die Tagesstunden unter einer wagerechten Linie in der Weise einzutragen, daß jeder höhere Schnittpunkt eine um 1° höhere Temp., jeder weiter nach rechts gelegene Schnittpunkt einen um 1 Stunde vorgerückten Zeitpunkt bedeutet. Die Temperaturen seien von Mitternacht zu Mitternacht $+12^{\circ}$, $11\frac{1}{2}^{\circ}$, 11° , $10\frac{1}{2}^{\circ}$, 10° , 11° , $11\frac{1}{2}^{\circ}$, 12° , 14° , 15° , 16° , $16\frac{1}{2}^{\circ}$, $17\frac{1}{2}^{\circ}$, $18\frac{1}{2}^{\circ}$, $18\frac{1}{2}^{\circ}$, $18\frac{1}{2}^{\circ}$, 18° , $17\frac{1}{2}^{\circ}$, $16\frac{1}{2}^{\circ}$, $15\frac{1}{2}^{\circ}$, 14° , 13° , $12\frac{1}{2}^{\circ}$, 12° . — 7. Desgl. der Gang der Jahrestemp. nach den Mitteltemperaturen der Monate: $-5\frac{1}{2}^{\circ}$, 4° , 20° , $+3^{\circ}$, 8° , 12° , $13\frac{1}{2}^{\circ}$, $12\frac{1}{2}^{\circ}$, $7\frac{1}{2}^{\circ}$, 2° , -1° , $3\frac{1}{2}^{\circ}$, $5\frac{1}{2}^{\circ}$.

§ 128. Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche.

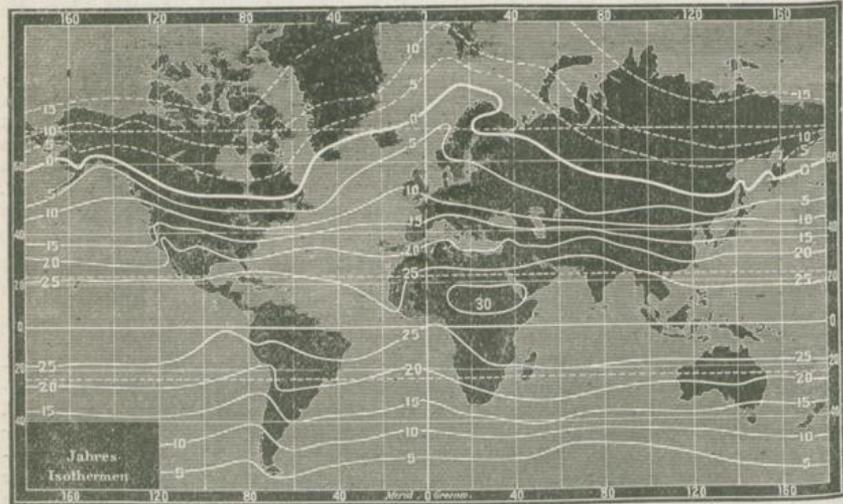
Um der Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche genau kennen zu lernen, hat man für zahlreiche Orte die *mittleren Temperaturen* der einzelnen Tage, Monate und Jahre dadurch bestimmt, daß man die Lufttemperaturen regelmässig (z. B. von Stunde zu Stunde) beobachtete, hieraus zunächst das arithmetische Mittel für die einzelnen Tage und aus diesen Tagesmitteln die mittleren Temperaturen der einzelnen Monate und des ganzen Jahres berechnete. Indem man die Beobachtungen jahrelang fortsetzte, erhielt man die *allgemeinen Mitteltemperaturen* der betreffenden Orte. Der leichteren Übersicht wegen hat man sämtliche Mitteltemperaturen in geographische Karten eingetragen und die Orte von gleicher Mitteltemperatur durch Linien miteinander verbunden

(Fig. 450). — *Linien, welche Orte von gleicher Mitteltemperatur miteinander verbinden, heißen Isothermen.*¹⁾

a. Jahres-Isothermen.

Dieselben geben einen Überblick über die Verteilung der durch-

Fig. 450.



schnittlichen Wärme des Jahres (Fig. 450) und führen zu folgenden wichtigen Sätzen:

1. Die Temperatur der Erdoberfläche nimmt vom Äquator nach beiden Polen hin unregelmäßig ab. Diese Unregelmäßigkeit ist auf der nördlichen Erdhälfte viel größer als auf der südlichen.

2. Auf der nördlichen Halbkugel (besonders in Europa) sind die an den Westküsten gelegenen Länder wärmer als die Länder an den Ostküsten.

Bem. Auf den Karten geben die ausgezogenen Linien Mitteltemperaturen über, die punktierten solche unter 0° an.

Wäre die Erdoberfläche überall von gleicher Beschaffenheit, so müßten die Orte, welche gleichweit vom Äquator entfernt liegen, auch dieselbe Mitteltemperatur haben. Die Isothermen würden dann also mit den Parallelkreisen parallel laufen und die Pole der Erde zugleich die Kältepole sein. Da aber auf der Erde Land und Meer, Berg und Thal u. s. w. miteinander abwechseln und sehr ungleich verteilt sind, so kann die Temperatur vom Äquator nach den Polen nicht gleichmäßig abnehmen. Wegen der größeren Ausdehnung des Landes und des größeren Wechsels der Strömungen in Luft und Meer muß auf der nördlichen Erdhälfte diese Unregelmäßigkeit am meisten hervortreten.

¹⁾ ἴσος (isos), gleich, θερμός (thermós), warm.

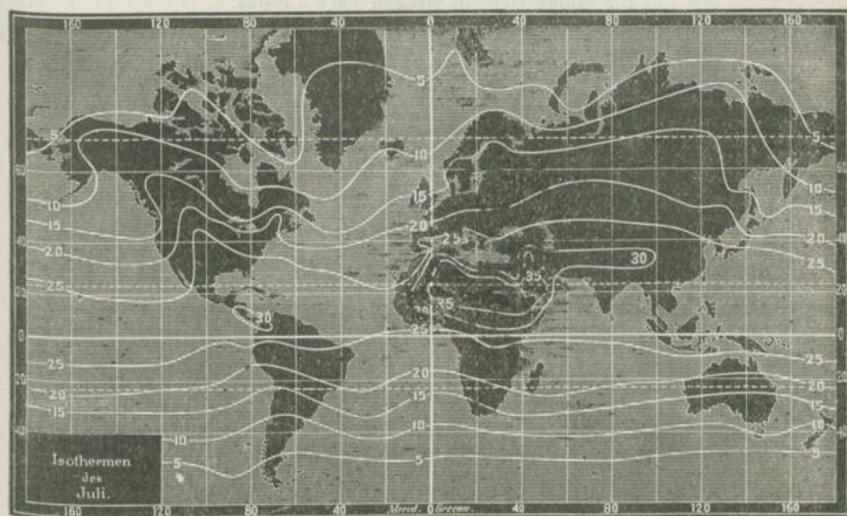
Die höhere Temperatur der Westküsten auf der nördlichen Erdhälfte erklärt sich namentlich aus der Wirkung der Meeresströmungen, welche jene Küsten berühren. Während die Westküsten größtenteils von warmen aus der Äquatorgegend kommenden Strömen bespült werden, fließen an den Ostküsten vorwiegend kalte Ströme vom Eismeer her. Auf die Temperatur Europas, besonders der Nordwestküste dieses Erdteils, übt der Golfstrom einen wesentlichen Einfluss aus. Durch diese Strömung gelangen vom mexikanischen Meerbusen her große Massen erwärmten Wassers in nordöstlicher Richtung bis an die Küste von Norwegen (vergl. den Verlauf der Jahres-Isotherme von 0°).

Die Erfahrung hat ergeben, daß zur Bestimmung der mittleren Tagestemperatur 2 oder 3 Beobachtungen ausreichen. Die Zeitpunkte, welche sich für Mitteleuropa dazu eignen, sind z. B. 8 Uhr morgens und 8 Uhr abends oder (genauer) 6 Uhr morgens, 2 Uhr nachmittags und 10 Uhr abends.

b. Monats-Isothermen.

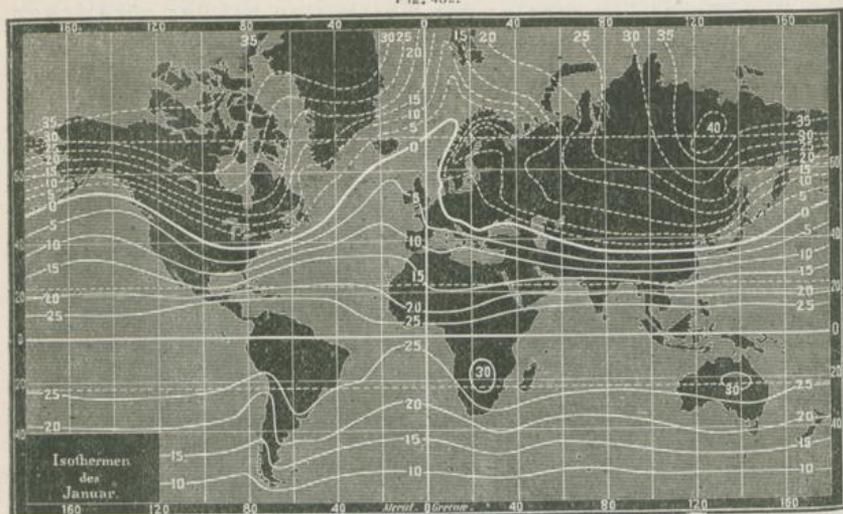
Die gegenseitige Lage dieser Isothermen muß sich offenbar mit der Jahreszeit ändern und zwar in der Weise, daß die Isothermen sich im Sommer weiter vom Äquator entfernen, im Winter hingegen sich demselben nähern (vergl. Fig. 451 und 452). Diese Verschiebung muß

Fig. 451.



wegen der stärkeren Erwärmung und der ebenfalls stärkeren Abkühlung des festen Bodens über den Erdteilen weit mehr betragen als über dem Meere, also namentlich auf der nördlichen Halbkugel sich bemerklich machen. Im Winter giebt es (nach Fig. 452, folg. Seite) auf der nördlichen Erdhälfte 2 Kältepole, von denen der eine in Amerika, der andere in Asien liegt. Die Monats-Isothermen geben wichtige Aufschlüsse über die klimatischen Verhältnisse der einzelnen Länder, wie folgende Beispiele beweisen.

Fig. 452.



Mitteltemperaturen
für einige Orte in Graden nach Celsius.

Ort	Geographische Lage	Temperatur		Temperatur- Unterschied
		im kältesten Monat	im wärmsten Monat	
St. Helena	ungef. 16° südl. Breite	+ 13,9	+ 19,0	5,1
Rom	} „ 42° nördl. „	+ 7,3	+ 25,0	17,7
Newyork		— 1,0	+ 23,7	24,7
Berlin	„ 52 1/2° „ „	— 0,9	+ 18,5	19,4
Dublin	„ 53° „ „	+ 5,1	+ 15,8	10,7
land(südl.Küste)	} „ 63° „ „	— 1,0	+ 11,0	12,0
Jakutzk		— 42,1	+ 16,7	58,8

Orte, welche mitten in einem großen Erdteile liegen, haben heiße Sommer und strenge Winter: **Kontinental- oder Landklima**; Orte, welche auf Inseln oder wenigstens nahe am Meere liegen, haben kühle Sommer und milde Winter: **Seeklima**.

Die Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche wurde zuerst von Alexander v. Humboldt (1817) durch Isothermenkarten veranschaulicht.

Übungsstoff. 1. Welchen Einfluss muß a. die Größe des Einfallswinkels der Sonnenstrahlen, b. die Länge des Weges, welchen sie in der Atm. zurücklegen, auf ihre erwärmende Kraft ausüben? — 2. Wende dies auf verschiedene geogr. Breiten an. — 3. Gibt es nach Fig. 450 und 451 in der gemäßigten Zone Orte, an denen die Sommertemp. die mittlere Jahrestemp. der Äquatorgegend erreicht oder übertrifft? — 4. a. In welchem Erdteile sind die Unterschiede der mittleren Jahrestemp. am geringsten, b. in welchem am größten? — 5. Der Verlauf der Jahresisothermen zeigt, daß in der heißen Zone die Landmassen wärmer sind als die Meere, während es sich in den höheren Breiten umgekehrt verhält. Erkläre diese Ersch.! — 6. Erkläre den sehr auffälligen Verlauf der Januar-Isothermen von 0°! — 7. In welchem Lande Europas sind die Temp.-Unterschiede im Winter in der Richtung von O. nach W. am größten? Erkl.! — 8. An welchem von den in der obigen

Tabelle angeführten Orten sind die jährlichen Temp.-Schwankungen am geringsten und an welchen am größten? Erklärung!

§ 129 a. Luftströmungen. Die ungleiche Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche muß einen Einfluß auf den Gleichgewichtszustand der Atmosphäre ausüben. Dies läßt sich schon aus den Strömungen schließen, welche eintreten, wenn die Luft eines erwärmten Zimmers mit der eines benachbarten kälteren Raumes in Verbindung gebracht wird (§ 35). In ähnlicher Weise wird jede stärkere Erwärmung eines Teiles der Erdoberfläche ein Aufsteigen der erwärmten Luft und ein Abfließen derselben in den oberen Schichten, in den unteren hingegen ein Zufließen kälterer Luft zur Folge haben. Strömungen dieser Art kommen in größtem Maßstabe in der Lufthülle beider Erdhälften vor.

Passatwinde.

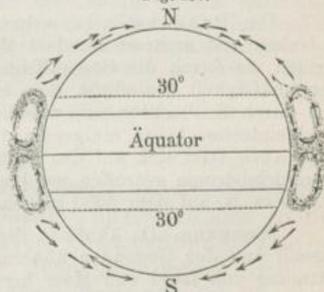
In der Äquatorgegend findet das ganze Jahr hindurch eine starke Erwärmung der unteren Luftschichten statt, welche dadurch ausgedehnt werden und in die Höhe steigen. Dieses Aufsteigen der Luft hat zunächst zur Folge, daß der Luftdruck in den höheren Schichten zunimmt; die Schichten gleichen Druckes, welche sonst mit der Erdoberfläche gleiche (konzentrische) Lage haben würden, müssen sich demnach heben. Dadurch entsteht in der Höhe ein nach beiden Polen hin gerichtetes Gefälle, infolgedessen die obere Luft polwärts abfließt, während unten von Norden und Süden her kältere Luft in den entstandenen luftverdünnten Raum einströmt.

Auf diese Luftdruckverhältnisse übt nun die Gestalt der Erde einen Einfluß aus. Der Raum für die polwärts abfließende Luft wird infolge der Krümmung der Erde immer enger; es muß sich daher zu beiden Seiten des Gürtels stärkster Erwärmung Luft anhäufen und diese Anhäufung der Luft nimmt bis zu der Gegend zwischen dem 30. und 40. Breitengrade zu. Hier ist der Luftdruck an der Erdoberfläche dauernd am größten. Zwischen diesem Breitengrade und der Äquatorgegend findet beständig ein geschlossener Kreislauf der Luft statt (Fig. 453). Die nicht in diesen Kreislauf hineingezogene Luft der oberen Strömung scheint ihren Weg polwärts fortzusetzen.

Der Luftdruck beträgt in der Äquatorgegend in Meereshöhe fast immer 760 mm; von da bis zu der Zone zwischen dem 30. und 40. Grade nördl. und südl. Breite nimmt er durchschnittlich bis ungefähr 765 mm zu und dann wieder ab nach den Polen hin.

Der Erdgürtel, in welchem das Aufsteigen großer Luftmassen täglich erfolgt, wird **Region der Kalmen oder Windstillen** genannt. Die nach dem Kalmengürtel gerichteten unteren Luftströmungen heißen

Fig. 453.



Passatwinde (*Polarströme*), die nach den Polen gerichteten oberen Strömungen Gegenpassate (*Äquatorialströme*).

Der Kalmengürtel hat nicht überall die gleiche Breite und auch nicht immer dieselbe Lage. Er entspricht im allgemeinen den Gegenden der Erdoberfläche, welche sich am stärksten erwärmen; seine Grenzen verschieben sich daher nach dem Sonnenstande und zwar am meisten auf der nördlichen Halbkugel, wo er in unserem Sommer ungefähr den 10. Grad erreicht (im atlant. Ocean), während er an seiner Südseite sich etwa bis zum Äquator erstreckt. Innerhalb des Kalmengürtels herrscht meistens Windstille, welche nur zeitweise durch stürmische Winde unterbrochen wird.

Richtung der Passatwinde. Die Richtungen der oberen und unteren Passatströmungen würden genau nördliche und südliche sein, wenn die Erde in Ruhe wäre und die Erdoberfläche überall gleiche Beschaffenheit hätte. Nun aber dreht sich die Erde mit ihrer ganzen Lufthülle um ihre Achse. Die vom Äquator abfließende Luft hat daher schon bei Beginn ihrer polwärts gerichteten Bewegung eine Geschwindigkeit nach O. (etwa 460 m in 1 Sek.), welche aber am Äquator selbst nicht bemerkbar ist, da hier alle Punkte der Erdoberfläche die gleiche östliche Geschwindigkeit haben; je mehr sich indes die Luft vom Äquator entfernt, um so mehr fließt sie über Orte der Erdoberfläche hinweg, welche sich langsamer von W. nach O. bewegen, denen sie mithin voraus eilen muß. Der Äquatorialstrom eilt daher den Orten desjenigen Meridians, welcher sonst seine Bahn bezeichnen würde, nach O. voraus: *auf der nördlichen Erdhälfte wird aus dem S.-Winde ein SW.-Wind.* Mit dem Polarstrome verhält es sich umgekehrt, da die Luft desselben ursprünglich eine um so geringere Geschwindigkeit nach O. hat, je näher ihr Ausgangspunkt dem Pole liegt. Der Polarstrom bleibt daher zurück hinter den Orten des Meridians, welcher seine Bahn sonst bestimmen würde: *aus dem N.-Winde wird auf der nördlichen Erdhälfte ein NO.-Wind.* Nord- und Südwinde werden somit durch die Achsendrehung der Erde auf der nördlichen Halbkugel nach rechts abgelenkt; auf der südlichen Halbkugel findet eine Ablenkung beider Winde nach links statt. (Vergl. auch § 77, *Foucaults Pendelversuch.*)

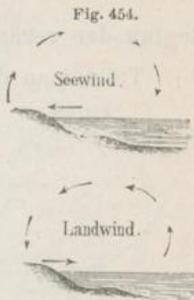
Die Passatwinde wehen in größter Regelmäßigkeit nur auf dem Meere und zwar erst mehrere hundert Meilen von der Küste entfernt. Auf dem Festlande werden sie durch die Beschaffenheit der Erdoberfläche (Gebirge u. s. w.) in ihrer Regelmäßigkeit beeinflusst. Das regelmäßige Wehen der Äquatorialströme bestätigt sich durch Beobachtungen, welche man an der Rauchsäule und der hoch emporgeschleuderten Achse einiger in der Äquatorialgegend gelegenen Vulkane gemacht hat. Auch läßt sich auf den Spitzen hoher Berge, welche von den herabsinkenden Äquatorialströme getroffen werden, die Regelmäßigkeit der oberen Strömung nachweisen (z. B. auf dem 3600 m hohen Pik von Teneriffa).

Monsune. Da ähnliche Temperaturgegensätze, wie sie zwischen der Äquatorgegend und den Gegenden höherer Breiten bestehen, auch durch die ungleiche Erwärmung von Land und Meer hervorgerufen werden, so können die beschriebenen regelmäßigen Luftströmungen durch große Erdteile erhebliche Abänderungen erleiden. Das großartigste Beispiel dieser Art zeigt Asien. Die über Mittelasien im Sommer eintretende starke Erwärmung und Auflockerung der Luft (der Barometerstand ist z. B. in Peking im Juli 20 mm niedriger als im Januar), wie die starke Erkaltung und Verdichtung derselben im Winter bewirken, daß im indischen Ocean, nördlich vom Äquator, regelmäßig im Sommer ein SW.-Wind, im Winter ein NO.-Wind weht. Derartige Winde heißen Monsune, d. h. soviel wie Jahreszeitenwinde.

Küstenwinde. Gebirgswinde. An den Küsten, namentlich in der heißen Zone, kann auch durch den regelmäßigen täglichen Temperaturwechsel ein täg-

licher Wechsel in der Windrichtung hervorgerufen werden (Fig. 454). Tagsüber steigt hier die vom Boden aus erwärmte Luft in die Höhe, und kältere, dichtere Luft vom Meere her tritt an ihre Stelle; des Nachts dagegen strömt umgekehrt die über dem Boden lagernde, abgekühlte Luft nach dem Meere hin. Am Tage weht somit ein Seewind, in der Nacht ein Landwind. Ersterer wird in der Regel erst mehrere Stunden nach Sonnenaufgang bemerklich, nimmt noch 2–3 Stunden lang nach Mittag an Stärke zu und legt sich gegen Abend; letzterer beginnt etwa gegen Mitternacht und weht am stärksten gegen Sonnenaufgang. Die Land- und Seewinde sind im allgemeinen nur schwach; sie sind überhaupt nicht bemerklich, wenn ein anderer, stärkerer Wind vorherrscht.

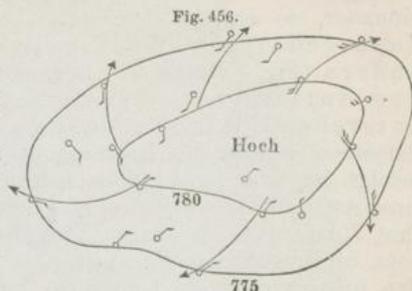
Auch im Gebirge kann ein täglicher Windwechsel vorkommen. Ist die Luft sonst ruhig, so weht bei genügender Erwärmung der Bergabhänge durch Sonnenstrahlung am Tage ein Wind thalaufwärts, nachts infolge der stärkeren Abkühlung der Hänge thalabwärts. Auch diese Winde treten um so deutlicher hervor, je weniger allgemeinere Luftströmungen vorherrschen und gelten daher besonders im Hochgebirge als ein Zeichen gleichmäßiger guten Sommerwetters (Unterwind und Oberwind).



Übungsstoff. 1. Als mittlerer Luftdruck in Meereshöhe ergab sich in Südamerika (unter dem Äquator) 759 mm, in Nordamerika (39° nördl. Br.) 767 mm; dagegen in einer Höhe von 4060 m über dem Meere in Südamerika 471 mm, in Nordamerika 458 mm. Welche Schlüsse lassen sich aus der Vergleichung dieser Zahlen ziehen? — 2. Auf der Spitze des Peks von Teneriffa (28° nördl. Br.) weht beständig SW.-Wind, auf dem Meere hingegen (wenigstens im Sommer) NO.-Wind. Erkl.! — 3. Die Asche des Vulkans Coseguina in Central-Amerika fiel auf Jamaika nieder, obwohl diese Insel über 160 geogr. Meilen nordöstlich vom Vulkan entfernt ist und auf der Insel wie auf dem Meere der Wind entgegengesetzte Richtung hatte. Erkl.! (Der Vulkan liegt etwa auf dem 13., die Insel unter dem 18. Grade nördl. Br.) — 4. Die Stärke von Luftströmungen wächst im allgemeinen mit den Temperaturgegensätzen benachbarter Teile der Erdoberfläche; w.? — 5. Welcher Unterschied ergibt sich hieraus hinsichtlich der Stärke der atm. Äquatorialströmungen der nördl. Erdhälfte für unsern Sommer und Winter? Grund! — 6. Wie läßt sich aus der Verteilung von Land und Meer der Schlufs ziehen, daß diese Strömungen auf der nördlichen Erdhälfte im allgemeinen stärker sein müssen als auf der südlichen? — 7. Im Januar sind die Winde Australiens vorherrschend vom Meere nach dem Innern des Festlandes, im Juli entgegengesetzt gerichtet. Erkl.! (Australien liegt zwischen dem 15. und 40. Grade südl. Br.) — 8. Warum nimmt die Deutlichkeit der Küstenwinde mit der geogr. Breite ab?

§ 129 b. Luftströmungen. (Fortsetzung.) Ob ungleiche Erwärmung als die einzige Ursache der Gleichgewichtsstörungen in der Atmosphäre anzusehen ist, oder ob noch andere Ursachen mitwirken, ist nicht mit genügender Sicherheit bekannt. Jedenfalls ergibt sich als sicherer Ausgangspunkt für die Erklärung der Luftströmungen die tatsächliche Abhängigkeit dieser Strömungen von der Verteilung des Luftdruckes. Offenbar kann die Atmosphäre nur dann im Gleichgewichte sein, wenn überall in gleichen Höhen derselbe Druck herrscht, und es müssen Strömungen entstehen, wenn dies nicht der Fall ist, da dann die Luft nach den Orten niederen Druckes ein Gefälle hat. Durch die genauere Erforschung dieser Verhältnisse hat sich über den Zusammenhang zwischen der Verteilung des Luftdruckes und der herrschenden Windrichtung eine Gesetzmäßigkeit erkennen lassen, welche auch über

Orte niedrigeren Druckes gruppieren (Fig. 456). In diesem Falle fließt die Luft nach aufsen ab, wobei sie ebenfalls durch die Rotation der Erde abgelenkt wird. Infolgedessen weht der Wind in spiralförmigen Bahnen, deren Drehungsrichtung mit der eines Uhrzeigers übereinstimmt. Die Abnahme des Druckes, sowie die Abweichung von der Richtung des größten Gefälles ist bei dieser Druckverteilung gewöhnlich viel schwächer, also auch die Krümmung der Windbahnen und die Windstärke eine geringere (Befiederung der Pfeile in Fig. 456).



Über den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Windrichtung gelten demnach folgende Gesetze:

1. Der Wind weht stets von den Orten, welche einen höheren Luftdruck haben, nach den Orten niedrigeren Luftdruckes hin.

2. Alle Winde werden auf ihrem Wege abgelenkt, und zwar auf der nördlichen Erdhälfte nach rechts, auf der südlichen nach links.

Für die Auffindung der Luftdruck-Minima und -Maxima ergibt sich demnach für die nördliche Erdhälfte die einfache Regel:

Wendet man dem Winde den Rücken zu, so liegt das Minimum etwas nach vorn links, das Maximum etwas nach hinten rechts.

Das angeführte Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Windrichtung ausspricht und die Vorausbestimmung der letzteren ermöglicht, muß als die wichtigste Errungenschaft der neueren Witterungskunde bezeichnet werden. Man nennt dasselbe nach dem holländischen Meteorologen Buys Ballot (spr. Beis Ballo), der es 1857 zuerst anwendete, das **Buys Ballotsche Windgesetz**.

In Fig. 457 und 458 sind zwei Windsysteme schematisch so dargestellt, als ob die Linien gleichen Druckes konzentrische Kreise bildeten, die Richtungen des größten Gefälles also mit den Halbmessern der Kreise zusammenfielen und alle Windbahnen gleiche Krümmung hätten. Eine solche Luftdruckverteilung kommt in Wirklichkeit kaum vor. Beide Windsysteme erleiden vielmehr, besonders auf dem Festlande, durch verschiedene örtliche Einflüsse die mannigfaltigsten Abweichungen, sodass sie oft sehr unregelmäßig erscheinen. — Die Gebiete des höchsten Druckes haben gewöhnlich eine weit größere Ausdehnung als die des niedrigsten Druckes (bisweilen mehrere hundert Meilen im Durchmesser); die Windsysteme selbst erstrecken sich nicht selten über ganze Erdteile.

Fig. 457.

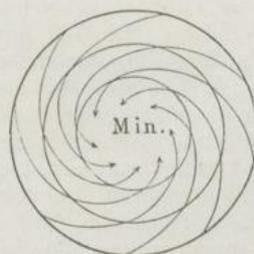
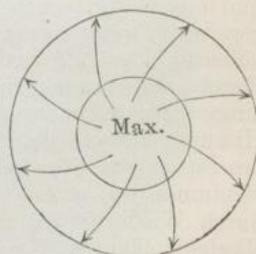


Fig. 458.



Fortbewegung der Luftdruckminima. Vergleicht man die Verteilung des Luftdruckes an mehreren aufeinander folgenden Tagen miteinander, so ergibt sich, daß die Luftdruckminima mit den dazu gehörigen Windsystemen ihre Lage meist schnell ändern (Fig. 459 und 460, folg. Seite) und gewöhnlich bald nach dem Entstehen wieder verschwinden, während andere neu entstehen. Die Luftdruckmaxima dagegen lagern meist längere Zeit über derselben Gegend. Die Richtung, in welcher die Verschiebung der Minima erfolgt, ist zwar verschieden, jedoch hat man durch fortgesetzte Beobachtung entdeckt, daß sie im allgemeinen gewisse Wege einhalten, welche man ihre Zugstraßen nennt. Die Minima, welche für das nördliche Europa in Frage kommen, machen sich in der Regel zuerst westlich von den britischen Inseln bemerkbar und ziehen in östlicher oder nordöstlicher Richtung weiter mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von etwa 100 km für den Tag, wobei jedoch sowohl in Bezug auf die Geschwindigkeit als auf die eingehaltenen Zugstraßen sehr erhebliche Abweichungen vorkommen, die zum Teil von der Jahreszeit abhängen (im Winter nehmen z. B. die Minima oft eine südöstliche Richtung durch Frankreich nach dem Mittelmeer), zum Teil ganz regellos sind (manche Minima haben auch eine nördliche oder westliche Bewegungsrichtung).

Für die in Deutschland vorherrschenden Luftströmungen ist die Tatsache entscheidend, daß bei weitem die meisten Minima nördlich an uns vorbeiziehen. Wie aus Fig. 457 hervorgeht, dreht sich nun der Wind für alle Orte, welche auf der Südseite eines fortschreitenden Minimums liegen, in folgender Weise: von Südost über Süd nach West und über Nordwest nach Nord (an der Rückseite des Minimums); der Wind dreht sich somit mit der Sonne, eine Erfahrungsthat, die man als das *Dovesche Winddrehungsgesetz* schon länger kannte (§ 84), die aber erst durch das *Buys Ballotsche Gesetz* ihre Erklärung findet. Wenn das Minimum südlich an einem Orte vorbeigeht, so muß die Drehung des Windes von Südost über Ost, Nordost und Nord nach Nordwest erfolgen, also abweichend vom Doveschen Gesetz, welches mithin eine allgemeinere Giltigkeit überhaupt nicht haben kann.

Wind und Wetter. Das Wetter wird wesentlich von dem Verlauf der Minima bestimmt, wie eine genaue Beobachtung des Barometers und eine Vergleichung der von der deutschen Seewarte täglich herausgegebenen *synoptischen Karten* (Fig. 459 und Fig. 460) zeigt. Bei Annäherung des Luftwirbels fängt das Barometer an zu sinken und in der Regel deutet auch die Wolkenbildung (zuerst sehr hochschwebende, langgestreckte Federwolken, dann eine dickere Wolkenschicht am westlichen Himmel) auf die bald folgenden Niederschläge hin. Allmähliches Steigen des Barometers dagegen kündigt an, daß das im Vorbeiziehen begriffene Minimum von einem Gebiet höheren Druckes abgelöst wird, welches sich durch Wiedereintritt hellen, trockenen Wetters (oft unter Bildung von Haufenwolken) und Umspringen des Windes nach Nord kennzeichnet. Diesen Charakter behält nun die Witterung bis zum Herannahen eines neuen Luftwirbels. Der Verlauf der Witterungserscheinungen, wie er sich beim Vorübergang eines Luftdruckminimums im allgemeinen abspielt, läßt sich durch Folgendes erklären:

Luftdruck
vom 10. u. 11. Okt.
8 Uhr

Fig. 459.

333
und Wind
1878
morgens.

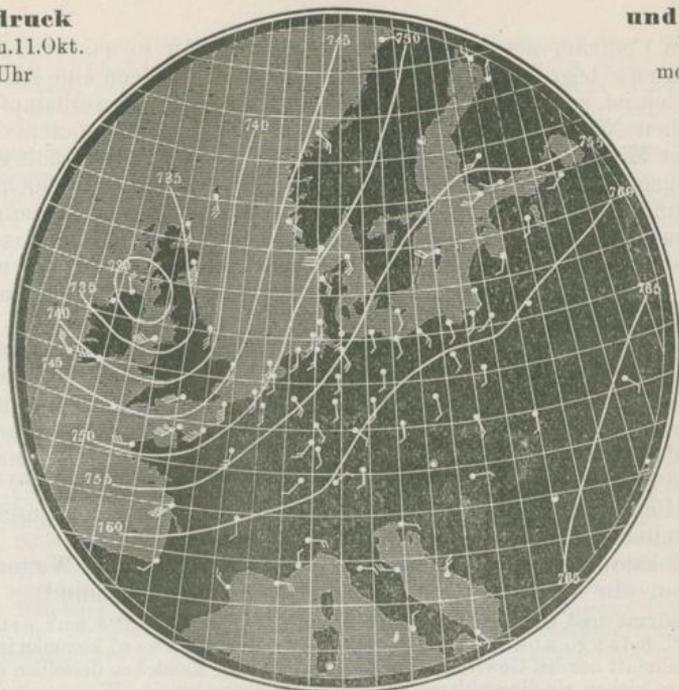
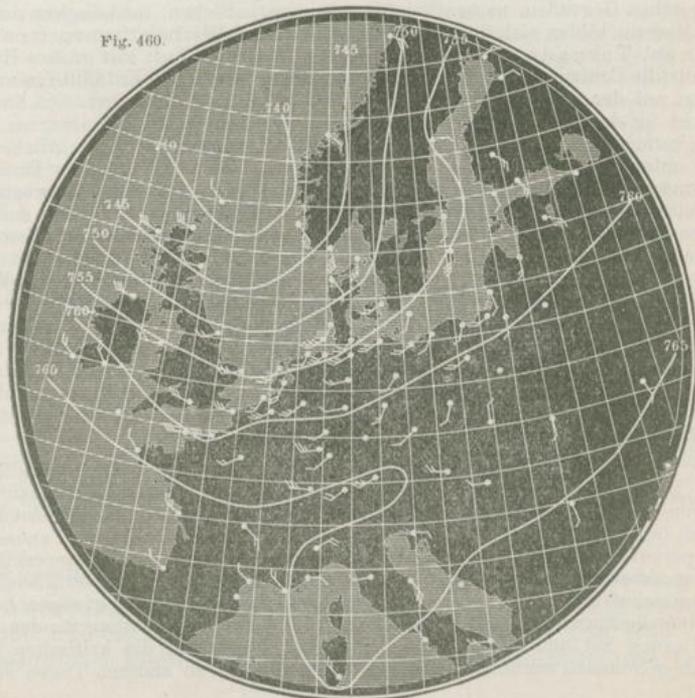


Fig. 460.



Im Centrum des Minimums muß die Luft in aufsteigender Bewegung begriffen sein und da mit diesem Aufsteigen eine Abkühlung verbunden ist, so muß dasselbe zur Verdichtung von Wasserdampf und zu reichlichen Niederschlägen Veranlassung geben. Auch auf der vorderen Seite des Minimums, wo Südost- und Süd-Winde herrschen, fällt gewöhnlich Regen, und ebenso auf der Südseite, wo warme und feuchte Südwest- und West-Winde wehen. Auf der Rückseite des Minimums dagegen muß sich mit dem Übergange des Windes nach Nord das Wetter aufhellen (im Winter zu trockenem Froste) und während des nun folgenden Luftdruckmaximums klar bleiben, da ein Maximum immer durch eine absteigende Luftbewegung charakterisiert ist, womit stets eine Erwärmung der Luft und somit trockenes Wetter zusammenhängt.

Auf diesen allgemeinen Gesetzen beruht die Möglichkeit einer Vorausbestimmung der Witterung auf kürzere Zeit (höchstens einige Tage), wie sie von der deutschen Seewarte und vielen Wetterwarten auf Grund der täglich entworfenen Wetterkarten versucht wird. So grofs indes auch die Bedeutung einer sicheren Wettervorhersage („Prognose“) in vielfacher Hinsicht ist, so sind doch andererseits die Witterungsvorgänge so verwickelter Art, und werden (namentlich im Binnenlande) so vielfach durch lokale Verhältnisse beeinflusst, daß bis jetzt den Wettervorhersagen nur ein beschränkter Wert zugestanden werden kann.¹⁾

Stürme und Sturmwarnungen. Luftwirbel, welche nur einen geringen Umfang, aber eine heftige Bewegung haben, kommen in unseren Gegenden meist nur bei Gewittern vor (Windhosen). Entstehen dieselben über dem Wasser, so ziehen sie dieses bisweilen in ihre Bewegung hinein (Wasserhosen). In den tropischen Gegenden, namentlich über den westindischen, ostindischen und chinesischen Meeren, bilden sich derartige Wirbel leicht zu Wirbelstürmen (tropische Cyklonen, Tornados, Teifune) aus, bei denen die Luft mit grofser Heftigkeit das windstille Centrum umkreist, und zwar auf der nördlichen Erdhälfte in entgegengesetzter, auf der südlichen in gleicher Richtung mit dem Uhrzeiger. Die Fortschreitungsrichtung der Cyklone ändert sich beim Überschreiten der Passatregion. Da die Luftdruckerniedrigung im Centrum des Wirbelsturmes eine sehr beträchtliche ist (bis 60 mm unter den mittleren Barometerstand) und da außerdem der Druck nach außen rasch zunimmt, so ist auch die Heftigkeit der drehenden Bewegung eine ganz außerordentliche und dementsprechend sind die Verwüstungen, welche die Cyklonen anrichten, ganz gewaltige. Als eine sehr charakteristische Erscheinung wird die Windstille im Centrum des Sturmes geschildert, auf welche ein erneuter Ausbruch desselben in entgegengesetzter Richtung folgt. Die Kenntnis des Verlaufes der Cyklonen ist für die Schifffahrt von grofser Bedeutung und deshalb werden dieselben möglichst genau verfolgt. Der Seefahrer weiß, daß sie im allgemeinen dem Laufe der warmen Meeresströmungen folgen (der Golfstrom wird deshalb „Sturmkönig“ genannt) und kann aus Änderungen des Luftdruckes und der Windrichtung die Lage des Wirbelcentrums bestimmen. Über die eigentliche Ursache ihrer Entstehung weiß man nur sehr wenig und vermutet, daß starke Kondensation von Wasserdämpfen eine wesentliche Rolle dabei spielt.

¹⁾ Der uralte und weit verbreitete Glaube von einem Einflufs des Mondes auf das Wetter muß, als auf ungenauen (zum Teil sogen. „unwillkürlichen“) Beobachtungen beruhend, zurückgewiesen werden; dasselbe gilt von der anscheinend wissenschaftlich begründeten Theorie, welche aus dem Einflufs des Mondes (und anderer Himmelskörper) das Auftreten besonders bedeutungsvoller Witterungsvorgänge erklären und deren Vorausbestimmung ermöglichen will (sogen. „kritische Tage“). Die genauesten wissenschaftlichen Untersuchungen und die praktischen Beobachtungen haben ergeben, daß die Einwirkung des Mondes keine nachweisbare Bedeutung für den Wechsel der Witterung hat und daß die Erscheinungen, welche für die kritischen Tage in Anspruch genommen werden, mindestens ebenso häufig an anderen Tagen eintreten.

Winde, deren Eigenschaften sich auf besondere örtliche Einflüsse zurückführen lassen, sind z. B. der *Föhn*, die *Bora*, der *Scirocco*, *Solano*, *Samum* u. a. Der *Föhn* ist ein trockener, warmer Wind, welcher besonders im nordöstlichen Teile der Schweiz mit stürmischer Gewalt auftritt. Er entsteht, wenn sich nördlich von den Alpen ein Gebiet niedrigsten Luftdruckes bildet, in welches die über die Alpenkette strömenden Südwinde gleichsam herabgesaugt werden. Diese haben ihren Wasserdampfgehalt beim Aufsteigen an der Gebirgskette abgegeben und stürzen nun als trockene Luftströme in die nördlichen Thäler hinab, dem Lauf derselben folgend und durch Zusammenpressen sich noch mehr erwärmend. Föhnartige Winde entstehen überall da, wo höhere Gebirgsketten von starken und wasserdampfreichen Luftströmungen überschritten werden (z. B. in Grönland, Norwegen, im kleineren Mafsstabe auch in den Thälern am nördlichen Harzrande). — Die *Bora* ist ein kalter Sturm, der vom Karstplateau in der Richtung nach dem adriatischen Meere weht, wenn im Süden desselben ein Luftdruckminimum liegt bei hoher Temperatur des Küstengebietes und starker Abkühlung des kahlen Plateaulandes.

Die genaue Erforschung der Gesetze, welche der Luftdruckverteilung und den Bewegungen der Atmosphäre zu Grunde liegen, ist für die Schiffahrt von größter Wichtigkeit, da diese Gesetze die einzig sichere Grundlage bilden für die Erteilung von Sturmwarnungen, welche den bedrohten Küsten von einer Centralstelle telegraphisch zugehen. Diese Sturmwarnungen werden an den betreffenden Küstenorten (in Deutschland etwa 80) durch optische Signale den Schiffen mitgeteilt, eine Einrichtung, die sich als sehr segensreich erweist, da man auf Grund der an der Centralstelle täglich eingehenden telegraphischen Nachrichten sowohl die Windrichtungen, als auch die Windstärken ziemlich sicher vorausbestimmen kann (die Seewarte in Hamburg erhält von etwa 100 Stationen aus ganz Europa täglich Depeschen). In der großartigsten Weise ist das System der Wettertelegraphie und der Sturmwarnungen in den Vereinigten Staaten von Nordamerika ausgebildet.

Übungsstoff. 1. Wie ändert sich die Geschw. des W. eines Flusses mit der Entfernung vom Ufer und mit der Tiefe? Welche Anwendung auf die Bewegungen im Luftmeer läßt sich von dieser Beobachtung machen? (Wichtigkeit der Hochwetterwarten.) — 2. Unterschied des Einflusses, welchen Land und Meer auf die Geschw. der Winde ausüben? — 3. Bei ruhiger Luft erwärmt sich oft eine verhältnismäßig kleine Bodenfläche bedeutend stärker als ihre Umgebung. Welcher Vorgang wird dadurch in der Atm. eintreten und welche Ersch. wird entstehen, wenn das (labile) Glgew. der Luft plötzlich gestört wird? — 4. Man denke sich durch das Centrum der Fig. 457 eine wagerechte Linie gelegt, welche die Zugstrafse des Luftwirbels andeute. Wie würde sich dann die Windrichtung an einem in der Geraden links an der Grenze des Wirbels gelegenen Orte ändern, wenn der Wirbel sich von links nach rechts fortbewegte? — 5. Desgl. an einem Orte, welcher nahe am Centrum und zwar a. nördlich, b. südlich, c. westlich, d. östlich von demselben liegt? (Man denke sich für jeden dieser Fälle etwa an den inneren Kreis in der Zugrichtung eine Tangente gezogen.) — 6. Wie ändert sich nach den beiden Wetterkarten, Fig. 459 und 460, die Windrichtung a. in Deutschland, b. der französischen Küste, c. an der Süd- und Ostküste von England und Schottland, d. an der Nordspitze von Schottland und auf den Shetlands-Inseln? — 7. Auf welcher von jenen Karten hat die Luft nach der gegenseitigen Lage der Isobaren im allgemeinen das größte Gefälle? Erkl.! — 8. Ein absteigender Luftstrom erwärmt sich bei je 100 m Abnahme der Höhe ungefähr um 1° C, ein aufsteigender Luftstrom kühlt sich ab. Wende dies auf den *Föhn* an. — 9. Inwiefern wird durch die Wolkenbildung das Aufsteigen der Luft befördert? (Erwärmung bei Kondensation von Wasserdampf, § 120.)

§ 130. Feuchtigkeit der Luft. (Hygroskop und Hygrometer.) Niederschläge. Von den Beimischungen der aus Sauerstoff und Stickstoff bestehenden atm. Luft ist nur dem Wasserdampf ein wesentlicher Einfluß auf die klimatischen Verhältnisse der Erde zu-

zuschreiben. Während jene beiden Gase in der Atmosphäre in unveränderlichem Verhältnis vorkommen, ist die Menge des Wasserdampfes sowohl von der Beschaffenheit der Erdoberfläche, als auch von der Temperatur und den Strömungen der Luft abhängig. Die Verdunstung an der Oberfläche der auf der Erde vorhandenen Wassermassen und die Ausscheidung von Wasserdampf durch die Pflanzenwelt sind die Hauptquellen der Luftfeuchtigkeit.

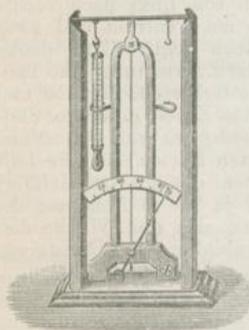
Nach unserer Empfindung bezeichnen wir als trockene Luft solche, welche von ihrem Sättigungspunkte weit entfernt ist, während feuchte Luft ihrem Sättigungspunkte sehr nahe ist. Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft kann entweder durch die Gewichtsmenge des in einer Raumeinheit (cbm) enthaltenen Wasserdampfes ausgedrückt werden (*absolute Feuchtigkeit*), oder dadurch, daß man angiebt, wieviel Prozent die in der Luft vorhandene Dampfmenge von derjenigen beträgt, welche mit Dampf gesättigte Luft von derselben Temperatur enthält (*relative Feuchtigkeit*).

Wird mit Dampf gesättigte Luft abgekühlt, so verdichtet sich ein Teil des Dampfes und scheidet sich in Form feiner Wassertröpfchen aus. *Die Temperatur, bei welcher diese Ausscheidung beginnt, (bei welcher also die vorhandenen Dämpfe gesättigt sein würden) heißt Taupunkt.*

Instrumente, welche die Zu- und Abnahme der Luftfeuchtigkeit anzeigen, ohne eine genaue Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes zu gestatten, werden Hygroskope¹⁾ genannt. Der wesentlichste Teil derselben ist ein organischer Körper, welcher leicht Feuchtigkeit aufsaugt und sich dadurch verlängert oder verkürzt, je nachdem er ungedreht oder gedreht ist, z. B. entfettetes Menschenhaar, Darmsaiten (in den sogen. Wetterhäuschen), Fruchtgrannen vom Geranium u. s. w. — *Instrumente zur genauen Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Luft heißen Hygrometer.*

1. Das Haarhygrometer, erfunden von Saussure. (Fig. 461 zeigt

Fig. 461.



zogenen Metallspirale

die verbesserte Einrichtung von Koppe.) Bei demselben dient die Verlängerung oder Verkürzung eines entfetteten ausgespannten Menschenhaares zur Bewegung eines Zeigers, der auf einem getheilten Kreisbogen die relative Feuchtigkeit in Prozenten anzeigt.

Aus der am Instrumente abgelesenen relativen Feuchtigkeit und der Temperatur der Luft läßt sich mittelst einer besonderen *Reduktions-scheibe* der Taupunkt leicht bestimmen. Die Einteilung der Skala wird durch einen Versuch erhalten und bedarf einer öfteren Prüfung.

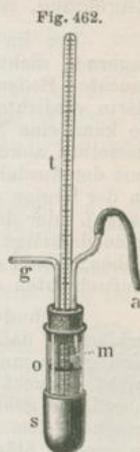
Außer anderen Haarhygrometern von mehr oder weniger verschiedener Einrichtung werden neuerdings auch Hygrometer empfohlen, bei denen z. B. die Bewegung einer mit einer hygroskopischen Membran überzogenen Metallspirale den Feuchtigkeitsgrad anzeigt.

¹⁾ ὑγρός (hygros), feucht.

2. Das **Kondensationshygrometer** beruht auf der Bestimmung des Taupunktes. Fig. 462 zeigt die Einrichtung, welche dem älteren Kondensationshygrometer von *Daniell* durch *Regnault* gegeben worden ist.

Ein aus poliertem Silber bestehendes Gefäß (s) verschließt eine bis zur Höhe o mit Äther gefüllte Glasröhre, in welche ein Thermometer (t) eingeführt ist. Durch den Kork, welcher die Glasröhre umschließt, ist noch eine mit ihrer Mündung in den Äther eintauchende offene Röhre (g) und eine mit einem Gummischlauch (a) verbundene Röhre geschoben, deren Mündung (m) sich oberhalb des Äthers befindet.

Wird durch eine mit dem Schlauche verbundene Saugvorrichtung Luft und Ätherdampf entfernt, so bringt die durch das Rohr (g) eindringende Luft den Äther zum raschen Verdunsten und kühlt das ganze Gefäß bis zum Taupunkt ab, sodafs sich auf dem Silber ein Niederschlag von Tau zeigt.



3. Das **Psychrometer**¹⁾ von *August* (Fig. 463) besteht aus 2 in Zehntel-Grade getheilten Thermometern; die Kugel des einen ist mit dünnem Zeuge überzogen, von welchem ein Docht in ein mit Wasser gefülltes Gefäß hinabreicht.

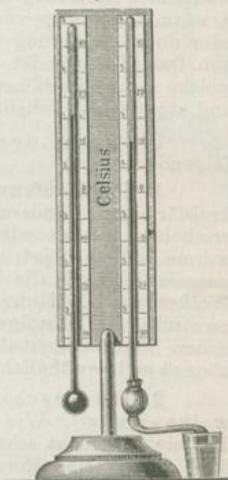
Ist die Luft mit Wasserdämpfen gesättigt, so zeigen beide Thermometer die gleiche Temperatur an. Ist die Luft nicht gesättigt, so verdunstet Wasser und zwar um so mehr, je trockener die Luft ist. Dadurch sinkt die Temperatur des befeuchteten Thermometers und aus dem Temperaturunterschied läßt sich nach besonderen Tabellen der Feuchtigkeitsgehalt und Taupunkt der Luft finden.

Atmosphärische Niederschläge. Die Form der atmosphärischen Niederschläge ist nach der Art ihrer Entstehung verschieden. Sinkt die Temperatur der Erdoberfläche bis unter den Taupunkt der untersten Luftschicht herab, so entsteht, je nachdem der Taupunkt über oder unter dem Gefrierpunkte liegt, **Tau** oder **Reif**, und zwar um so mehr, je größer die Wärmestrahlung und je feuchter die Luft ist.

Eine starke Ausstrahlung bei großem Dampfgehalte der Luft ist den Küstländern der heißen Zone eigentümlich. Dort ist daher die Taubildung am bedeutendsten, während da, wo die Luft sehr trocken ist (in Wüsten und Steppen), der Tau fehlt. An der Westküste von Peru ersetzt der Tau den beinahe ganz fehlenden Regen. Da durch die Kondensation des Wasserdampfes Wärme erzeugt wird (§ 120), so wirkt die Taubildung der weiteren Abkühlung des Bodens entgegen. Hieraus ergibt sich die praktische Regel, dafs im allgemeinen kein Nachtfrost zu erwarten ist, wenn der Taupunkt abends über 0° liegt.

Findet die Kondensation des Wasserdampfes nicht an den Gegenständen der Erdoberfläche, sondern frei in der Luft (oder auch an

Fig. 463.



¹⁾ ψυχρός (psychrós), kalt.

den Staubteilchen derselben) statt, so entstehen sehr kleine Wasserkügelchen, welche sich zu **Nebel** oder zu **Wolken** anhäufen.

Der im Frühling und Herbst häufig über Gewässern und Wiesengründen lagernde dichte *Nebel* entsteht dadurch, daß von dem wärmeren Wasser oder feuchten Boden Wasserdämpfe in die darüber liegende kühlere Luft aufsteigen und darin verdichtet werden. Ist die Erdoberfläche durch Strahlung genügend erkaltet, so kann eine Nebelbildung dadurch eintreten, daß wärmere feuchte Luft sich über derselben abkühlt. — *Wolken* entstehen namentlich durch die *Abkühlung*, welche mit der Ausdehnung aufsteigender feuchter Luft verbunden ist (vorwiegend in der Region der Kalmen, aber auch in den gemäßigten Zonen an heißen Sommertagen), oder durch *Mischung* feuchter Luftmengen von verschiedener Temperatur. Eine derartige Mischung wird stets eine Kondensation von Wasserdampf zur Folge haben, sobald die Luft dem Sättigungszustande nahe ist, was häufiger in den höheren Luftschichten der Fall sein wird.

Nach dem über die Vorgänge bei der Wolkenbildung Angeführten ist es erklärlich, daß dieselbe vorzugsweise in den oberen Schichten der Atmosphäre vor sich gehen muß und daß ein eigentlicher Unterschied zwischen *Nebel* und *Wolken* nicht gemacht werden kann: Der *Nebel* ist nichts als eine unmittelbar an der Erdoberfläche gebildete Wolke, während eine *Wolke*, von unten auf einem Berggipfel gesehen, dem Bergsteiger oben als *Nebel* erscheint. Bei der *Nebelbildung*, wie sie in großen Städten besonders im Winter häufig ist („*Londoner Nebel*“), spielen die der Luft beigemischten Staub- und Rußteilchen eine wesentliche Rolle.

Eine *Wolke* ist kein fertiges Gebilde, sie unterliegt vielmehr einer fortwährenden Auflösung und Umbildung, indem die bereits verdichteten Dämpfe durch Erwärmung (infolge von Strahlung oder Zusammenpressung) wieder gasförmig werden oder durch Berührung mit einem kälteren Gegenstande eine beständige Ausscheidung von Dampf stattfindet. Ein ausgezeichnetes Beispiel dieser Art bieten die *Wolken*, welche sich bei schönem Sommerwetter tagsüber an freistehenden Berggipfeln bilden und stundenlang scheinbar unbeweglich an denselben haften.

Die Form der *Wolken* ist sehr verschieden. Einige Hauptformen sind folgende:

1. Die *Haufenwolken* (*cumuli*), d. h. *Wolken* mit scharf begrenzten halbkreisförmigen Rändern auf ziemlich breiter Grundfläche. Übereinander getürmt erscheinen sie oft wie ferne Schneegebirge. Sie entstehen dadurch, daß feuchtwarme Luft aufsteigt, und sind daher in den tropischen Gegenden die häufigsten, in unseren Gegenden die besonders an heißen Sommertagen gewöhnlich vorkommenden *Wolkenformen*. Häufig gehen dieselben auch in *Gewitterwolken* über (*Gewittercumulus*, „*Champignonform*“), während sie als eigentliche *cumuli* (von den Seeleuten „*Baumwollenballen*“ genannt) als Vorboten guten Wetters angesehen werden können und gewöhnlich an der Rückseite barometrischer Minima auftreten (Seite 332).

2. Die geschichtete *Haufenwolke* (*cumulo-stratus*) und die *Regenwolke* (*nimbus*). Wie überhaupt die *Wolkenformen* so viele Zwischenstufen zeigen, daß sie sich nicht scharf trennen lassen, so geht auch die *Haufenwolke* häufig in diese zweite Hauptform über. Die *Regenwolken* sind dunkle, blauschwarze, bisweilen bis zur Erdoberfläche herabsinkende *Wolkenmassen* mit unbestimmten, unregelmäßigen Umrissen und bedecken gewöhnlich große Teile des Himmels.

3. Als *Schichtwolke* (*stratus*) bezeichnet man niedrige, dunkelgraue *Wolkenbänder*, welche nahe über dem Horizonte lagern.

4. Die *Federwolken* (*cirri*) sind langgestreckte, *Bändern* oder *Federn* ähnliche *Wolken*, die in bedeutender Höhe (3000—8000 m) am Himmel schweben. (Vorboten regnerischen Wetters, Seite 332.) Am Horizonte erscheinen sie rot gefärbt. Oft zerteilen sie sich in kleine, rundliche Häufchen und bilden dann die sogen. *Schäfchen*. Es ist anzunehmen, daß die *Federwolken* aus feinen *Eisnadeln* bestehen.

Tritt in den *Wolken* eine rasch fortschreitende *Abkühlung* ein, so entsteht bei einer Temperatur über 0° **Regen**, unter 0° **Schnee**. Durch die Häufigkeit und Menge der dem Boden zugeführten atm. Niederschläge

wird die Fruchtbarkeit eines Landes und der klimatische Charakter desselben wesentlich bedingt. Die Häufigkeit des Regens pflegt man durch die Anzahl der Tage anzugeben, an denen es innerhalb eines Monats oder Jahres in einer bestimmten Gegend geregnet oder geschneit hat. Als Regenhöhe bezeichnet man die Höhe, welche das Regenwasser oder das durch Schmelzen des Schnees entstehende Wasser auf dem Boden einnehmen würde, wenn durch Abfluß oder Verdunsten nichts verloren ginge.

Über die selteneren Niederschläge, welche für die Meteorologie von untergeordneter Bedeutung sind, wie Hagel, Graupeln u. s. w., siehe §§ 36 und 118.

Regenmesser (Fig. 464). Zur Messung des Regens und Schnees dienen Regenmesser, Blechgefäße, welche nahe über dem Boden frei aufgestellt werden und aus 2 aufeinander befestigten Cylindern mit trichterförmigem Boden bestehen. Der obere Cylinder dient zum Auffangen, der untere, durch einen Hahn verschließbare Cylinder zur Ansammlung des Wassers (oder aufgetauten Schnees). Das Wasser läßt man in ein Maßglas abfließen, an welchem man die Regenhöhe (nach cm gemessen) unmittelbar ablesen kann.

Fig. 464.



Die größte Regenmenge auf der Erde kommt da vor, wo täglich warme, dampferfüllte Luftmassen aufsteigen und sich in der Höhe abkühlen, oder wo hohe Gebirgsketten von feuchtwarmen Winden getroffen werden, da Gebirge die Winde zum Emporsteigen zwingen, wobei letztere sich abkühlen und somit Wasserdampf ausscheiden müssen. Infolgedessen haben Gebirgsketten eine stärkere Bewölkung und größere Regenmenge als ihre Umgebung, und besonders gilt dies von der den feuchten Winden zugewandten Seite (der sogen. Luvseite). Im mittleren Europa ist dies die SW-, W.- und NW-Seite und deshalb zeigen auch die Gebirge (z. B. Harz, Thüringerwald, Schwarzwald, Riesengebirge) auf dieser Seite eine stärkere Bewölkung und größere Niederschlagsmenge als auf der vom Winde abgewandten Seite (der Leeseite). Durch sehr hohe Gebirgswälle kann den Winden ihre Feuchtigkeit so vollständig entzogen werden, daß dahinterliegende Landstrecken regenlos bleiben und dadurch zu Wüsten werden (Wüste Gobi, Kalahari), während andererseits auch das beständige Wehen trockener Passatwinde den Wüstencharakter bedingen kann (Wüstengürtel von der Sahara bis nach Persien).

Man teilt die Erdoberfläche in bestimmte Regenzonen. In der Zone des beständigen Regens (Kalmenzone) finden fast ohne Ausnahme täglich, besonders nachmittags, heftige Regengüsse mit Gewitterbildung statt; nachts ist der Himmel wieder heiter.

In der Zone der Sommerregenzeiten (tropische Zone), die zu beiden Seiten des Kalmengürtels in den Gebieten der Passatwinde (ungefähr bis zum 15. Grade) liegt, giebt es zwei Regenzeiten, welche um so schneller aufeinander folgen, je weiter die Orte vom Äquator entfernt sind. Zu den Zeiten der beiden höchsten Sonnenstände weht nämlich der Passat nur sehr schwach, und es findet dann täglich morgens ein starkes Aufsteigen feuchtwarmer Luft statt, worauf ähnlich wie in der Kalmengegend Gewitterregen folgt. In der kurzen sommerlichen Zwischenzeit wird der Passat wieder etwas stärker und der Regen nimmt ab, während in der langen winterlichen Zwischenzeit der Passat ungeschwächt weht und keine Wolke am Himmel aufsteigt. Näher dem Wendekreis folgt eine einfache Sommerregenzzeit, da die Zenithstände der Sonne zeitlich näher zusammenliegen.

Die darauf folgende Zone des Winterregens (subtropische Zone, etwa bis zum 40. Grade) wird in ihrem südlichen Gebiete (z. B. Nordafrika, südlicher Teil von Portugal und Spanien, Unteritalien u. s. w.) im Winter von dem herabsinkenden

feuchten Äquatorialströme beherrscht, sodafs hier nur Winterregen entsteht. In den nördlichen Gebieten dieser Zone streift jener Wind die Länder zweimal, nämlich im Frühling und im Herbst. Infolgedessen bringen diese beiden Jahreszeiten dort den meisten Regen. Der Sommer ist in der ganzen subtropischen Zone trocken und der Himmel fast immer heiter, da dann nördliche Winde vorherrschen.

In der Zone der veränderlichen Niederschläge, in welcher wandernde Luftdruck-Minima und Maxima mit ihren Windsystemen das Wetter beherrschen, sind die Niederschläge gleichmäfsiger auf das ganze Jahr verteilt. In Europa erhalten die westlichen Küstenländer die meisten Niederschläge (bis 300 cm jährlich, am meisten Schottland und Norwegen) und zwar besonders im Herbst durch westliche Winde, während in den östlichen Ländern Europas der meiste Regen im Sommer durch aufsteigende Luftströme entsteht (am Ural nur 40 cm). In Deutschland nehmen die Niederschläge von W. nach O. zunächst ab, mit der Annäherung an die Gebirge jedoch wieder zu und an der östlichen Seite derselben wiederum ab. Für die klimatischen Verhältnisse Deutschlands und der Alpenländer sind folgende Zahlen bemerkenswert: Münster 69 cm, Berlin 59 cm, Posen 51 cm; — Hannover 57 cm, Brockengipfel mindestens 190 cm, Quedlinburg 55 cm, Gegend der unteren Saale unter 50 cm; — Leipzig 54 cm; München 81 cm, Salzburg 116 cm, Tolmezzo in den Dolomiten 244 cm. — Die Regenhäufigkeit ist in Deutschland am grössten im Harzgebirge und auf dem erzgebirgischen Plateau, am geringsten in einigen Gebieten des nördlichen Flachlandes (Gegend von Thorn, Riesa an der Elbe, Bernburg an der Saale).

In der kalten Zone wie auch in den Hochgebirgen wärmerer Klimate fällt anstatt des Regens vorwiegend Schnee, welcher sich im Gebirge zu gröfseren Massen ansammelt (Firn) und sich nach und nach in körniges Eis umwandelt (Gletscher, § 118).

Die Erfahrung hat gelehrt, dafs auch die Wälder für die klimatischen Verhältnisse eines Landes von grofszer Bedeutung sind. Waldungen verlangsamen das Eindringen und Abfliefsen der atm. Niederschläge und erhöhen dadurch die relative Luftfeuchtigkeit einer Gegend. Da bewaldete Flächen sich langsamer erwärmen und abkühlen als der kable Boden, so können in waldreichen Gegenden auch Temperaturoegensätze sich nicht in dem Mafse entwickeln wie in waldlosen Gegenden. Man kann daher die Wälder wie die Meere als klimatische Regulatoren bezeichnen.

Übungsstoff. 1. Wodurch werden in der Natur im grofsartigsten Mafse Temp.-Gegensätze gemildert? (Meer und Atm. zu berücksichtigen!) — 2. Wo sich Wolken bilden, mufs die Lufttemp. steigen; wie kann dadurch die Vergrößerung der Wolke zunächst gehemmt und ein Aufsteigen von Luft und Wolke bewirkt werden? — 3. Warum entstehen bei SW.-Wind in Deutschland im allgemeinen im Winter leichter Wolken als im Sommer? — 4. Erkläre die Abnahme der Niederschläge in Deutschland von W. nach O. — 5. Wie erklärt sich der Regenreichtum von Schottland und Norwegen? — 6. Durch den Südostpassat wird das nach den Anden hin ansteigende Gebiet der südlichen Nebenflüsse des Amazonenstromes mit in den Regengürtel der Kalmen hineingezogen. Erkl. — 7. Wie erklärt es sich, dafs ganz Vorderindien a. nur eine Hauptregenzeit hat, obgleich es in niederen Breiten der Passatregion liegt, b. eine bedeutend gröfsere Regenmenge hat, als sonst in jenen Breiten vorkommt? — 8. Im Himalaya wurde in etwa 1300 m Meereshöhe eine jährliche Regenmenge von 1420 cm gemessen. Erkläre die auffällige Gröfse dieser Niederschlagsmenge im Zusammenhange mit der Ersch., dafs die nördlich vom Himalaya gelegene Wüste Gobi fast regenlos ist! — 9. Warum kann beim Regensmesser (Fig. 464) von dem angesammelten W. nur äufserst wenig durch Verdunstung verloren gehen? — 10. Die obere Öffnung eines Regensmessers betrage $\frac{1}{10}$ qm, das darin an einem Tage angesammelte W. 20 ccm. a. Wv. mm beträgt dann die Regenhöhe? b. Wie mufs die Teilung des Mefsglases eingerichtet sein (auf wv. ccm mufs 1 Teilstrich kommen), wenn an demselben die wirkliche Regenmenge direkt abgelesen werden soll?

VI. Abschnitt.

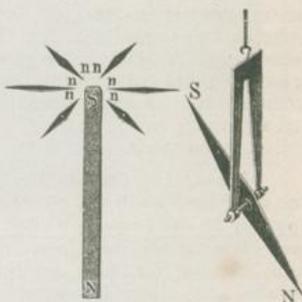
Vom Magnetismus.

(I. Lehrstufe, §§ 37—39.)

§ 131. Erdmagnetismus. Die Erscheinung, daß eine Kompaßnadel in ihrer Ruhelage nach Norden und Süden zeigt, ist im allgemeinen überall auf der Erde wahrzunehmen. Bei einer Reise um die Erde von Westen nach Osten (oder umgekehrt) würden daher die Stellungen der Kompaßnadel mit den Richtungen der Magnetnadeln in Fig. 465 eine gewisse Übereinstimmung zeigen. — Wird eine Magnetnadel so aufgehängt, daß sie sich um eine durch ihren Schwerpunkt gehende Achse in senkrechter Ebene drehen kann (Fig. 466), so neigt sich der Nordpol stark abwärts, auch wenn man die zur Aufhängung der Nadel dienende Schere mit der Nadel um 180° dreht. (Versuch.)

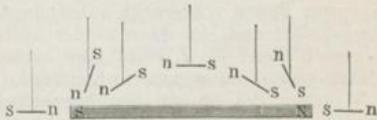
Fig. 465.

Fig. 466.



Beobachtungen an Orten verschiedener geogr. Breite lehren, daß eine derartige Magnetnadel in der Äquatorgegend wagerecht steht, sich aber um so mehr neigt, je weiter man sich vom Äquator entfernt, wobei auf der nördlichen Halbkugel der Nordpol, auf der südlichen der Südpol abwärts gerichtet ist. (Vergl. den durch Fig. 467 veranschaulichten Versuch.)

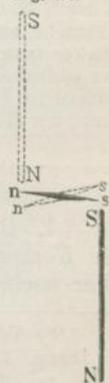
Fig. 467.



Die Erde muß demnach, da sie der Magnetnadel eine bestimmte Richtung erteilt, als ein großer Magnet angesehen werden. Ihre magnetische Kraft ist auch geeignet, im Eisen Magnetismus hervorzurufen.

Versuch. 1. Untersucht man Eisenstäbe, welche längere Zeit aufrecht gestanden haben (z. B. Fensterstangen), so erweist sich das untere Ende derselben als nord-, das obere als südmagnetisch. 2. Ein Stab aus weichem Eisen bleibt unmagnetisch, so lange derselbe wagerecht von O. nach W. gerichtet ist, hält man ihn aber senkrecht oder schräg abwärts nach N., so verwandelt sich das untere Ende in einen Nordpol, das obere Ende in einen Südpol (Fig. 468). In seine ursprüngliche Lage zurückgebracht, zeigt er sich wieder unmagnetisch. 3. Ein Schlüssel aus weichem Eisen von etwa 8—10 cm Länge wird dem

Fig. 468.



Nordpol einer leicht beweglichen Kompaßnadel mit dem Bartende genähert und dann in wagerechter Lage seitlich verschoben; er wirkt als weiches Eisen anziehend. Bringt man aber Schlüssel und Magnetnadel wieder in die NS.-Richtung und richtet den Schlüssel auf, so wird der Nordpol der Nadel sofort abgestoßen.*)

Aus diesen Erscheinungen folgt:

Die Erde wirkt wie ein Magnet, und zwar ist die nördliche Halbkugel derselben süd magnetisch, die südliche nord magnetisch.

Die magnetischen Eigenschaften der Erde wurden zuerst von Gilbert (um 1600) beobachtet. Im Jahre 1831 wurde vom Kapitän Rofs auf der Halbinsel Boothia Felix in 70° nördl. Br. zwischen Nordamerika und dem geogr. Nordpol der magnetische Südpol der Erde entdeckt. Die Inklinationsnadel stand hier senkrecht und war mit dem Nordpole nach unten gerichtet. Beim Umfahren des Poles zeigte die Deklinationsnadel immer nach denselben Punkte. Den magnetischen Nordpol der Erde hat man bis jetzt noch nicht erreicht, aber durch Berechnung hat man gefunden, daß derselbe in etwa 73° südl. Br. auf dem Südpolarlande zwischen Neuholland und dem geographischen Südpole liegen muß.

Bem. Die übliche Ausdrucksweise, nach welcher man den nach N. zeigenden Pol der Nadel als Nordpol bezeichnet, nötigt uns dazu, den auf der Nordhälfte der Erde gelegenen Pol als magnetischen Südpol anzusehen, da er nach dem Gesetz der Polarität (§ 38) den entgegengesetzten Magnetismus haben muß, als das Nordende der Nadel. Um alle Schwierigkeiten und Verwechslungen, die sich aus dieser Bezeichnung ergeben können, zu vermeiden, wäre es am einfachsten, den nach Norden zeigenden Pol der Nadel den nordsuchenden Pol zu nennen und den anderen den südsuchenden Pol.**) Die Franzosen nennen den nach N. zeigenden Pol der Nadel einfach den Südpol.

Übungsstoff. 1. Ein unmagn. Stahlstab (z. B. eine Stricknadel) werde an einem Faden wagerecht aufgehängt. Was wird eintreten, wenn man den Stab magnetisiert und ihn dann wieder aufhängt, ohne den Befestigungspunkt des Fadens zu verschieben? — 2. Wird eine horizontal hängende Magnetnadel bis zum Glühen erhitzt und dann wieder aufgehängt, so hängt sie schief. Was folgt daraus? — 3. Welchen Pol mußte das herabhängende Ende vorher bilden? — 4. Wie muß eine in ihrem Schwerpunkt aufgehängte Nadel ihre Stellung ändern, wenn man sie wiederholt um 90° so dreht, daß ihre Schwingungsebene a. von O. nach W., b. von S. nach N. u. s. w. gerichtet ist? — 5. Ein Feuerhaken (Schüreisen) zeigt bei einem Versuche nach Fig. 468 Pole von ungleicher Stärke. Welches Ende desselben wird stärker magnetisch? — 6. Was würde ein nach Fig. 468 angestellter Versuch auf der südlichen Erdhälfte ergeben? — 7. Warum muß man annehmen, daß der magn. Südpol in der Nähe des geogr. Nordpols liegt, wenn man das nach N. zeigende Ende der Kompaßnadel einen Nordpol nennt?

§ 132. Erdmagnetismus.

1. Deklination. Nur an wenigen Orten der Erdoberfläche zeigt die Kompaßnadel genau nach N. und S., sie weicht vielmehr nach O. oder nach W. ab. *Der Winkel, um welchen die Magnetnadel in ihrer*

*) Vergl. „Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht“, V. Jahrg. 1. Heft. Berlin 1891.

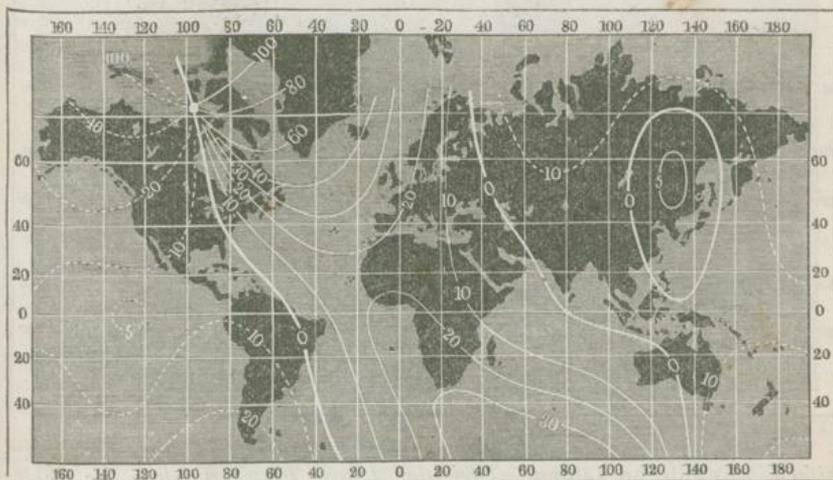
**) Vergl. Thompson, Vorlesungen über Magnetismus und Elektrizität. Deutsche Übersetzung von Dr. Himstedt. Tübingen 1887.

Ruhelage von der astronomischen Nordsüdrichtung abweicht, wird magnetische Deklination¹⁾ (*magnetische Abweichung*) genannt.

Denkt man sich durch die Achse einer ruhenden Deklinationsnadel eine senkrechte Ebene gelegt, so bildet diese den magnetischen Meridian des betreffenden Ortes. Die magnetische Deklination ist demnach der Winkel, den der magnetische und geographische Meridian eines Ortes bilden.

Die magnetische Deklination ist an verschiedenen Orten der Erdoberfläche verschieden (Fig. 469). Fast in ganz

Deklinationkarte für das Jahr 1860. (Fig. 469.)



Europa (mit Ausnahme eines kleinen Teiles vom östlichen Rußland) weicht der Nordpol der Nadel nach W. ab und zwar nimmt die Deklination nach den Westküsten hin zu. In Berlin beträgt dieselbe gegenwärtig etwa $10\frac{1}{2}^{\circ}$ und die jährliche Abnahme $7'$.

Um die Größe und Richtung der magn. Deklination für die verschiedenen Orte der Erde übersichtlich darzustellen, hat man Karten hergestellt, auf denen die Orte gleicher Deklination durch Linien miteinander verbunden sind. Letztere werden isogonische²⁾ Linien genannt (Fig. 469)

Bem. In Fig. 469 bezeichnen die stark ausgezogenen Linien die Orte ohne Deklination, die fein ausgezogenen Orte mit westlicher, die punktierten Orte mit östlicher Deklination. Die beigefügten Zahlen geben die Größe der Deklination an.

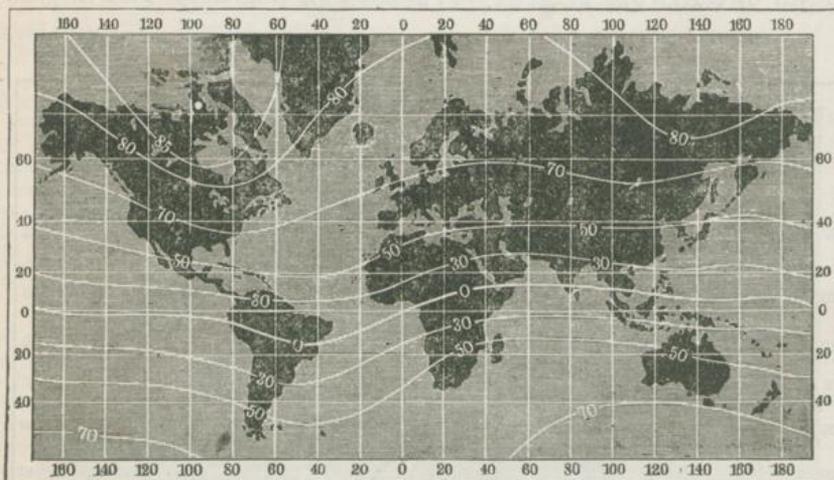
2. Inklination. Eine in ihrem Schwerpunkte aufgehängte Magnetnadel, welche in einer senkrechten Ebene schwingen kann, neigt sich auf der Nordhalbkugel der Erde mit ihrem Nordpol abwärts (Fig. 468). Der Winkel, um welchen die Nadel in der Ruhelage von der wagerechten Richtung abweicht, wird magnetische Inklination³⁾ (*magnetische Neigung*) genannt.

1) declinare, abweichen. — 2) ἴσος (isos), gleich); γωνία (gōnia), Winkel.

3) κλίνω (klino), neige.

Die Inklination ist auf einer in der Nähe des Äquators gelegenen Linie gleich Null und wächst auf beiden Erdhälften nach den magnetischen Polen hin bis 90° . (In Berlin beträgt sie gegenwärtig ungefähr 66° .) Die Verteilung der Inklination auf der Erdoberfläche wird veranschaulicht, indem man auf einer Karte die Orte gleicher Inklination durch Linien verbindet (Inklinationskarte, Fig. 470).

Inklinationskarte für das Jahr 1860. (Fig. 470.)



Die Linien, welche Orte gleicher Inklination miteinander verbinden, heißen isoklinische Linien. Diejenige Linie, längs welcher die Inklination gleich Null ist und die Inklinationsnadel mithin wagerecht steht, wird magnetischer Äquator genannt. Derselbe verläuft teils auf der nördlichen, teils auf der südlichen Erdhalbkugel und entfernt sich vom geographischen Äquator bis 10° nördl. und 15° südl. Breite.

3. Intensität. Durch die Größe der magn. Deklination und Inklination für einen Ort ist zwar die Richtung, nicht aber die Größe der magn. Kraft der Erde für diesen Ort bestimmt. Letztere, welche man die Intensität¹⁾ des Erdmagnetismus nennt, läßt sich dadurch ermitteln, daß man eine und dieselbe Magnetnadel an verschiedenen Orten der Erde schwingen läßt und die Anzahl der Schwingungen bestimmt, welche die Nadel in gleichen Zeiten ausführt. Wie beim Pendel, so verhalten sich auch bei der Magnetnadel die Kräfte, welche die schwingende Bewegung hervorrufen, wie die Quadrate der Schwingungszahlen (Seite 185), mithin ergeben die Schwingungen der Inklinationsnadel an verschiedenen Orten die Größe der magnetischen Gesamtkraft ohne weiteres nach der Proportion $J : J = n^2 : n_1^2$. †)

1) Intensität = innere Stärke, von intendere, ausdehnen, spannen.

†) Auf die Schwingungen der Deklinationsnadel wirkt nur die horizontale Seitenkraft der erdmagnetischen Kraft ein, dieselben geben somit die Größe der letzteren nicht unmittelbar an; sie lassen jedoch in einfacher Weise eine Be-

Auf diese Weise hat man gefunden, daß die Intensität des Erdmagnetismus nicht überall dieselbe ist. Sie ist am kleinsten am magn. Äquator und nimmt gegen die magn. Pole hin zu; die Punkte der stärksten Anziehung fallen jedoch nicht mit den Polen zusammen.

Linien, welche Orte gleicher Intensität des Erdmagnetismus miteinander verbinden, heißen isodynamische Linien.

4. Variationen. Der magnetische Zustand der Erde unterliegt regelmäßigen periodischen Änderungen: *Variationen des Erdmagnetismus.* Im größten Teile Deutschlands zeigte die Deklinationsnadel vor ungefähr 200 Jahren genau nach N.; vor jener Zeit war die Deklination eine östliche, nachher wurde sie eine westliche. Aus früherer Zeit fehlen genaue Beobachtungen. Die westliche Deklination nahm bis vor ungefähr 60 Jahren zu und nimmt gegenwärtig wieder ab (für Paris betrug die Deklination 1663 00, 1814 war sie am größten, nämlich gleich 22° 35'). Die Inklination ist in Deutschland schon seit etwa 100 Jahren im Abnehmen. Ältere Beobachtungen fehlen ebenfalls. Über die Veränderungen der Intensität des Erdmagnetismus hat man erst in neuester Zeit regelmäßige Beobachtungen angestellt.

Außer diesen größeren Änderungen der Deklination und Inklination, welche sich erst nach vielen Jahren wiederholen und deshalb säkulare Änderungen heißen, sind auch noch jährliche und tägliche regelmäßige Schwankungen der Magnetnadel zu beobachten.

Die täglichen Schwankungen betragen nur wenige Bogenminuten und sind höchstwahrscheinlich von der täglichen Bewegung der Sonne und von der Wärmestrahlung abhängig.

Die jährlichen Änderungen im magnetischen Zustande entsprechen der Bewegung der Erde um die Sonne, indem die Inklination mit der Annäherung der Erde an die Sonne (vom Dezember bis Februar) zunimmt.

Auf eine Abhängigkeit von der Sonne deutet auch die merkwürdige Übereinstimmung der Magnetnadelsschwankungen mit der elfjährigen Periode der Sonnenflecken hin. Diese Sonnenfleckenperiode ist in den täglichen Schwankungen der Magnetnadel so deutlich wiederzuerkennen, daß man die letzteren aus der Zahl der Sonnenflecken bis auf Bruchteile der Minuten berechnen kann.

Bisweilen werden auf einem großen Teile der Erde und zwar gleichzeitig an den entlegensten Orten magnetische Störungen wahrgenommen, welche darin bestehen, daß die Magnetnadel ruckweise ihre Lage ändert. Diese Erscheinungen treten häufig mit Erdbeben und vulkanischen Ausbrüchen zugleich auf, insbesondere aber zeigen sie einen Zusammenhang mit den Polarlichtern, die man deshalb geradezu „magnetische Gewitter“ genannt hat.

Übungsstoff. 1. In welchen Erdteilen giebt es nach Fig. 469 Orte, an denen die Dekl.-Nadel genau nach N. zeigt? — 2. Wo zeigt sich in der gegenseitigen Lage der Orte ohne Abweichung eine auffällige Ersch.? — 3. In welchen Erdteilen ist die Abweichung eine westliche und in welchen eine östliche? — 4. Nenne Gegenden der nördlichen Erdhälfte, in denen der Nordpol der Magnetnadel aus der nördlichen Richtung in eine südliche übergeht. — 5. Welche Richtungsänderung erleidet die Nadel des Schiffskompasses auf einer Reise von Hamburg durch den Kanal, den atlantischen Ocean, bis zur Westküste von Südamerika? (Columbus passierte 1492 die Linie ohne Abweichung.) — 6. Welches ist die Hauptrichtung der isokl. Linien, und wo weichen sie von den Parallelkreisen am meisten

rechnung derselben zu. Bezeichnen n und n_1 die Schwingungszahlen für eine und dieselbe Deklinationsnadel an 2 verschiedenen Orten, so erhält man, wenn die Inklinationwinkel w und w_1 für diese Orte ermittelt sind, die Proportion:

$$J \cos w : J_1 \cos w_1 = n^2 : n_1^2, \quad \text{folglich: } J : J_1 = \frac{n^2}{\cos w} : \frac{n_1^2}{\cos w_1}.$$

ab? — 7. Vergl. die Richtung des magn. mit der des geogr. Äquators. — 8. An welchen Punkten der Erde ist sowohl die magn. Deklination als auch die Inklination gleich Null? — 9. Welche Ersch. würde eine Inklinationsnadel auf der in Frage 5. angegebenen Reise zeigen?

§ 133. Abnahme der magnetischen Wirkung mit der Entfernung. Diamagnetismus. Molekularmagnete.

Wie die Stärke des Erdmagnetismus, so läßt sich auch die anziehende und abstofsende Kraft eines Magnetpoles nach der Anzahl der Schwingungen einer Magnetnadel bestimmen.

Versuch. Läßt man eine kleine Deklinationsnadel zunächst nur unter dem Einfluß des Erdmagnetismus und darauf auch unter der Einwirkung eines in der Schwingungsebene der Nadel befindlichen Magnetpols (vergl. Fig. 468) in 2 verschiedenen Abständen kurze Zeit schwingen, so ergibt sich: 1) daß die Zahl der Schwingungen mit der Annäherung des Magnetpoles wächst, 2) daß die Quadrate der beiden Schwingungszahlen, nachdem man die Wirkung des Erdmagnetismus in Abzug gebracht hat, sich umgekehrt verhalten wie die Quadrate der Abstände vom Magnetpole bis zur Mitte der Nadel. (Damit nur ein Pol auf die Nadel einwirken kann, ist ein ziemlich langer Magnetstab anzuwenden.)

Beispiel: Die Schwingungszahlen für 1 Min. seien 15, 24 und 41, und zwar: 15 unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus, 24 und 41 bei Anwendung eines Magnets, wenn die Abstände von demselben nacheinander 20 und 10 cm betragen. Es verhält sich $(24^2 - 15^2)$ zu $(41^2 - 15^2)$ wie 1 zu 4 (annähernd). Da nun die Kräfte, welche die schwingende Bewegung hervorrufen, den Quadraten der Schwingungszahlen proportional sind, so führen derartige Versuche zu dem Gesetze:

Die Wirkung eines Magnetpoles nimmt in demselben Verhältnis ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt.

In 2-, 3-, 4-... mal so großem Abstände ist die Wirkung eines Magnetpoles nur $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{16}$... so stark als in der einfachen Entfernung.

Dasselbe Gesetz gilt für die *el. Anziehung* und *Abstofung*. Es wird nach *Coulomb*, der es (1785) auffand und auch noch in anderer Weise bewies (mittelst der Drehwage, vergl. § 56), das *Coulombsche Gesetz* genannt.

Diamagnetismus. Nach den bisherigen Betrachtungen über Magnetismus könnte es scheinen, als ob die magn. Kraft nur auf Eisen und Stahl eine Wirkung ausübte. Dies ist jedoch keineswegs der Fall, wie mit Hilfe sehr kräftiger Magnete (Elektromagnete, vergl. § 140) nachgewiesen werden kann.

Untersucht man das Verhalten der Körper gegen Magnetpole mittelst eines solchen starken Magnets, so ergibt sich, daß auch Körper, welche nicht aus Eisen oder Stahl bestehen, der Einwirkung der magnetischen Kraft unterliegen. Von den Metallen werden z. B., wengleich bedeutend schwächer als Eisen und Stahl, *Nickel*, *Kobalt* und *Platin* von beiden Polen eines Magnets angezogen; *Wismut*, *Antimon*, *Gold*, *Silber*, *Kupfer*, *Zink*, *Blei*, *Quecksilber* u. a. werden von beiden Polen abgestofsen. Auch an zahlreichen nicht metallischen festen, flüssigen und luftförmigen Körpern hat man entweder Anziehung oder Abstofung beobachtet. So werden z. B. *Graphit*, *Eisenlösungen* und

Sauerstoff angezogen, Schwefel, Phosphor, Wasser und Wasserstoff dagegen abgestoßen.

Körper, welche von einem Magnet angezogen werden, ohne selbst Magnetismus zu besitzen, nennt man paramagnetisch; Körper, welche abgestoßen werden, heißen diamagnetisch.

Die Unterscheidung von paramagnetischen und diamagnetischen Körpern ist von Faraday eingeführt worden, der (1845) die magnetischen Eigenschaften einer großen Anzahl von Körpern untersuchte. Die festen Körper hing er in Form kleiner Stäbchen an einem Faden leicht beweglich zwischen den Polen eines Elektromagnets auf, die Flüssigkeiten wurden in einem Uhrgläschen zwischen die Pole gebracht (Fig. 471 zeigt das diamagnetische Verhalten des Wassers), die Gase in Glasröhrchen oder Glaskugeln eingeschlossen.

Fig. 471.



Molekularmagnete. Versuch 1. Bricht man einen Magnetstab in der Mitte durch und setzt die Teilung in dieser Weise fort, so bleibt jedes Stück ein vollständiger Magnet (Fig. 472). —

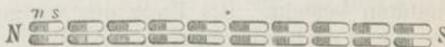
Fig. 472.

2. Wird eine Glasröhre mit Stahlfeilspänen gefüllt und darauf magnetisiert, so bildet sie einen vollständigen Magnet, dessen Magnetismus wieder verschwindet, wenn man die Feilspäne durcheinander schüttelt.



Diese Erscheinungen haben zu der Annahme geführt, daß die Massenteilchen (Moleküle) des gewöhnlichen Eisens wie jedes anderen magnetisierbaren Körpers von Natur Magnete (Molekularmagnete) bilden, welche im unmagnetischen Zustande alle denkbaren Lagen gegeneinander einnehmen, unter der Einwirkung eines Magnets aber sich so drehen, daß die gleichnamigen Pole nach derselben Seite gerichtet sind (Fig. 473).

Fig. 473.



Hiernach kann man sich vorstellen, daß die Moleküle des Stahles schwerer drehbar sind und auch schwerer wieder in die regellose Lage zurückkehren, als die Moleküle des Eisens. Ein Stab ist um so stärker magnetisiert, je mehr Moleküle die polare Richtung angenommen haben. In der Mitte heben sich die Wirkungen nach außen auf, da auf beiden Seiten gleichviele Nord- und Südpole aus gleicher Entfernung wirken, während dem einen Ende sämtliche Nordpole, dem anderen sämtliche Südpole näher liegen. Nach dieser Theorie ist es erklärlich, daß ein Magnet von seinem Magnetismus nichts verliert, wenn man ihn zum Magnetisieren verwendet, daß mit dem Magnetisieren eine Wärmeentwicklung verbunden ist und daß dasselbe die Wärmeleitfähigkeit des betreffenden Metalles ändert.

Bem. Über die Ampèresche Theorie des Magnetismus vergl. § 140.

Übungsstoff. 1. Warum mußte der Magnetpol bei dem obigen Versuche in der Schwingungsebene der Nadel liegen? — 2. Man will mit Hilfe des Horizontalpendels (Fig. 139) und einer isolierten Messingkugel einen dem obigen Versuche entsprechenden el. Versuch anstellen. Wie ist dies auszuführen? — 3. Welchen Einfluß muß es auf die Schnelligkeit, mit welcher die Magnetnadel (Fig. 468) schwingt, ausüben, wenn der Eisenstab durch einen Magnetstab ersetzt und dieser mehr und mehr genähert wird? — 4. Wie kann man bewirken, daß eine Magnetnadel unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus schneller oder langsamer

schwingt? — 5. Eine Magnetnadel mache zunächst 30 Schwingungen in 1 Min.; nachdem sie von neuem magnetisiert worden, betrage die Schwingungszahl 40. Wievielmals so stark ist der Magnetismus der Nadel geworden? — 6. Eine Dekl.-Nadel mache an einem Orte 40, an einem anderen 60 Schwingungen in 1 Min. Wie verhalten sich die magnetischen Kräfte zu einander, welche auf die Nadel einwirken? — 7. Wie verhält sich der auf die Dekl.-Nadel einwirkende Teil des Erdmagnetismus zu der Wirkung eines Magnetpoles, vor welchem eine Magnetnadel 90 Schwingungen in 1 Min. ausführt, wenn die Nadel ohne Magnet in 1 Min. 40 Schwingungen macht; — 8. Welche Lage werden Stäbchen von Eisen, Nickel, Wismut oder Kupfer annehmen, wenn man sie zwischen den Polen eines starken Magnets (Elektromagnets) leicht beweglich aufhängt? — 9. Wie lassen sich nach der Annahme von „Molekularmagneten“ die Erschn. der magn. Verteilung (§ 38) erklären?

VII. Abschnitt.

Die Lehre von der Elektrizität.

A. Reibungs-Elektrizität.

(I. Lehrstufe, §§ 40—49.)

B. Berührungs-Elektrizität oder Galvanismus.

§ 134. Grundversuche. Die Erscheinungen der elektrischen Verteilung (Influenz, § 43) nötigen zu der Annahme, daß die Elektrisierung eines Körpers in einer Trennung der in ihm vorhandenen Elektrizitäten besteht. Bis Ende des vorigen Jahrhunderts kannte man nur die Reibung als eigentliches Mittel zu einer solchen Trennung der Elektrizitäten. Da fand *Volta*, daß man leitende Körper auch ohne Reibung in den elektrischen Zustand versetzen könne, weil die bloße Berührung zweier Metalle mit einem feuchten Leiter (Säure oder Salzlösung) eine Elektrizitätsquelle sei. Die auf diese Weise erzeugte Elektrizität nennt man seitdem **Berührungselektrizität** oder auch **galvanische Elektrizität**, da *Volta* durch einen Versuch *Galvanis* zu seinen Untersuchungen angeregt worden war.

Fig. 474 stellt eine zur Erzeugung galv. E. geeignete Vorrichtung dar, ein sogen. **galvanisches Element**. Die beiden Metalle, Zink (Z) und Kupfer (K), sind

Fig. 474.

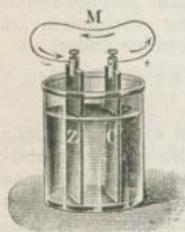
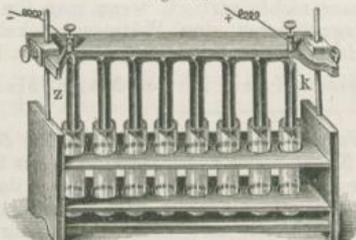


Fig. 475.



in verdünnte Schwefelsäure eingetaucht und durch einen Leitungsdraht (M) verbunden. Kräftigere Wirkungen erzielt man durch eine **galvanische Batterie** oder **galvanische Kette**, d. h. eine Zusammenstellung von Elementen derart, daß immer die Zinkplatte des einen mit der Kupferplatte des nächsten verbunden ist (Fig. 475). Die beiden

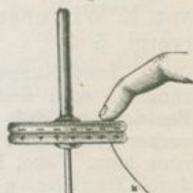
freistehenden Endplatten heißen die **Pole** der Batterie. Werden dieselben durch einen Leitungsdraht (Schließungsbogen) verbunden, so heißt die Batterie geschlossen (im anderen Falle offen).

Statt der Kupferplatten verwendet man auch harte Kohle (sogen. Gaskohle) und als Erregungsflüssigkeit Chromsäure.

Nachweis der Berührungs-Elektricität.

Versuch a. Ist einer der beiden Enddrähte einer galv. Batterie mit der Erde leitend verbunden, so läßt sich mit Hülfe eines Voltaschen Kondensators durch den anderen Draht ein *Ausschlag der Blättchen* eines Elektroskopes bewirken, indem man nach Fig. 476 verfährt und, nachdem man die Kondensatorplatten einen Augenblick berührt hat, die obere abhebt.

Fig. 476.



Die Elektricität der Blättchen erweist sich als positiv, wenn dieselben mit dem von der Kupfer- oder Kohlenplatte herkommenden Drahte verbunden werden, während der mit dem Zinkpol verbundene Draht negative E. liefert. Legt man beide Drähte gleichzeitig an die Kondensatorplatten, so nehmen diese ebenfalls eine el. Ladung an, wie sich auch durch ihre Einwirkung auf ein el. Pendel nachweisen läßt.

Versuch b. Hält man den Schließungsdraht nahe über oder unter eine Magnetonadel in einer der Nadel parallelen Richtung, so beobachtet man eine *Ablenkung der Nadel*.

Versuch c. Schaltet man zwischen den beiden Polen der Batterie einen umsponnenen und schraubenförmig gewundenen Kupferdraht ein, in dessen Windungen ein Eisenstäbchen liegt, so nimmt letzteres *magnetische Eigenschaften* an (vergl. Fig. 173).

Zur Hervorrufung dieser magnetischen Erscheinungen genügt ein einzelnes Plattenpaar.

Versuch d. Wird an jedem der beiden Polen ein zugespitztes Stückchen Coaks oder harter Gaskohle befestigt, so ist bei Berührung der Kohlenspitzen ein kleiner, *hell leuchtender Funke* wahrnehmbar. Die Kohlenstäbchen selbst werden heiß.

Versuch e. Taucht man die beiden Drahtenden, ohne daß sie sich berühren, in Gläschen mit verdünnter Schwefelsäure, so sieht man nach einiger Zeit an dem einen Drahte eine *Entwicklung von Gasbläschen*, während der andere Draht eine hellere Färbung annimmt und sich an seiner Oberfläche verändert. Der Versuch läßt erkennen, daß die Elektricität in der Säure eine *chemische Zersetzung* hervorbringt.

Diese Wirkung, sowie die *Licht- und Wärmewirkung* beim vorhergehenden Versuche ist indes nur dann kräftig und leicht erkennbar, wenn die Batterie eine genügende Anzahl von Plattenpaaren vereinigt.

Eine Vergleichung der Wirkungen der Berührungselektricität mit denen der Reibungselektricität zeigt bemerkenswerte Verschiedenheiten beider. Anziehung und Abstofsung leichter Körper ist durch die letztere sehr leicht hervorzurufen; um dagegen mittelst galvanischer E. eine bemerkbare, wenn auch nur ganz schwache Anziehung oder Abstofsung

lin.;
40.
ekl.-
Wie
ein-
Erde-
adel
Min.
ekel,
cken
nach
38)

hen
tri-
lek-
nur
der
hne
ofse
alz-
lek-
che
ter-

ung
(Z)
sind
efel-
und
ags-
len.
gen
eine
erie
tte,
en-
mit
den

hervorzubringen, ist ein Kondensator zu Hilfe zu nehmen. Während die Wirkung verhältnismäßig schwacher Entladungen von Reibungs-E. auf den menschlichen Körper recht empfindlich sein kann, bedarf es größerer Mengen von galv. E. oder besonderer Bedingungen ihrer Einwirkung, ehe sich dieselbe durch eine Nervenreizung äußert (physiologische Wirkung). Auch das Überspringen eines Funkens an der Unterbrechungsstelle erfolgt leichter und auf größere Entfernung durch Reibungs-E., dagegen sind die magnetischen und chemischen Wirkungen der Berührungs-E. weit kräftiger als die der Reibungs-E.

Trotz dieser und noch anderer Verschiedenheiten zeigen beide Arten von E. Wirkungen, die in den wesentlichen Bedingungen übereinstimmen (vergl. § 48).

Ihren Namen galvanische Elektrizität (Galvanismus) hat die Berührungs-E. nach dem italienischen Arzte *Galvani* erhalten. Dieser machte 1789 die Beobachtung, daß der an einem kupfernen Haken aufgehängte Schenkel eines kurz vorher getöteten Frosches zuckte, wenn er mit einem eisernen Geländer in Berührung kam. *Volta*, Professor in Pavia, fand den Grund dieser Erscheinung darin, daß durch Berührung der Metalle E. erregt werde. Die von ihm (1800) zur Hervorbringung starker el. Wirkungen erfundene Vorrichtung bestand aus zahlreichen, aufeinander geschichteten Doppelplatten von Kupfer und Zink, welche durch angefeuchtete Tuchlappchen voneinander getrennt waren: Voltasche Säule.

Eine aus galv. Elementen zusammengesetzte Batterie von Zink- und Kupferplatten in verdünnter Schwefelsäure wird Voltasche Batterie genannt (Fig. 475).

Bem. In den folgenden Paragraphen ist nur auf die zwischen Flüssigkeiten und festen Leitern stattfindende E.-Erregung Rücksicht genommen.

Übungsstoff. 1. Warum muß die isolierende Schicht des Kondensators, wenn man mit demselben die Berührungs-E. nachweisen will, bedeutend dünner sein, als es für Reibungs-E. erforderlich wäre? — 2. Mit welchen Teilen der Elektrisiermaschine lassen sich die Pole einer galv. Batterie vergleichen? — 3. Was hat bei beiden a. die Einschaltung eines guten Leiters, b. die leitende Verbindung mit der Erde zur Folge? — 4. Angenommen, bei Versuch a dieses Paragraphen hätte man nicht die untere, sondern die obere Platte des Kondensators mit einem Poldrahte der Batterie verbunden und die untere Platte ableitend berührt: welchen Einfluß würde dies auf das Ergebnis des Versuches ausüben? (Zeichnung!) — 5. Durch die Kraft einer abgeschossenen Kugel läßt sich eine offene Thür nicht schließen, wohl aber durch einen leichten, andauernden Druck mit dem Finger. Inwiefern läßt sich dies mit dem Durchschlagen von Glas (Fig. 175) und der Ablenkung der Magnetnadel durch E. vergleichen? — 6. Man kann die Wirkung der Reibungs-E. mit dem Sturz eines Wasserfalles, die der Berührungs-E. dagegen mit der Strömung eines ruhig fließenden Gewässers vergleichen. Inwiefern?

§ 135. Elektrischer Zustand. Elektromotorische Kraft. Galvanischer Strom. Über die Elektrizitätserregung, welche bei der Berührung von Metallen und Flüssigkeiten stattfindet, sind unter Anwendung sehr empfindlicher Elektrometer äußerst sorgfältige Untersuchungen angestellt worden. Dieselben haben folgendes ergeben:

a. Wird ein Kupfer- oder ein Zinkstreifen in verdünnte Schwefelsäure getaucht, so läßt sich an dem freien Teile des Metalles — E., in der Flüssigkeit + E. von gleicher Spannung nachweisen; bei der Einwirkung der Säure auf Zink ist jedoch die Spannung 10 mal so groß als bei der Einwirkung auf Kupfer.

b. Taucht man beide Metalle, ohne daß sie sich berühren, zugleich in die Flüssigkeit (Fig. 477), so ist nur noch das Zink — el., während das Kupfer die + E. der Flüssigkeit angenommen hat; die Spannungen sind einander gleich, aber um soviel schwächer, als vorher die Spannung der E. des Kupfers allein betrug. Dies erklärt sich dadurch, daß die an den Berührungsflächen erregten Elektricitäten durch die elektricitätserregende Kraft nach entgegengesetzten Richtungen getrieben werden, also vom — el. Kupfer aus die schwache + E. nach dem Zink, vom — el. Zink aus die 10 mal so starke + E. der Flüssigkeit nach dem Kupfer. Infolgedessen gleichen sich in beiden Metallen gleiche Mengen entgegengesetzter Elektricitäten aus und die Spannung nimmt um ebensoviel ab, als die Spannung der schwächeren E. allein betragen haben würde. Es ist also geradeso, als ob nur durch die Einwirkung der Säure auf das am leichtesten auflösbare Metall (Zink) E. erregt würde und das Kupfer lediglich dazu diente, die + E. der Säure weiter zu leiten. Ähnliches gilt auch von allen anderen galv. Elementen.

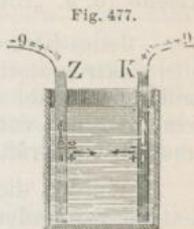
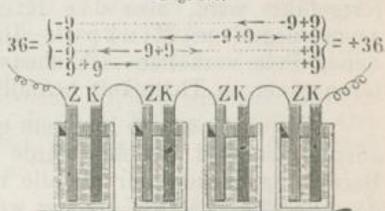


Fig. 478.



Werden mehrere galv. Elemente so zu einer Batterie zusammengesetzt, daß die ungleichnamigen Metalle je zweier benachbarten Elemente leitend verbunden sind (Fig. 475 und 478), so ist die el. Spannung soviel mal so groß als die eines einzelnen Elementes, als die Zahl der Elemente beträgt (von Widerständen [§ 137] abgesehen).

Die Spannung der galvanischen E. hängt von der Natur der E.s-Erreger ab und wächst mit der Zahl der ungleichnamig verbundenen Elemente; sie ist aber unabhängig von der Größe der Erregungsflächen.

Durch verdünnte Schwefelsäure als Erregungsflüssigkeit werden auch andere darin auflösbare Leiter im allgemeinen ebenso wie Zink — el., aber um so schwächer, je weniger sie von der Säure aufgelöst werden. Nach der Stärke der durch sie bewirkten el. Spannung hat man sie in folgende Reihe (*Spannungsreihe*) geordnet: Zink, Eisen, Zinn, Blei, Aluminium, Nickel, Antimon, Wismut, Kupfer, Silber, Platin. In dieser Reihe wird Zink durch die Säure am stärksten, Platin am schwächsten el., die übrigen Glieder um so schwächer, je weiter sie vom Zink abstehen. Sind Metalle dieser Reihe in verdünnter Schwefelsäure zu einem galv. Element vereinigt, so wird nur das am leichtesten oxydierbare Metall (neg. Pol) aufgelöst, während das andere Metall (pos. Pol), da es die E. der Flüssigkeit annimmt, vor der Auflösung geschützt ist. (Die Zerstörung von Zinkblech wird in feuchter Luft durch die Berührung mit Eisen befördert. Eisen und Stahlwaren lassen sich durch Beimischung von Zink gegen das Rosten schützen.)

In den elektrischen Zuständen der Platten eines Elementes oder einer Batterie besteht demnach eine gewisse Spannung oder ein Unterschied, welcher von der Art der verwendeten Metalle und von der Erregungsflüssigkeit abhängig ist.

Man nennt diesen Unterschied der el. Zustände die **elektromotorische** (d. h. „Elektrizität bewegende“) **Kraft** des Elementes.

Jedes Element hat demnach eine bestimmte elektromotorische Kraft; die elektromotorische Kraft einer Batterie wächst in geradem Verhältnis mit der Anzahl der Elemente, welche man zur Batterie zusammenstellt; eine Batterie von 3 Elementen z. B. hat eine 3 mal so große elektromotorische Kraft wie ein einzelnes Element derselben Art.

Werden die Pole eines galv. Elementes oder einer galv. Batterie leitend verbunden (Fig. 474), so fließt die Elektrizität durch den Schließungsdraht von dem einen Pol zum anderen und es entsteht ein **el. (galvanischer) Strom**. Die Einwirkung auf eine Magnetnadel, die in jedem Punkte des Schließungsbogens stattfindet, beweist z. B., daß durch denselben ein el. Strom fließt. Als Richtung des Stromes bezeichnet man übereinstimmend diejenige, in der die positive E. fortgeführt wird, also die Richtung vom (positiven) Kupferpol zum (negativen) Zinkpol. Die durch den Schließungsbogen verbundenen Pole verhalten sich ebenso wie die leitend verbundenen Konduktoren einer in Thätigkeit befindlichen Elektrisiermaschine.

Die el. Zustände in einem geschlossenen Element würden sich sofort ausgleichen und dasselbe würde unelektrisch werden, wenn nicht an den Berührungsflächen der Metalle mit der Flüssigkeit aufs neue entgegengesetzte Elektrizitäten erzeugt würden, die sich wieder ausgleichen u. s. f. Demnach müssen wir in dem an der Oberfläche des Zinks stattfindenden (chemischen) Vorgang die eigentliche Quelle der el. Erregung suchen.

Bem. Die Theorie *Voltas*, daß durch bloße Berührung zweier Metalle E. entstehen könne (**Kontakttheorie**), ist dementsprechend geändert worden in dem Sinne, daß man die chemischen Vorgänge als Ursache der Berührungs-E. ansieht (**elektrochemische Theorie**). Die elektromotorische Kraft ist mithin auf chemische Prozesse zurückzuführen.

Übungsstoff. 1. Wie ist es zu erklären, daß die el. Spannung an den Polen eines Voltaschen Elementes kleiner ist als die Spannung, welche man erhält, wenn eine Zinkplatte in verdünnte Schwefelsäure getaucht wird? — 2. Welche Spannung ergibt sich (durch Rechnung nach obiger Anleitung), wenn man eine aus 8 Volt. Elementen bestehende Batterie anwendet? — 3. Warum erhält man durch Eintauchen zweier Platten von gleichem Metalle keine el. Wirkung? — 4. In Fig. 477 und 478 sei a. Zink durch Eisen, b. Kupfer durch Platin ersetzt. Einfluß auf die el. Spannung? — 5. Wenn W. mittelst einer Pumpe gehoben und in einem Behälter angesammelt wird, so übt es zunächst auf die Wandung einen Druck aus; beim Abfließen aus einer nahe am Boden des Behälters befindlichen Öffnung vermag es gewisse Widerstände zu überwinden. Damit andauernd die gleichen Widerstände überwunden werden können, muß das W. im Behälter durch fortgesetztes Pumpen in derselben Höhe gehalten werden. Dies läßt einen Vergleich zu mit den Vorgängen im galv. Elemente. Was entspricht a. der zum Heben des W. dienenden Kraft, b. dem Drucke des W., c. dem Abfließen des W., d. der Arbeitsleistung? e. Was ist zu einer andauernden gleichen Arbeitsleistung erforderlich? — 6. Die Größe des Druckes, welchen die ruhende Flgk. bei derselben Höhe auf gleiche Teile der Bodenfläche ausübt, hängt von der Natur der Flgk. ab (inwiefern?); bei derselben Flgk. läßt sich der Druck dadurch vergrößern, daß man den Behälter höher mit der Flgk. füllt und zu diesem Zwecke mehrere Pumpen zugleich anwendet. Je größer der Druck ist, desto stärker fließt das W. aus. Benutze diese Angaben wiederum zu einem Vergleiche!

§ 136. Konstante Elemente. Galvanoskop und Galvanometer. Für den praktischen Gebrauch galvanischer Elemente ist es wichtig, daß die erzeugten Ströme die nötige Stärke haben und andauernd wirken. Die letztere Eigenschaft haben die Ströme Voltascher Elemente nicht, wie sich durch einen Versuch leicht nachweisen läßt. (Schaltet man in den Schließungsbogen eines solchen Elementes ein Galvanoskop (siehe Fig. 483) ein, so erhält man zwar zunächst einen kräftigen Ausschlag, der jedoch schon nach kurzer Zeit bedeutend an Größe abnimmt.)

Die schnelle Abnahme der Stromstärke Voltascher Elemente erklärt sich durch die chemischen Vorgänge, welche im Element stattfinden. Das Wesentliche hierbei ist, daß sich das Zink in der Schwefelsäure auflöst, wobei sich Wasserstoff in Form kleiner Bläschen ausscheidet, welche sich auf der Kupfer- oder Kohlenplatte ablagern. Die Wasserstoffschicht wirkt nicht nur als schlechter E.s-Leiter hemmend auf die el. Bewegung ein, sondern entwickelt auch eine elektromotorische Kraft, die der Kraft des Elementes entgegenwirkt, also den Strom schwächt. Man nennt diesen Vorgang **Polarisation** (vergl. § 139)

An die Stelle des Wasserstoffs der Schwefelsäure (H_2SO_4) tritt Zink. Dadurch entsteht schwefelsaures Zink (Zinkvitriol), das sich in der Flüssigkeit auflöst. Der Wasserstoff dagegen wird frei. Dieser chemische Vorgang wird durch die Formel ausgedrückt: $H_2SO_4 + Zn = ZnSO_4 + H_2$.

Die schädliche Wirkung des im galv. Elemente frei werdenden Wasserstoffs wird dadurch aufgehoben, daß man ihn wieder in eine chemische Verbindung überführt. Hierzu eignen sich besonders sauerstoffreiche *Säuren* (in den Elementen b und c) und leicht zersetzbare *Metalloxyde* (e), welche sehr leicht Sauerstoff abgeben, der sich dann mit dem Wasserstoff zu Wasser verbindet; ferner *Metallsalze* (a und d), aus denen das Metall durch den frei gewordenen Wasserstoff, der an die Stelle des Metalles tritt, leicht verdrängt wird. Da jedes Metall durch Berührung mit einer Flüssigkeit elektrisch wird, so kann man die Metalle auch in zwei verschiedene Flüssigkeiten eintauchen, welche in leitender Berührung sind. Elemente dieser Art heißen **konstante**, weil sie längere Zeit einen Strom von nahezu gleicher Stärke liefern. Ihre elektromotorische Kraft ist von der Art der Metalle und der der Flüssigkeiten abhängig.

Die wichtigsten konstanten Elemente sind:

a. Das **Daniellsche Element** (Fig. 479). Die beiden Metalle sind Zink und Kupfer; ersteres steht in verdünnter Schwefelsäure, letzteres in einer konzentrierten Lösung von Kupfervitriol. Beide Flüssigkeiten sind durch einen Becher aus leicht gebranntem Thon voneinander getrennt, sodafs sie sich durch die poröse Scheidewand gegenseitig berühren können, ohne sich jedoch zu mischen. Aus der Kupfervitriollösung scheidet sich metallisches Kupfer aus, das sich auf der Kupferplatte niederschlägt.

Sumpf, Schulphysik. (5. Aufl.)

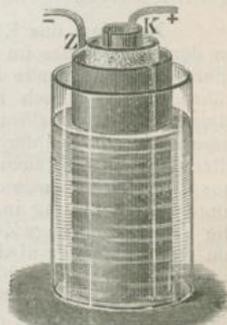


Fig. 479.

Der aus der Schwefelsäure frei gewordene Wasserstoff tritt an die Stelle des Kupfers der Kupfervitriollösung, sodafs Schwefelsäure und metallisches Kupfer entsteht ($\text{CuSO}_4 + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Cu}$).

b. Das **Grovesche Element** besteht aus einer Zink- und einer Platinplatte, von denen erstere in verdünnter Schwefelsäure, letztere in konzentrierter Salpetersäure (wie beim vorigen Element von einer Thonzelle eingeschlossen) steht. (Elektrom. Kraft ungefähr = 1,7 Daniell.)

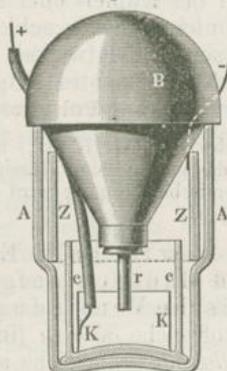
Die Salpetersäure (HNO_3) giebt leicht einen Teil ihres Sauerstoffes ab; dieser verbindet sich mit dem frei gewordenen Wasserstoffe der Schwefelsäure zu Wasser. Hierbei verwandelt sich die Salpetersäure nach und nach in salpetrige Säure, welche in (gesundheitsschädlichen) roten Dämpfen entweicht.

c. Das **Bunsensche Element**.

Fig. 480.



Fig. 481.



Die ursprüngliche Einrichtung desselben unterscheidet sich von der des Groveschen Elementes nur dadurch, daß statt des Platins die sehr harte Gaskohle angewandt wird. (Elektrom. Kraft ungefähr = 1,7 Daniell.)

Bei der verbesserten Einrichtung (sogen. Flaschenelement, Fig. 480) wird die Salpetersäure durch eine Lösung von doppelchromsaurem Kali in verdünnter Schwefelsäure ersetzt, oder eine solche Lösung allein (ohne Thonzelle) angewandt: Chromsäure-Elemente. Chromsäure giebt ähnlich wie Salpetersäure (aber ohne Bildung schädlicher Dämpfe) leicht Sauerstoff ab und macht dadurch den Wasserstoff un-

schädlich. Die Stromstärke ist nicht so

andauernd wie bei Anwendung von Sal-

d. Das **Meidingersche Element** (Fig. 481) enthält wie das Daniellsche Element eine Zink- und eine Kupferplatte. Das Zink (Zn) befindet sich in einer Bittersalzlösung und das Kupfer (K) in einer Lösung von Kupfervitriol. Letztere ist in einem kleinen, am Boden des großen Gefäßes (A) stehenden Glase (c) enthalten, in welches der Hals eines umgekehrten, mit Kupfervitriolkrystallen und Bittersalzlösung gefüllten Deckelgefäßes (B) hineinragt. (Elektrom. Kraft etwa = 1 Daniell.)

Nachdem das Element gefüllt ist, fangen die Kupfervitriolkrystalle an, sich in dem Wasser der im Deckelgefäße enthaltenen Bittersalzlösung aufzulösen. Hierbei fließt die entstehende Lösung wegen ihres höheren spec. Gewichtes durch die Glasröhre nach und nach in das am Boden stehende Gefäß (c) und verdrängt die aufsteigende Bittersalzlösung aus dem Glase. Hat sich dieser Vorgang solange fortgesetzt, bis der Kupfercylinder beinahe ganz in Kupfervitriollösung steht, so ist das Element zum Gebrauche geeignet. Wird durch den el. Strom des Elementes Kupfer aus der Lösung ausgeschieden, so setzt sich jener Austausch dadurch fort, daß die ungesättigte Lösung in der specifisch schwereren aufsteigt. Auf diese Weise behält die Flüssigkeit lange Zeit nahezu die gleiche Beschaffenheit. Damit sich nicht auch am Drahte Kupfer niederschlagen kann, ist derselbe mit Guttapercha überzogen.

e. Das **Element von Leclanché** enthält wie das Bunsensche Element Zink und Kohle; ersteres steht in einer konzentrierten Lösung

von Salmiak, letztere in einem groben Pulver aus Braunstein und Coaks. (Elektrom. Kraft ungefähr = 1,4 Daniell.)

Man füllt das Gefäß etwa zu $\frac{1}{4}$ mit Braunsteinstückchen und bis nahe zum Rande mit Salmiaklösung. In letztere wird das Zink, in erstere die Kohle gestellt.

Braunstein oder Manganüberoxyd (MnO_2) giebt wie Salpetersäure und Chromsäure leicht Sauerstoff ab, welcher sich mit dem aus Salmiak (NH_4Cl) frei gewordenen Wasserstoffe zu Wasser verbindet. Von dem sich ebenfalls ausscheidenden Ammoniak und Chlor verbindet sich letzteres mit dem Zink zu Chlorzink.

Bem. Bei allen Elementen wird die Zinkplatte vor dem Gebrauche amalgamiert. Alle Verbindungen der Stromleitungen müssen metallisch rein und durch Klemmschrauben gut befestigt sein.

Die Elemente von Grove und Bunsen liefern einen sehr starken Strom, welcher jedoch nur einige Stunden andauernd konstant ist. Weniger stark, aber länger (tagelang) konstant ist der Strom des Daniellschen Elementes (zur Galvanoplastik vielfach benutzt, § 139). Bei den Elementen von Meidinger und Leclanché, namentlich bei ersterem, ist der Strom noch schwächer, aber monatelang konstant (daher zur Telegraphie, sowie zum Betrieb el. Klingeln geeignet, § 142). In neuester Zeit werden zu derartigen Zwecken auch häufig die sogen. Trockenelemente angewandt. Sie enthalten keine Flüssigkeit, sondern eine eingedickte Masse und sind deshalb für den Gebrauch besonders bequem.

Galvanoskop und Galvanometer. Zum Nachweis galv. Ströme läßt sich am zweckmäßigsten die Magnetnadel verwenden. (Versuch b, § 134). *Instrumente, welche diesem Zwecke dienen, werden Galvanoskope genannt; wenn mittelst derselben die Stärke der Ströme gemessen werden kann, so heißen sie Galvanometer.*

Fig. 481 stellt ein einfaches Galvanoskop dar, das aus einem kleinen Kupferbügel und einer Deklinationsnadel besteht, die sich innerhalb des Bügels oder über demselben auf einer senkrechten Spitze frei bewegen kann.

Die Ablenkung der Nadel läßt zugleich die Richtung des Stromes erkennen und zwar nach einer sehr einfachen Gedächtnisregel:

Denkt man sich eine menschliche Figur in den Strom eingeschaltet, welche mit demselben schwimmt und das Gesicht der Nadel zuwendet, so schlägt der Nordpol der Nadel stets nach links aus: **Ampèresche Schwimmerregel** (vergl. Fig. 483)

Die Ablenkung der Magnetnadel durch den galv. Strom wurde 1820 von Oersted in *Kopenhagen* entdeckt und unmittelbar nachher von *Ampère in Paris* genauer erforscht.

Bei dem in Fig. 484 (folg. Seite) dargestellten Galvanoskop kann sich eine Inklinationsnadel in den Windungen zweier umspannener Kupferdrähte von verschiedener Dicke frei drehen. (Der dünnere Draht umgiebt die Nadel in wenigstens 200 Windungen und ist für Induktionsströme (§ 141) bestimmt.) Damit die Ausschläge der Nadel deutlich wahrgenommen und die Ablenkungswinkel bequem

Fig. 482.

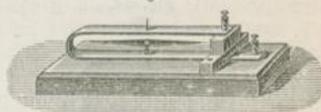
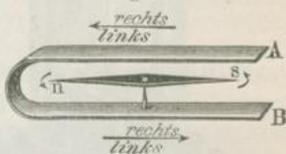
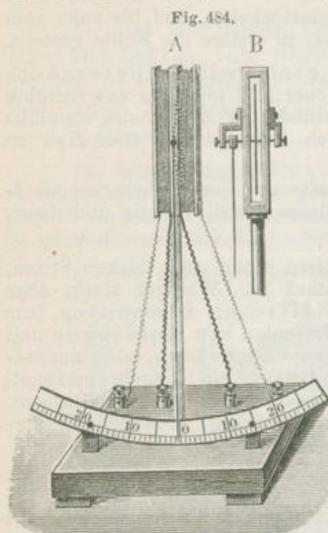


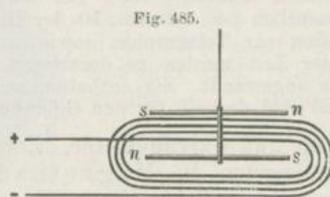
Fig. 483.



miteinander verglichen werden können, ist auf der drehbaren Achse der Nadel ein Zeiger befestigt, dessen Spitze sich auf einer Kreisteilung bewegt und die Größe des Ausschlages in Graden anzeigt.



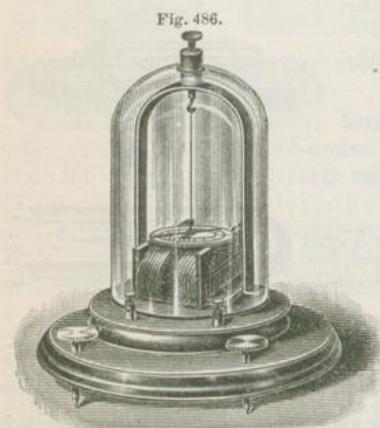
Zum Nachweis äußerst schwacher Ströme dienen Galvanometer, welche ein an einem Coconfaden hängendes **Nadelpaar** enthalten (Fig. 485). Beide Nadeln sind möglichst gleichstark magnetisiert und mit ihren ungleichnamigen Polen parallel übereinander befestigt, so daß die untere Nadel zwischen, die obere über zahlreichen Drahtwindungen schwebt, die über einen kleinen hölzernen Rahmen gelegt sind



gelegt sind (vgl. Fig. 486). Dadurch ist die richtende Wirkung, welche der Erdmagnetismus auf die Nadeln

ausübt, aufgehoben; die Nadeln heißen deshalb *astatisch*, d. h. leicht beunruhigt.

Das Instrument bezeichnet man als **Multiplikator**, da die Einwirkung des Stromes auf die Nadel dadurch vervielfältigt wird, daß er die Windungen des Leitungsdrahtes durchläuft.



Der Multiplikator kann zum Nachweise und auch zur Messung sehr schwacher Ströme angewendet und mithin auch als Galvanometer gebraucht werden. Beträgt die Ablenkung der Nadel nur wenige Grade, so läßt sich das Verhältnis der Stromstärken dem Verhältnis der Ablenkungswinkel gleichsetzen. Bei stärkeren Ablenkungen der Nadel ist auf eine größere Stromstärke zu schließen, als die Zunahme des Winkels ergeben würde. Dies wird dadurch erklärlich, daß die Entfernung der Magnetpole von den Drahtwindungen mit der Stärke der Ausschläge der Nadel zunimmt.

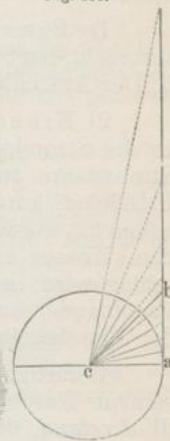
Zur Messung stärkerer Ströme wendet man gewöhnlich die **Tangentenboussole** (Fig. 487, folg. Seite) an. Dieselbe ist ein Galvanometer, bei welchem im Mittelpunkte eines kreisförmigen kupfernen Reifens von 20—40 cm Durchmesser eine Deklinationsnadel aufgehängt ist. Damit die Entfernungen, aus denen der Strom auf die Nadel einwirkt, bei allen Stellungen der Nadel nahezu gleich sind, ist die Nadel höchstens $\frac{1}{4}$ so lang als der Durchmesser des Reifens. Dies ergibt ein einfaches

Verhältnis zwischen Stromstärke und Ausschlag: Die Stromstärken verhalten sich zu einander wie die trigonometrischen Tangenten der Ablenkungswinkel (Fig. 488). †)

Fig. 487.



Fig. 488.



Übungsstoff. 1. Weshalb wendet man bei konstanten Elementen in der Regel zwei Flgkn. an? — 2. Welchen Zweck hat die Thonzelle, welche Beschaffenheit muß sie demnach haben und auf welche Weise kann sie geprüft werden? (Eine gute Thonzelle muß reines W. in 4 Minuten durchschlagen lassen.) — 3. Das käufliche Zink enthält gewöhnlich Beimischungen von Eisen und anderen Metallen. Inwiefern müssen dieselben die Stärke des Stromes vermindern und die Zerstörung der Zinkplatte befördern? —

4. Welchen Zweck hat demnach das Amalgamieren der Zinkplatten? — 5. Welchen Einfluß mußte es auf die Stromstärke eines Volt. Elem. ausüben, wenn man durch die Flgk. desselben andauernd einen Strom atm. Luft hindurchtrieb, u. w.? — 6. Der Einfluß des Wasserstoffs ist bei einem frisch zusammengesetzten Volt. Elem. erst bemerklich, nachdem der Strom einige Zeit gewirkt hat. Inwiefern erklärt sich dies aus der Einwirkung der an der Kupferplatte haftenden Luftschicht und der im W. gelösten Luft? — 7. Wenn die Kohlenplatten von Chromsäure-Elementen längere Zeit an der Luft gestanden haben, so ist die Stromstärke anfangs am größten, zeigt aber bald eine Abnahme. Erkl.! (Porosität der Kohle.) — 8. Um den Leitungswiderstand der Flgk in Chromsäure-Elementen zu vermindern, bringt man die Platten nahe aneinander. Welchen Nachteil hat dies bei längerem Gebrauche? (Umschütteln.) — 9. Wie läßt sich mit Hilfe eines Galvanoskopes ein Blitzableiter prüfen? — 10. Welche Vorteile bieten folgende Einrichtungen eines Galvanometers: a. Anwendung einer astatischen Nadel; b. Aufhängung derselben an einem ungedrehten Seidenfaden; c. Bedeckung mit einer Glasglocke; d. Anwendung vieler Drahtwindungen?

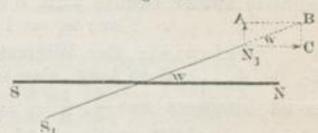
§ 137. Widerstand. Ohmsches Gesetz. Stromstärke.

Leitungswiderstand. Versuche. Schaltet man in den Schließungsbogen eines konstanten galv. Elementes außer einem Galvanoskop (Fig. 475)

†) Der Strom, welcher durch den im magn. Meridian stehenden Reifen fließt, gebe der Nadel die Lage S_1N_1 (Fig. 489). Dann wirken auf jeden Pol 2 Kräfte ein, nämlich die richtende Kraft des Erdmagnetismus (P) und die ablenkende Kraft des galv. Stromes (K). Ersterer strebt die Nadel in der NS-Richtung zu erhalten, letzterer strebt sie senkrecht dazu zu stellen. In Fig. 489 seien diese Kräfte für den Nordpol durch N_1C (= P) und N_1A (= K) bezeichnet. (Die auf den Südpol wirkenden Kräfte sind entgegengesetzt gerichtet.) Die Nadel kommt zur Ruhe, wenn die Mittelkraft in die Richtung der Nadel selbst fällt. Ist nun w der Ablenkungswinkel, so ist $K = P \cdot \tan w$, für einen anderen Ablenkungswinkel (w_1) ist ebenso $K_1 = P \cdot \tan w_1$. Folglich ist

$$K : K_1 = P \cdot \tan w : P \cdot \tan w_1 = \tan w : \tan w_1.$$

Fig. 489.



nacheinander verschiedene Metalldrähte und Flüssigkeiten ein, so ändern sich die Ausschläge der Nadel, woraus man auf eine Änderung der Stromstärke schließen muß.

1) Einschaltung von Drähten. a. Ein *Eisendraht* z. B. schwächt den Strom stärker als ein ebenso langer und dicker *Kupferdraht*. b. Der Ausschlag ist um so kleiner, je *länger* und *dünnere* der Draht ist.

2) Einschaltung von Flüssigkeiten. a. Wird *reines Wasser* in die Stromleitung eingeschaltet, so erhält man selbst bei bedeutender Stromstärke auch dann keinen merklichen Ausschlag, wenn die beiden Polflächen durch Metallplatten vergrößert und diese einander sehr nahe gebracht werden. Die Nadel wird aber etwas abgelenkt, sobald man dem Wasser eine Säure, z. B. *Schwefelsäure*, beimischt. b. Der Ausschlag wird in diesem Falle kleiner, wenn man die Polplatten weiter voneinander entfernt, oder sie bei unverändertem Abstände langsam aus der Flüssigkeit heraushebt.

Derartige Versuche lehren, daß alle Körper den el. Strom bei seinem Durchgange schwächen. Diese Schwächung beruht auf einem *Widerstand*, den die Leiter dem Durchgang des Stromes entgegensetzen und der von diesem überwunden werden muß, ähnlich wie Wasser, welches durch eine Röhrenleitung fließt, einen Reibungswiderstand zu überwinden hat.

Genaue Messungen, welche sich mit Hilfe einer Tangentenboussole anstellen lassen, führen zu dem Satze:

Der Widerstand eines festen oder flüssigen Leiters ist abhängig von dem spezifischen Leitungsvermögen desselben; er steht ferner im geraden Verhältnis zur Länge und im umgekehrten zum Querschnitt des festen Leiters oder der vom Strome durchflossenen Flüssigkeitssäule.

Die besten E.-s-Leiter sind die Metalle, namentlich Silber und Kupfer. Kupfer leitet ungefähr $\frac{1}{2}$ -, Gold $\frac{1}{3}$ -, Messing $\frac{1}{4}$ -, Eisen und Platin $\frac{1}{5}$ mal so gut als Silber. Die besten Wärmeleiter sind demnach auch die besten Elektrizitätsleiter (vergl. § 34). *Das Leitungsvermögen der Flüssigkeiten ist sehr gering.* Die Leitungsfähigkeit von Wasser, welchem 30% Schwefelsäure zugesetzt ist, beträgt $\frac{1}{300000}$, die von konz. Salpetersäure kaum 1 Milliontel, die einer konz. Lösung von Kupfervitriol nur etwa 1 Zwölfmilliontel von der des Silbers. Vollkommen reines Wasser kann als Nichtleiter angesehen werden.

Das Leitungsvermögen ist von der Temperatur abhängig; bei den Metallen wird es durch Temperaturzunahme vermindert, bei den Flüssigkeiten erhöht.

Wenn w und w_1 die Widerstände, l und l_1 die Längen, q und q_1 die Querschnitte zweier Drähte von demselben Metalle bedeuten, so ist in Zeichen:

$$w : w_1 = l : l_1, \quad \text{aber } w : w_1 = q_1 : q.$$

Beispiel: Der Widerstand ist 2-, 3-, 4... mal so groß, wenn der Draht 2-, 3-, 4... mal so lang, aber ebenso dick ist als ein anderer von demselben Metalle; er ist hingegen nur $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$... so groß, wenn der Querschnitt des Drahtes bei gleicher Drahtlänge 2-, 3-, 4... mal so groß ist.

Um die Größe der Widerstände in Zahlen ausdrücken zu können, führte *Werner Siemens* den Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° als *Widerstandseinheit* ein (*Siemens-Einheit* oder auch kurz *1 Siemens*). Später entschied man sich für die Einführung einer Widerstandseinheit,

welche von der Siemens-Einheit etwas abweicht. Man nannte dieselbe das **Ohm** zu Ehren *Ohms*, des Physikers, welcher (1827) die Gesetze der Stromstärke entdeckte. *Ein Ohm ist der Widerstand eines Quecksilberfadens von 106 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° (1 Ohm = 1,06 Siemens).*

Für die praktischen Zwecke der Elektrotechnik würde der Gebrauch von Quecksilbersäulen zu Widerstandsmessungen unbequem sein. Man bedient sich deshalb bestimmter Apparate, welche Neusilberdrähte von bekanntem Widerstande enthalten. Dieselben sind so eingerichtet, daß man die Widerstände ein- und ausschalten kann, ohne den Strom zu unterbrechen (Rheostate).

Innerer Widerstand. Der el. Strom erleidet schon beim Durchgange durch das ihn erzeugende Element eine Schwächung, welche um so größer sein muß, je geringer das Leitungsvermögen der Flüssigkeit ist, je kleiner die Platten des Elementes sind und je weiter diese voneinander abstehen. (Die angeführten Zahlen ergeben, daß diese Schwächung fast nur von der Flüssigkeit herrührt.) Man unterscheidet daher den Widerstand im galv. Elemente als inneren oder wesentlichen Widerstand von dem Widerstande im Schließungsbogen und nennt letzteren den äußeren oder auferwesentlichen Widerstand.

Ohmsches Gesetz. In welcher Weise die Stromstärke von der elektromotorischen Kraft und vom Leitungswiderstande abhängig ist, wird durch das *Ohmsche Gesetz* ausgedrückt, dessen Richtigkeit sich durch genaue Versuche bestätigen läßt:

Die Stromstärke steht im geraden Verhältnis zur elektromotorischen Kraft und im umgekehrten Verhältnis zur Größe des Widerstandes.

Wenn S und S_1 die Stromstärken, E und E_1 die elektromotorischen Kräfte, W und W_1 die Gesamtwiderstände bedeuten, so ist in Zeichen:

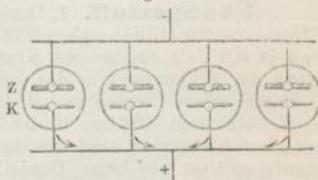
$$S = \frac{E}{W}; \text{ also } S:S_1 = E:E_1, \text{ aber } S:S_1 = W_1:W.$$

Aus dem Ohmschen Gesetze ergeben sich wichtige Folgerungen. Bei der Verbindung mehrerer galv. Elemente zu einer Batterie (siehe Fig. 478) nimmt die elektromotorische Kraft ebenso zu, wie die Anzahl der Elemente, aber in demselben Verhältnis wächst auch der innere Widerstand, da der Strom durch alle Elemente hindurchgehen muß. Es sind demnach zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Ist der äußere Widerstand im Verhältnis zum inneren Widerstande sehr gering (kurzer, dicker Draht, sogen. „Kurzschluss“), so hat der Strom eines einzelnen Elementes fast genau dieselbe Stärke wie der Strom einer Batterie von beliebig vielen Elementen; eine Stromverstärkung muß dann durch Verminderung des inneren Widerstandes bewirkt werden. In diesem Falle hat man also entweder ein Element mit großen Platten anzuwenden, oder sämtliche Elemente gleichnamig (nebeneinander, d. h. alle Zinkplatten und ebenso alle Kupferplatten unter sich) zu verbinden (Fig. 490). Dadurch wird bei der gegebenen Größe der elektromotorischen Kraft der Gesamtwiderstand möglichst vermindert.

2. Ist der äußere Widerstand sehr groß (z. B. sehr langer dünner Draht einer Telegraphenleitung oder eine Flüssigkeit), so wird der Strom des einzelnen Elementes dadurch sehr geschwächt; zur Ver-

Fig. 490.



stärkung des Stromes muß deshalb die elektromotorische Kraft vergrößert werden. Dies ist dadurch zu erreichen, daß man mehrere Elemente *ungleichnamig* (*hintereinander*, Fig. 478) verbindet. Wenn hierbei auch der innere Widerstand wächst, so vermag dies doch wegen der verhältnismäßig geringen Größe desselben am Gesamtwiderstande nur sehr wenig zu ändern. Die durch den äußeren Widerstand auf einen kleinen Bruchteil verminderte Stromstärke des einzelnen Elementes vervielfacht sich demnach mit der Anzahl der Elemente.

Diese Folgerungen aus dem Ohmschen Gesetz lassen sich durch einfache Formeln ausdrücken. n bezeichne die Anzahl der Elemente, e die elektromotorische Kraft und w den inneren Widerstand eines Elementes, l den äußeren (Leitungs-) Widerstand. Dann ist zunächst:

$$J = \frac{ne}{nw + l}.$$
 Wird $l = 0$ (1. Fall), so ist $J = \frac{ne}{nw}$; ist l dagegen sehr groß (2. Fall), so verschwindet das Glied $n \cdot w$ dagegen und es wird $J = \frac{ne}{l}$.

Als **Einheit für die Stromstärke** hat man unter Beziehung auf die chemische Wirkung des Stromes (§ 139) die Stärke eines Stromes eingeführt, welcher bei der Wasserzersetzung in 1 Min. 10,44 ccm Knallgas von 0° und 760 mm Druck entwickelt. Man nennt diese Einheit **1 Ampère**. — Als **Einheit der elektromotorischen Kraft** wird die elektromotorische Kraft eines galv. Elementes angenommen, das eine Stromeinheit (1 Ampère) erzeugt, wenn der Widerstand 1 Ohm beträgt. Diese Einheit heißt **1 Volt** und entspricht ziemlich genau der elektromotorischen Kraft eines Daniellschen Elementes.

Nach dem Ohmschen Gesetze ist demnach $1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$.

Um die Stromstärke mittelst der Tangentenboussole nach Ampèreschen Einheiten messen zu können, hat man zunächst zu ermitteln, wieviel ccm Knallgas vom Strome in 1 Min. entwickelt werden, wenn die Nadel der zugleich eingeschalteten Boussole um 45° abgelenkt wird, da dann die Tangente des Ablenkungswinkels gleich 1 ist. Die erhaltene Zahl bildet den Reduktionsfaktor der betreffenden Boussole. Multipliziert man diese Zahl mit der Tangente des Ablenkungswinkels eines beliebigen galv. Stromes, so erhält man die gesuchte Stromstärke nach der chemischen Wirkung in ccm Knallgas, oder aber in Ampèreschen Einheiten, wenn man die Anzahl der Kubikcentimeter durch 10,44 dividiert.

Übungsstoff. 1. Durch eine Telegraphenleitung von 100 m Länge soll ein Strom von 30 Milli-Ampère (0,030 Amp.) gesendet werden. Wv. Meidinger-Elemente von je 0,9 Volt elektromot. Kraft und 5 Ohm innerem Widerstand sind erforderlich, wenn der Widerstand in der Leitung und im Apparat 750 Ohm beträgt? — 2. Von 2 Daniellschen Elementen sei das eine größer als das andere. Wie verhalten sich a. die elektrom. Kräfte, b. die Stromstärken? — 3. Bei den Groveschen und Bunsenschen Elementen sind die inneren Widerstände kleiner, beim Meidingerschen Elemente größer als beim Daniellschen. Was folgt hieraus unter Berücksichtigung ihrer elektrom. Kraft betreffs der Stromstärke? — 4. Läßt man die Ströme zweier Elemente, welche sich nur durch ihre Größe unterscheiden, gegeneinander wirken, indem man 2 *gleichnamige* Pole mit einem Galvanoskope und die beiden anderen unter sich verbindet, sodafs also für beide Ströme die Widerstände gleich sind, so erhält man keinen Ausschlag. Verhältnis der elektrom. Kräfte? — 5. Läßt man die Ströme eines Bunsenschen und eines ebenso großen Daniellschen Elementes wie vorhin gegeneinander wirken, so erhält man einen Ausschlag nach der Richtung, in welcher die Nadel durch das Bunsensche Element allein abgelenkt werden würde. Erkl.! — 6. Ein galv. Strom entwickle in 1 Min. 60 ccm Knallgas und

lenke die Nadel einer bestimmten Tangentenboussole um 45° ab. Wv. cem Knallgas entstehen hiernach durch Ströme, welche Ausschläge von 10° , 20° , 30° bewirken? — 7. Wv. Ampère beträgt in jedem Falle die Stromstärke?

Wirkungen des galvanischen Stromes.

a. Wirkungen im Stromkreise.

Man unterscheidet *Wirkungen im Stromkreise* und *Wirkungen außerhalb der Strombahn*, je nachdem der galv. Strom auf Körper einwirkt, welche er durchströmt, oder auf solche, an denen er in einer geringen Entfernung vorbeigeleitet wird. Von den Wirkungen der ersteren Art kommen hauptsächlich die *Wärme-* und *Lichtwirkungen*, sowie die *chemischen Wirkungen* in Betracht.

Bem. Die *physiologischen Wirkungen* sind als *Wirkungen der Induktionsströme* in § 141 behandelt.

§ 138. Wärme- und Lichtwirkung.

1. Wärmewirkung. Versuch a. Dünne Metalldrähte, die man in den Schließungsbogen einer galv. Batterie einschaltet, erwärmen sich je nach dem spezifischen Leitungswiderstand verschieden stark. Ein kurzer und dünner Platin- oder Eisendraht z. B. wird durch den Strom leicht glühend, während Kupfer- und besonders Silberdrähte von gleicher Ausdehnung wegen ihres geringeren Leitungswiderstandes sich weniger erwärmen. — Auch flüssige Leiter erwärmen sich durch den Strom. So wird z. B. die Flüssigkeit der galv. Elemente fühlbar warm, wenn diese längere Zeit gebraucht werden.

Die in einem Stromkreise entwickelte Wärmemenge ist proportional dem Widerstande, dem Quadrate der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom fließt.

Dieses Gesetz wurde (1841) durch den englischen Forscher *Joule* (spr. Dschau) nachgewiesen, indem er Leitungsdrähte in einem Kalorimeter durch Alkohol führte und dessen Erwärmung beobachtete.

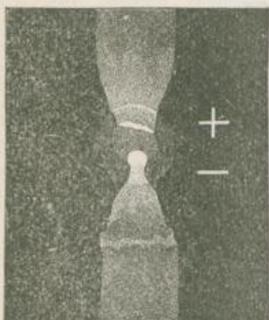
Von dem Glühen dünner Drähte durch den galv. Strom macht man Anwendung, um in gefahrloser Weise Sprengstoffe aus größerer Entfernung zu entzünden, z. B. beim Sprengen von Felsen, Zerstören feindlicher Festungswerke u. dgl. Mit größerer Sicherheit bewirkt man die Entzündung von Sprengstoffen durch el. Funken, die durch Induktionsströme (§ 141) erzeugt werden. In der Heilkunde werden galv. glühende Platindrähte zum Abschneiden von Geschwülsten benutzt.

2. Lichtwirkung. Versuch b. Wird der in § 134 angegebene Versuch d mit einer aus mehreren kräftigen Elementen zusammengesetzten Batterie ausgeführt, so strahlen die Kohlenspitzen ein glänzendes Licht aus. Bei Anwendung von einigen 20 bis 30 Elementen können die Kohlenstäbchen, nachdem sie sich zuerst berührt hatten, dauernd bis zu einem gewissen Abstände voneinander entfernt werden, ohne daß ein Erlöschen des Lichtes stattfindet, der Lichtpunkt wird vielmehr zu einer blendend hellen Flamme (Fig. 491, folg. Seite).

Der galv. Funke entsteht nicht, wie der durch Reibungs-E. erzeugte, durch eine Vereinigung beider Elektricitäten in der Luft. Dazu ist die Spannung der galv. E. viel zu gering. Sind die Kohlenspitzen

zunächst bei gegenseitiger Berührung glühend geworden, so werden nachher bei geringem Abstände derselben vorzugsweise von der positiven

Fig. 491.



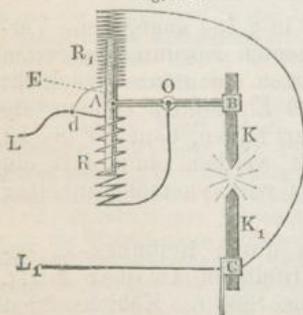
Kohle durch den Strom weißglühende Teilchen losgerissen und nach dem — Pol hinübergeführt, sodass die Leitung durch die Kohlenteilchen und durch die glühende Luft unterhalten wird; der + Kohlenstab wird infolgedessen kraterförmig ausgehöhlt.

Das el. Licht wurde zuerst (1821) von Davy erzeugt. Da er die Kohlenstäbe in horizontale Lage brachte, so nahm der Lichtstrom die Form eines nach oben gewölbten Bogens an: *Voltascher* oder *Davy'scher Bogen*. Aus diesem Grunde hat das durch glühende Kohlenspitzen erzeugte Licht den Namen **elektrisches Bogenlicht** erhalten. Von allen irdischen Lichtquellen hat dasselbe die stärkste Leuchtkraft. Der el. Lichtbogen strahlt beinahe halb soviel Licht aus als eine gleichgroße Fläche der Sonne und hat eine Temperatur von etwa 3500° , bei welcher die Kohle verdampft. Seine Temperatur ist bei starken und bei schwachen Strömen dieselbe.

Da die Kohlenspitzen verbrennen, so wird ihr gegenseitiger Abstand und damit auch der Leitungswiderstand größer. Dies hat schließlich ein Erlöschen des Lichtes zur Folge. Eine praktische Anwendung vom el. Bogenlichte konnte man daher erst machen, nachdem man Apparate erfunden hatte, durch welche die Kohlenspitzen in immer gleichem Abstände erhalten werden (**Kohlenlicht-Regulatoren** oder **Bogenlampen**). Seitdem wird das el. Licht zur Erleuchtung großer Räume, zur Beleuchtung von Straßen und öffentlichen Plätzen, zur Küstenbeleuchtung auf Leuchttürmen, zur Beleuchtung mikroskopischer Objekte im Sonnenmikroskop und zu mancherlei anderen Zwecken angewandt. Da die Erzeugung starker Ströme durch galv. Elemente zu umständlich und kostspielig ist, so verwendet man bei el. Lichtanlagen ausschließlich Dynamomaschinen (§ 143).

Durch die Regulatoren ist auch eine Teilung des el. Lichtes möglich, d. h. der Betrieb mehrerer in denselben Stromkreis hintereinander geschalteter Lampen. Die Teilung des el. Lichtes gelang zuerst durch die *Jablochkoffschen Kerzen*. Dieselben bestehen aus 2 isoliert nebeneinander befestigten Kohlenstäbchen, deren Spitzen anfänglich durch ein Graphitstäbchen leitend verbunden, aber nach dem Verbrennen des Graphits zur Erzeugung des Lichtbogens getrennt sind. Das Erlöschen einer Kerze hat jedoch das Versagen aller zur Folge und außerdem ist ihr Licht durch seine Farbe und durch Flackern unangenehm.

Fig. 492.



In weit vollkommener Weise wird die Teilung des el. Lichtes dadurch erreicht, daß man jede in den Strom eingeschaltete Lampe durch eine Nebenleitung von den übrigen und von der Hauptleitung möglichst unabhängig macht. Eine derartige Einrichtung zeigt z. B. die **Differentiallampe** von *Siemens und Halske* (*Hefner-Alteneck*) in Berlin (Fig. 492). Von den beiden Kohlenstäbchen (K und K_1) ist das obere an dem einem Arm eines zweiarmigen Hebels (AB) befestigt, dessen anderer Arm einen Eisenstab (E) trägt, welcher mit jedem Ende in eine Drahtspule hineinragt. Die untere Spule (R) besteht aus dickem Draht und bildet einen Teil der Hauptleitung ($LdROKK_1CL_1$);

die obere Spule hingegen besteht aus dünnem Draht und stellt eine Nebenschließung von großem Widerstande dar, durch welche der Strom (von d aus) nur teilweise hindurchfließt, wenn die Lampe brennt; der Strom muß aber ganz durch diese Leitung gehen, wenn die Lampe durch zu große Entfernung der Kohlenspitzen erloschen, die Hauptleitung also unterbrochen ist. In beiden Fällen kann sich demnach der Strom nach der nächsten, ebenso eingerichteten Lampe hin fortpflanzen. Erlischt nun die Lampe, so zieht die obere Spule den Eisenstab weiter in sich hinein (§ 140), die Kohlenspitzen berühren sich wieder und der Strom geht von neuem durch die Hauptleitung. Dadurch wird aber der Eisenstab mehr nach unten gezogen, sodafs die bis zur Weißglut erhitzten Kohlenspitzen sich wieder voneinander entfernen. Dies setzt sich solange fort, bis die von beiden Spulen ausgeübten Anziehungen sich das Gleichgewicht halten und der Lichtbogen wieder vollständig hergestellt ist.

Als eine Lichtquelle von mäfsiger Stärke, wie sie z. B. für die Beleuchtung von Wohnräumen zweckmäfsig ist, wendet man das el. Glühlicht an. Dasselbe wird dadurch hervorgebracht, dafs man einen dünnen Kohlenfaden in einem kleinen birnförmigen und luftleer gemachten Glasballon durch den el. Strom zum Glühen bringt (Edison'sche Glühlichtlampe, Fig. 493). Bei Luftzutritt würde der Kohlenfaden sofort verbrennen; auch in der Glasbirne findet eine allmähliche Oxydation desselben statt, wodurch sich mit der Zeit der Leitungswiderstand der Kohle ändert und die Leuchtkraft der Lampe vermindert.

Fig. 493.



Übungsstoff. 1. Warum schmilzt der galv. Strom dünne Eisen- und Platindrähte leichter als Drähte von Kupfer und Silber, obgleich jene Metalle einen weit höheren Schmelzpunkt haben als diese? — 2. Was wird eintreten, wenn man einen galv. Strom durch eine Kette leitet, deren Glieder abwechselnd aus dünnen Platin- und Silberdrähten gebildet sind? — 3. Auf sogen. Gold- oder Silberpapier kann man mit einem Poldrahte nur dann sichtbare Schriftzüge hervorrufen, wenn der andere Poldraht und das Papier sich leitend berühren und der Draht zugespitzt ist; w.? — 4. Wie erklärt es sich, dafs ein galv. Funke entsteht, wenn man die Poldrähte einer Batterie voneinander entfernt (Unterbrechungs- oder Öffnungsfunke), während beim Schließens des Stromes kein Funke wahrzunehmen ist? — 5. Warum stellt man bei el. Bogenlampen, durch welche ein gleich gerichteter Strom geht, die positive Kohlenspitze über die negative? (Vergl. Fig. 491). — 6. Wenn die Stromrichtung stetig wechselt (Wechselströme, § 143), so zeigt sich keine Verschiedenheit im Abbrennen der Kohlenspitzen. Erkl.! — 7. Vorzüge des el. Lichtes im Vergleich mit anderen Lichtquellen! — 8. Es ist beobachtet worden, dafs das blendend helle el. Bogenlicht dichten Nebel weniger gut durchdringt, als das viel weniger helle Gas- oder Petroleumlicht. Erkl.! (Letztere Lichtquellen geben rötliches Licht.)

§ 139. Elektrolyse. Polarisationsstrom. Akkumulatoren. Nach § 134, Versuch e, bringt der el. Strom *chemische Wirkungen* hervor, indem er Flüssigkeiten zersetzt, durch die er hindurch geleitet wird.

a. Wasserzersetzung.

Versuch a. Taucht man zwei an die Poldrähte angelötete Platinplatten in Wasser, dem einige Tropfen Schwefelsäure beigemischt sind, so ist an den Platten eine um so lebhaftere Gasentwicklung wahrnehmbar, je stärker der Strom ist. Stülpt man über jede Platte eine oben geschlossene und mit W. gefüllte Glasröhre (Fig. 494, folg. Seite), so kann man die entwickelten Gase getrennt auffangen. Der Versuch ergibt, dafs sich am + Pole Sauerstoff, am - Pole Wassertoff ansammelt, und zwar ist die Raummengende des letzteren Gases doppelt so groß als die des ersteren.

Die Zersetzung des Wassers ist in Wirklichkeit nicht eine einfache Zerlegung desselben in seine beiden chemischen Bestandteile. Da bei Anwendung von ganz

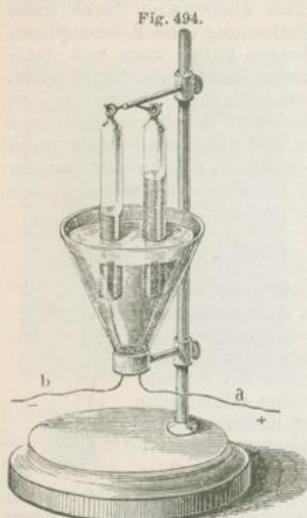


Fig. 494.

reinem Wasser sich keine Gase an den Platinplatten entwickeln, so muß man schließen, daß nicht das Wasser (H_2O) als solches, sondern die dem Wasser beigemischte Schwefelsäure (H_2SO_4) zerlegt wird (in H_2 und $SO_3 + O$), und daß der Schwefelsäurerest (das Anhydrit SO_3) sich sofort wieder mit Wasser zu Schwefelsäure verbindet, während der abgeschiedene Wasserstoff (H_2) und der Sauerstoff (O) frei bleiben. Das Wasser wird demnach also erst zersetzt, nachdem es in die Verbindung der die E. leitenden Schwefelsäure übergegangen ist und seine Elektrolyse ist mithin ein sekundärer Vorgang. — Ganz reines Wasser kann als ein nicht leitendes Oxyd angesehen werden.

Die durch den el. Strom bewirkte Zersetzung einer chemischen Verbindung wird als **Elektrolyse** bezeichnet; den zersetzten Körper nennt man **Elektrolyt**, die Drahtenden **Elektroden** und zwar unterscheidet man nach der Richtung des Stromes **Anode** („Hinaufweg“) und **Kathode** („Hinabweg“).

Diese Benennungen sind von *Faraday* (1833) eingeführt worden, während die Wasserzersetzung bereits von *Nicholson* und *Carlisle* (1800) entdeckt wurde.

b. Elektrolyse anderer chemischen Verbindungen.

Bei der Zersetzung einer *binären* (aus 2 Grundstoffen bestehenden) *Verbindung* wird an der Kathode der Wasserstoff oder das Metall ausgeschieden. Beispiele: Zersetzung von Salzsäure (HCl), Chlornatrium ($NaCl$), Chlorsilber ($AgCl$), Jodkalium (KJ).

Auch bei der Zersetzung der *Sauerstoffsalze* scheidet sich das Metall am negativen Pol ab. Ein Beispiel bildet die Elektrolyse des schwefelsauren Kupferoxyds (Kupfervitriol).

Versuch b. Wird der galv. Strom durch eine konzentrierte Lösung von Kupfervitriol geleitet (Fig. 495), so überzieht sich die Kathode mit metallischem Kupfer.

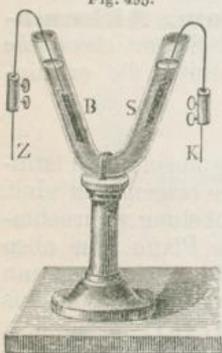
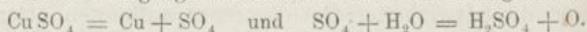


Fig. 495.

Vertauscht man die Pole, so verschwindet der metallische Niederschlag wieder und bildet sich auf der Platte, die jetzt Kathode ist.

Da in den *Sauerstoffsalzen* der Wasserstoff der Säuren durch ein Metall vertreten ist, so kann man sich ihre Zersetzung ebenso vorstellen, wie die der Schwefelsäure bei der Elektrolyse des Wassers. Das durch die Ausscheidung von Kupfer entstehende Anhydrit verbindet sich mit dem Wasser wieder zu Schwefelsäure und der Sauerstoff wird frei. Diese chemischen Vorgänge werden durch die Formeln ausgedrückt:



Ist die Anode ein Metall, das von der Säure angegriffen wird, z. B. Kupfer, so löst es sich in derselben auf und zwar in derselben Menge, in welcher es sich an der Kathode niederschlägt.

Enthält das Salz ein Metall, das durch chemische Verwandtschaft auf das Wasser einwirkt, so entsteht ein sekundärer Vorgang derart, daß das Wasser durch das ausgeschiedene Metall zersetzt wird. Am $-$ Pole sammelt sich dabei statt des Metalles Wasserstoff an. Bei Anwendung von Glaubersalz (Na_2SO_4) z. B. bildet sich auf diese Weise Natronlauge (HNaO), indem das frei gewordene Natrium im Wasser oxydiert, wodurch ein Teil des Wasserstoffs aus dem Wasser frei wird. Da das Anhydrit sich zu Schwefelsäure ergänzt, so wird auch Sauerstoff frei. Die Zersetzungsprodukte sind demnach Wasserstoff und Natronlauge am $-$ Pol, Sauerstoff und Schwefelsäure am $+$ Pol. Eine mit Lackmüstinktur versetzte Glaubersalzlösung färbt sich infolgedessen am $+$ Pole rot, am $-$ Pole blau.

Die Elektrolyse läßt erkennen, daß Flüssigkeiten den Strom in anderer Weise leiten, als Metalle, welche beim Durchgange desselben ihre chemische Beschaffenheit nicht ändern. Mit Ausnahme des Quecksilbers (und der geschmolzenen Metalle) leiten Flüssigkeiten den Strom nur dann, wenn sie zugleich chemisch zersetzt werden; diejenigen Flüssigkeiten, welche nicht zersetzt werden, leiten den Strom auch nicht, z. B. chemisch reines Wasser, Alkohol, Öle.

Bei der Elektrolyse werden immer zwei Bestandteile abgeschieden, von denen jeder an einem bestimmten Pole auftritt. Am negativen Pole erscheinen vorzugsweise Metalle und Wasserstoff (dieselben gehen mit dem Strome).

Faraday hat durch Versuche die elektrolytischen Gesetze aufgefunden:

Die elektrolytische Wirkung ist der Stromstärke proportional. — Durch denselben Strom werden in gleichen Zeiten chemisch gleichwertige Mengen zersetzt.

Beispiel. Derselbe Strom, welcher aus H_2SO_4 (Versuch a) 2H ausscheidet, scheidet aus ZnSO_4 , in welcher Verbindung 2H durch 1Zn vertreten ist, in derselben Zeit 1Zn aus. Aus CuSO_4 würde er 1Cu ausscheiden. Oder, da 1, 65,2 und 63,5 die Verbindungsgewichte für H, Zn und Cu sind, so würden durch denselben Strom in der gleichen Zeit 2 Gewichtsteile H, 65,2 Zn und 63,5 Cu ausgeschieden werden.

Anwendungen der Elektrolyse.

1. Auf dem ersten elektrolytischen Gesetze beruht die *Messung der Stromstärke durch Elektrolyse*. — *Zersetzungsapparate, welche eine genaue Bestimmung der Menge des elektrolytisch abgeschiedenen Stoffes zulassen, heißen Voltameter*. Das gebräuchlichste derselben ist das Knallgasvoltameter (von ähnlicher Einrichtung wie Fig. 494), mittelst dessen die Stromstärke durch die in einer bestimmten Zeit entwickelte Menge von Knallgas gemessen wird. Ein Strom von 1 Ampère entwickelt in 1 Minute 10,44 ccm Knallgas (§ 138). Man kann aber ebenso gut auch aus der Menge von ausgeschiedenem Kupfer oder Silber die Stromstärke bestimmen (Kupfer- und Silbervoltameter).

Im allgemeinen pflegt man jedoch zu Messungen der Stromstärke die magnetische Wirkung des Stromes vorzuziehen (Tangentenboussole, § 136).

2. Die Elektrolyse findet ferner Anwendung bei der *Herstellung eines metallischen Überzuges an irgend welchen Gegenständen (Galvanostegie)*, und bei der eigent-

lichen **Galvanoplastik**, d. h. *der Kunst, von Gegenständen beliebiger Form Abdrücke in Metall zu erhalten.*

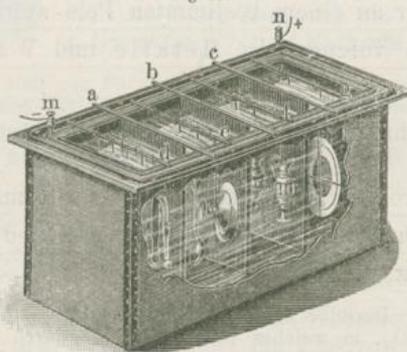
Metallene Gegenstände, welche vergoldet, versilbert, vernickelt oder verzinkt werden sollen, brauchen nur sorgfältig gereinigt zu werden, um eine leitende Oberfläche zu erhalten, während alle anderen Gegenstände zunächst durch Bepinseln mit fein geschlämmtem Graphit auf ihrer Oberfläche leitend gemacht werden müssen. — Zum Zwecke der galv. Nachbildung eines Gegenstandes (Holzschnitt, Büste, Münze oder dergl.) stellt man zunächst eine sogen. Matrize her, d. h. einen Abdruck oder Abguss des Gegenstandes in Wachs, Guttapercha, Gips oder dergl., überzieht die Matrize mit einem leitenden Überzug und setzt sie der Einwirkung des Stromes aus.

Der galv. Niederschlag kann entweder im Elemente selbst oder außerhalb desselben in einem besonderen Gefäße bewirkt werden. Der Thoncyliner eines galvanoplastischen Elementes (A in Fig. 496), welcher auch durch ein Glasgefäß mit durchlässigem Boden (Tierblase, Pergamentpapier) ersetzt werden kann, enthält das Zink in verdünnter Schwefelsäure; unter dem Cylinder wird der betreffende Gegenstand

Fig. 496.



Fig. 497.



am Leitungsdrahte (B) befestigt und in die Metalllösung (sogen. „Bad“) eingetaucht. — Fig. 497 stellt einen

Apparat der zweiten Art dar. Die Gegenstände werden in demselben an Drähten so aufgehängt, daß sie

sämtlich mit dem neg. Pole der Batterie leitend verbunden sind. Damit die Metalllösung ihre ursprüngliche Beschaffenheit möglichst lange behält, bestehen die den Gegenständen gegenüber hängenden und mit dem pos. Pole verbundenen Platten aus dem gleichen Metalle, welches in der Flüssigkeit aufgelöst ist.

Die Galvanoplastik wurde 1839 von *Jacobi in Petersburg* und fast gleichzeitig von *Spencer in Liverpool* erfunden.

Bem. Zur Erzeugung der Ströme werden vielfach Dynamomaschinen und zwar Gleichstrommaschinen (§ 143) verwendet.

3. Eine wichtige Anwendung hat die Elektrolyse neuerdings in der Hüttenindustrie gefunden zur *Ausscheidung von reinen Metallen* aus ihren chemischen Verbindungen (galv. Metallurgie). Auf diese Weise wird besonders Kupfer, Magnesium und Aluminium gewonnen.

Polarisation. Wird bei der Wasserzersetzung der galv. Strom unterbrochen und außerhalb der Flüssigkeit eine leitende Verbindung zwischen den beiden Platinplatten hergestellt, so zeigt ein in den Schließungsbogen eingeschaltetes Galvanoskop einen Strom an, welcher dem ursprüng-

lichen Strome entgegengesetzt gerichtet ist. Derselbe dauert solange an, bis die beiden an den Platinplatten angesammelten Gase wieder in ihre chemische Verbindung (Wasser) übergegangen sind. Während dieses Vorganges verhalten sich die Platten des Zersetzungsapparates wie die Pole eines galv. Elementes; man bezeichnet dieselben deshalb als polarisiert und den entstehenden Strom als Polarisationsstrom. Da in jedem Element eine elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeit stattfindet und somit ein Polarisationsstrom entsteht, welcher dem Hauptstrom entgegengesetzt wirkt und ihn mithin schwächt, so sucht man durch die Anwendung verschiedener Flüssigkeiten die Polarisation möglichst zu beseitigen (Konstante Elemente, § 136).

Infolge der Polarisation ist auch das Ohmsche Gesetz auf Flüssigkeiten nicht ohne weiteres anwendbar, da bei Bestimmung der Stromstärke außer der elektromotorischen Kraft und dem Widerstand noch die Polarisation in Betracht zu ziehen ist.

Akkumulatoren. Wenn man Bleiplatten polarisiert, indem man sie in verdünnte Schwefelsäure bringt und eine Zeit lang einen Strom hindurchsendet, so geben sie nach Unterbrechung des Stromes beim Verbinden durch einen Leiter selbständig einen Strom ab. Man kann somit aus polarisierten Plattenpaaren Elemente herstellen, welche zur Erzeugung eines Stromes geeignet sind. Elemente dieser Art unterscheiden sich von den übrigen wesentlich dadurch, daß sie erst durch einen galv. Strom geladen werden müssen. Sie werden daher sekundäre Elemente genannt. Da in denselben E. zu späterer Verwendung gleichsam aufgespeichert werden kann, bezeichnet man sie als Akkumulatoren (Kraftsammler).

Zu Akkumulatoren sind Bleiplatten, welche in verdünnte Schwefelsäure getaucht werden, besonders geeignet. Wird durch einen solchen Akkumulator längere Zeit ein el. Strom geleitet, so entwickelt sich an der pos. Platte Sauerstoff, welcher das Blei teilweise zu Bleiüberoxyd (PbO_2), d. h. zu einer mit Sauerstoff übersättigten Bleiverbindung oxydiert, die an der Platte als brauner Überzug haftet; an der neg. Platte hingegen tritt Wasserstoff auf. Da dieser sich wieder mit Sauerstoff zu verbinden strebt, so reinigt er die Platte von allem bereits daran haftendem Oxyd. Um die der pos. Platte anhaftende Schicht zu verstärken und den Akkumulator zu einer Stromquelle von längerer Dauer zu machen, wendet man ein von *Planté* (1879) erfundenes Verfahren der Ladung („Formierung“) an. Ein so behandelter Akkumulator erzeugt, wenn man die Bleiplatten durch einen Leitungsdraht verbindet, noch lange nach seiner Ladung einen Strom, welcher kräftigere Wirkungen hervorzubringen vermag als der ursprüngliche Strom, und solange anhält, bis das ganze Überoxyd seinen überschüssigen Sauerstoff wieder abgegeben und sich auf beiden Platten Bleioxyd (Bleiglätte, PbO) gebildet hat. Da die Herstellung eines Akkumulators nach dem *Planté*-Verfahren mehrere Jahre dauert, so werden beide Bleiplatten mit Mennige (Pb_3O_4) überzogen. Läßt man dann den Strom hindurchgehen, so wird der Überzug der pos. Platte durch Aufnahme von Sauerstoff zu Bleiüberoxyd (PbO_2) oxydiert, der Überzug der neg. Platte hingegen durch Abgabe von Sauerstoff zu Blei in schwammartig aufgelockerter Form („Bleischwamm“) reduziert.

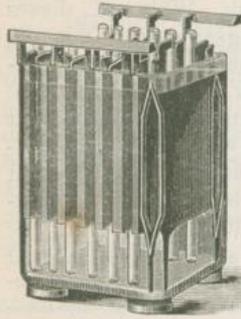
Dieses Verfahren wurde von *Faure* erfunden, ist jedoch neuerdings noch verbessert worden, z. B. durch das *Tudor*-Verfahren.

Fig. 498*) (folg. Seite) zeigt einen aus 3 pos. und 4 neg. Platten bestehenden *Tudor*-Akkumulator in Glasgefäß. Die pos. Platten sowohl als die neg. Platten sind durch

*) Das zur Herstellung gebrauchte Cliché wurde von der Akkumulatorenfabrik Hagen in Westf., welche die *Tudor*-Akkumulatoren anfertigt, freundlichst zur Verfügung gestellt.

eine Bleileiste verbunden und werden durch die zwischen ihnen befindlichen Glasröhren in den geeigneten Abständen erhalten.

Fig. 498.



Die Akkumulatoren haben bereits zu verschiedenen Zwecken wichtige Anwendung gefunden (bei der el. Beleuchtung, Galvanoplastik, Telegraphie), insbesondere sind sie das einzige Mittel zum bequemen Transport el. Kraft ohne Leitung (el. Eisenbahn).

Übungsstoff. 1. Zweck der Metallplatten an den Poldrähnen bei Versuch a und b? — 2. Die Röhre (Fig. 495) sei mit einer durch Lackmus gefärbten Kochsalzlösung gefüllt. Welche Vorgänge werden dann durch den Strom veranlaßt? — 3. Stellt man einen Zinkstab in eine Lösung von Bleizucker (1 Teil Bleizucker oder essigsaures Bleioxyd, 1 Teil Essigsäure und ungefähr 40 Teile W.), so scheidet sich Blei in Blattform ab (Blei- oder Saturnusbaum). Die erste Ausscheidung des Bleies wird durch die gröfsere chemische Verwandtschaft des Zinks bewirkt. Wie läfst sich der Vorgang weiter erklären? — 4. Erkläre die Ersch., dafs sich auf blankem Eisen Kupfer niederschlägt, wenn man es in eine Lösung von Kupfervitriol hält. — 5. Die Abbildungen dieses Buches sind mittelst Kupferplatten (Clichés) gedruckt, welche nach Holzschnitten auf galv. Wege hergestellt werden. Welchen Vorteil bietet dieses Verfahren dem früheren Verfahren gegenüber, bei welchem man die Holzschnitte selbst zum Druck benutzte? — 6. Die beim Aufziehen einer Uhr geleistete mechanische Arbeit ist als Spannkraft gleichsam aufgespeichert und kommt allmählich wieder zur Wirkung. Vergl. diese Wirkung mit der eines Akkumulators! — 7. Inwiefern haben die Akkumulatoren einer el. Beleuchtungsanlage vergleichsweise dieselbe Aufgabe wie das Gasometer einer Gasanstalt oder das Reservoir einer Wasserleitung?

b. Wirkungen auferhalb der Strombahn.

§ 140. Elektromagnetismus. Elektrodynamik. Ampères Theorie.

1. Magnetische Wirkungen. Die magnetischen Wirkungen des galvanischen Stromes sind, wie aus früheren Versuchen hervorgeht (§ 134, b und c.), zweifacher Art: 1. Eine Magnetnadel wird von ihrer Richtung abgelenkt; 2. ein Eisenstab, welchen der Strom in Windungen umkreist, wird magnetisiert.

Der durch den el. Strom erregte Magnetismus wird Elektromagnetismus genannt. Ein durch den Strom magnetisierter Eisenstab heifst Elektromagnet.

Die wichtige Anwendung, welche die Ablenkung der Magnetnadel in den Apparaten zur Messung der Stromstärke findet, wurde in § 136 erörtert. Mit Hilfe der *Ampèreschen Regel* (*Schwimmerregel*), welche die Richtung der Ablenkung angiebt, lassen sich die Pole eines durch den el. Strom magnetisierten Eisenstabes in folgender Weise bestimmen:

Denkt man sich in den Drahtwindungen in der Richtung des $+$ Stromes schwimmend, das Gesicht dem Magnetstabe zugewendet, so ist das zur Linken liegende Ende des Stabes ein Nordpol (Fig. 499, folg. Seite).

Der Südpol wird demnach vom $+$ Strom in einer Richtung

umkreist, die der des

Uhrzeigers entspricht (Fig. 500), der Nordpol dagegen in entgegengesetzter Richtung („Zeigerstrom“ und „Gegenzeigerstrom“).



Fig. 499.

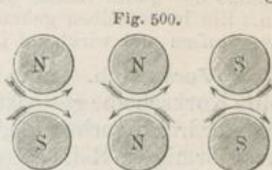


Fig. 500.

Der durch el. Ströme hervorgerufene Magnetismus übertrifft an Stärke bei weitem den durch die kräftigsten Stahlmagnete erregten. Um einen Stahlstab durch den el. Strom möglichst stark magnetisch zu machen, schiebt man ihn in einer mit isoliertem Kupferdraht umwickelten Holzspule, in deren Windungen der Strom kreist, wiederholt hin und her und unterbricht schließlich den Strom, wenn der Stab in der Mitte liegt, oder man magnetisiert den Stab durch den einfachen Strich mittelst eines starken Elektromagnets. Hufeisenförmige Stahlstäbe lassen sich auch dadurch stark magnetisieren, dafs man ihre beiden Enden mit den Magnetpolen eines ebenso gestalteten Elektromagnets, in dessen Drahtwindungen ein kräftiger Strom fließt, auf kurze Zeit in Berührung bringt und sie erst nach Unterbrechung des Stromes wieder entfernt.

Die magnetisierende Wirkung des el. Stromes wird erklärlich, wenn man sich vorstellt, dafs die Massenteilchen (Moleküle) des gewöhnlichen Eisens bereits Magnete bilden, welche indes unregelmäßig gelagert sind und erst durch den Strom eine bestimmte Richtung erhalten. Sie werden nach der Ampèreschen Regel so gedreht, dafs sich ihre Achsen senkrecht zur Ebene der Drahtwindungen, also parallel zur Achse des Eisenstabes richten und zwar alle Nordpole nach links (vergl. auch Fig. 473). Wenn sämtliche Molekularmagnete diese Richtung angenommen haben, so ist die „Sättigung“ erreicht, d. h. der Magnetismus läßt sich nicht weiter steigern. So lange der Eisenkern noch weit von seinem Sättigungspunkte entfernt ist, ist die Stärke des Magnetismus der Anzahl der Drahtwindungen und der Stromstärke proportional; dagegen ist dieselbe von der Dicke und dem Stoffe des Leitungsdrahtes überhaupt unabhängig. Um einen Eisenkern bis zur Sättigung zu magnetisieren, hat der Strom eine gewisse, allerdings nur sehr kurze Zeit nötig.

In weichem Eisen verschwindet der Magnetismus fast ganz wieder, sobald der Strom zu wirken aufhört, ähnlich wie beim Annähern und Entfernen eines Magnetpols. Stahlstäbe behalten nach der Unterbrechung des Stromes einen stärkeren Magnetismus. Diese Verschiedenheit, die Eisen und Stahl beim Magnetisieren zeigen (*Koerzitivkraft*), läßt sich auf den festeren Zusammenhang der Moleküle des Stahles zurückführen.

Mit dem Magnetisieren und Entmagnetisieren findet im weichen Eisen wie im Stahl eine Wärmeentwicklung statt, die man sich durch eine mit der Drehung der Moleküle verbundene innere Reibung erklären kann; sie ist unmerklich, wenn der Strom nur einmal geschlossen wird, steigert sich aber bei rascher Wiederholung dieses Vorganges so bedeutend, dafs schließlich der Eisenkern sich stark erhitzt. Die Wirkung der el. Maschinen wird durch diesen Umstand sehr beeinträchtigt (§ 143).

Magnetisches Feld eines Stromes. Solenoid.

Versuch a. Einen senkrecht gehaltenen Draht, durch den man einen starken Strom leitet, steckt man durch ein horizontal liegendes Kartenblatt, auf welches man feine Eisenfeilspäne siebt. Dieselben werden durch den Einfluß des Stromes zu kleinen Elektromagneten und ordnen sich ringförmig um den Draht.

Der Strom erzeugt somit in seiner Umgebung ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien den Stromleiter ringförmig umschließen.

Biegt man den Schließungsdraht einer Batterie zu einer Schlinge um, so nimmt der ganze Raum, den die Schlinge umschließt, magnetische Eigenschaften an. Ein in denselben gebrachter Magnet wird von dem Stromkreis angezogen oder abgestoßen und wirkt auf ihn selbst anziehend oder abstößend.

Versuch b. Eine Zink- und Kupferplatte werden senkrecht durch eine Korkscheibe gesteckt und ihre oberen Enden durch einen umsponnenen Kupferdraht verbunden, den man in mehreren Windungen zu einer kreisförmigen Rolle biegt. Läßt man die Korkplatte auf verdünnter Schwefelsäure schwimmen, so wird bei Annäherung eines Magnetpoles der Schließungsbogen entweder angezogen oder abgestoßen (*De la Rives Schwimmer*).

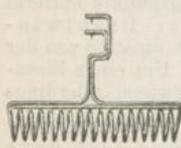
Eine in Form einer Spirale gewundene Drahtrolle, welche von einem Strom durchflossen wird, verhält sich wie ein Magnet.

Die magnetischen Wirkungen einer solchen Spirale, die man ein *Solenoid*¹⁾ nennt, sind weniger kräftig, wie die eines Elektromagnets.

Ein Eisenstab wird bei der Annäherung an ein Solenoid ein Elektromagnet und zwar wird er in die Spirale hineingezogen, da sein genähertes Ende den ungleichnamigen Magnetismus annimmt. Diese Erscheinungen sind leicht verständlich, wenn man sich vorstellt, daß das Solenoid von gleich gerichteten kreisförmigen Strömen durchflossen wird, welche dieselbe Wirkung haben müssen, wie ebenso viele kleine gleich gerichtete Magnete.

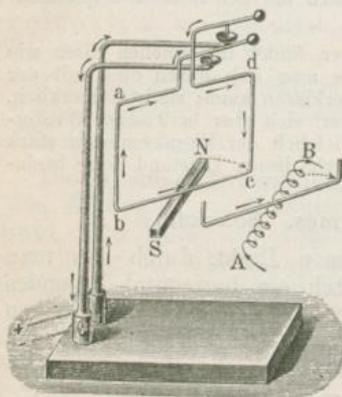
Die Übereinstimmung zwischen einem Solenoid und einem Magnet

Fig. 501.



tritt noch deutlicher hervor, wenn man dasselbe wie eine Magnetnadel frei beweglich aufhängt (Fig. 501) und einen kräftigen Strom hindurchfließen läßt; dann stellt sich der Schraubendraht unter dem Einfluß des Erdmagnetismus in die NS.-Richtung, wobei er nach dem durch Fig. 499 veranschaulichten Gesetze polarisiert erscheint, und wird von einem genäherten Magnet angezogen oder abgestoßen.

Fig. 502.



Zur Aufhängung der Solenoide und anderer kreisförmig oder rechtwinklig gebogener Stromleiter bedient man sich der *Ampèreschen Gestelle* (Fig. 502): die Stromleiter stehen auf 2 Stahlspitzen in stählernen und mit Quecksilber gefüllten Näpfchen, welche von Messingsäulen getragen werden, die mit der Batterie leitend verbunden sind.

Versuch c. Bringt man einen Magnet in die Nähe eines vom Strome durchflossenen Drahtvierecks, so stellt sich letzteres in eine bestimmte Lage und zwar immer so, daß seine Ebene senkrecht zur Achse des Magnets gerichtet ist. Der drehbare Stromleiter wird also durch die Einwirkung eines Magnets ebenso abgelenkt, wie eine Magnetnadel durch einen Stromkreis.

¹⁾ σωλήν (sölēn), Röhre.

In Fig. 502 ist die Richtung des $+$ Stromes durch Pfeile bezeichnet; die punktierten Linien geben die Bewegung des Drahtvierecks an. Wird der Magnet (SN) durch ein Solenoid (AB) ersetzt, so erfolgt ebenfalls eine Drehung des Stromleiters.

2. Elektrodynamische Wirkungen. Da ein Solenoid sich ganz wie ein Magnet verhält, so liegt die Vermutung nahe, daß auch zwei Solenoide in Bezug auf Anziehung und Abstofsung aufeinander einwirken müssen wie zwei Magnete. Diese Vermutung wurde von *Ampère* (1820) durch Experimente bestätigt. Er stellte fest, daß überhaupt jeder galv. Strom auf einen benachbarten Strom anziehend oder abstofsend einwirkt und führte für die Lehre von den Wechselwirkungen galv. Ströme untereinander die Bezeichnung **Elektrodynamik** ein.

Ampère entdeckte folgende Gesetze:

1. Parallele Ströme ziehen sich an, wenn sie gleich gerichtet, sie stoßen sich ab, wenn sie entgegengesetzt gerichtet sind.

Dieses Gesetz gilt auch, wenn die parallelen Stromleiter Teile eines und desselben Stromkreises sind, z. B. Windungen einer Spirale (Übungstoff, Fr. 7).

2. Ströme, die sich unter einem Winkel kreuzen, streben sich so zu stellen, daß sie parallel und gleich gerichtet sind.

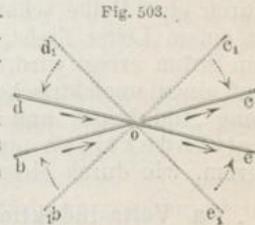
Zwischen Strömen, die gleichzeitig nach der Kreuzungsstelle hin- oder von ihr wegfließen, findet demnach ebenfalls Anziehung statt (Fig. 503); zwischen entgegengesetzt gerichteten dagegen Abstofsung.

Durch die Übereinstimmung zwischen dem Verhalten eines Solenoids und dem eines Magnets wurde *Ampère* zu einer **Theorie des Magnetismus** geführt. Er erklärt die magnetischen Wirkungen durch die elektrodynamischen Wirkungen von Strömen, die im Innern der Körper stattfinden (**Molekularströme**).

Ampère stellt sich einen Magnet als einen Körper vor, dessen Moleküle von el. Strömen umflossen werden; aus der gegenseitigen Einwirkung dieser Molekularströme erklärt er alle magnetischen Erscheinungen. Während im unmagnetischen Eisen die Moleküle regellos durcheinanderliegen und die Molekularströme sich deshalb in ihren Wirkungen nach außen gegenseitig aufheben, erhalten sie durch das Magnetisieren eine parallele Lage und gleiche Richtung; ihre Ebenen stehen dann zur Achse des Magnets senkrecht und sie bewegen sich in denselben bei Betrachtung des Südpols in der Uhrzeigerichtung. (Der Einfachheit wegen kann man sich einen einzigen Strom als Mittelkraft denken, Fig. 499 und 500).

Die Ampèresche Theorie bietet nicht nur eine einfache Erklärung der gegenseitigen Einwirkung von Strömen und Magneten, sondern auch einen Ausgangspunkt für die Lehre von der Einheit der Naturkräfte (§ 147).

Übungstoff. 1. Wie läßt sich aus der Richtung, in der eine Magnethöhle durch den Strom abgelenkt wird, sowie aus der Lage der Pole eines Elektromagnets ein Rückschluß auf die Richtung des Stromes machen, welcher die Wirkung hervorrief? — 2. Hält man unter ein Blatt Papier den Schließungsdraht einer galv. Batterie und streut da, wo der Draht liegt, Eisenfeilspäne auf das Papier, so richten sich diese quer zum Drahte. Erkl.! — 3. Wird eine Glasröhre mit um-



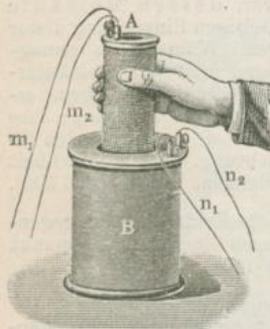
sponnenem Kupferdraht bewickelt (Fig. 504) und durch letzteren ein Strom geleitet, so vermag ein kurzer Eisendraht frei in der Röhre zu schweben. Wie wirkt der Strom auf das Eisenein? (Prinzip der in der Elektrotechnik gebräuchlichen Messapparate für die Stromstärke: *Ampèremeter*). — 4. Warum läßt sich die Stärke eines Elektromagnets nicht über eine gewisse Grenze hinaus steigern? — 5. Inwiefern unterscheiden sich „magnetische Stärke“ und „Tragkraft“ eines Elektromagnets? — 6. Wie erklärt sich die Ersch., daß an einem kupfernen, in Eisenfeilspäne gehaltenen Draht die Späne anhaften, so lange man einen Strom durch den Draht leitet? (Versuch von *Arago*; vergl. Versuch a.) — 7. Eine Spirale aus dünnem Kupferdraht sei mit einem Ende an einem metallenen Ständer so aufgehängt, daß das andere Ende in ein mit Qu. gefülltes Nöpfchen taucht. Wenn man dann die Poldrähte einer galv. Batterie mit dem Ständer und dem Nöpfchen verbindet, so zieht sich die Spirale zunächst zusammen; sobald das untere Ende nicht mehr eintaucht, dehnt sie sich wieder aus, darauf zieht sie sich abermals zusammen u. s. w. Wie erklärt sich diese Ersch.? (*Rogets Spirale*.) — 8. Welche Erschn. treten ein, wenn man eine Deklinationsnadel über ein Solenoid der Länge nach fortbewegt? — 9. Erkläre die einzelnen magnetischen Erschn. durch die Ampèresche Theorie! — 10. In welcher Richtung muß nach der Ampèreschen Theorie die Erde von el. Strömen umkreist werden?



§ 141. Induktion. Die Induktionswirkungen des galv. Stromes wurden von *Faraday* (1831) entdeckt. Er ging bei seinen Folgerungen von den Erscheinungen der el. Influenz aus und fand durch eine Reihe scharfsinniger Versuche, daß durch einen Strom, der in einem Leiter fließt, in einem anderen benachbarten Leiter ebenfalls ein Strom erregt wird, ebenso wie ein el. geladener Körper influenzierend auf einen unelektrischen Leiter einwirkt. *Faraday* nannte diesen Vorgang „Induktion“ und unterschied „Volta-Induktion“ und „Magnet-Induktion“, da sich Induktionswirkungen sowohl durch einen Strom, wie durch einen Magnet hervorbringen lassen.

a. Volta-Induktion. Versuch. 1) *Annähern und Entfernen des Stromes.* Ein zum Nachweis geeigneter Apparat besteht aus 2 Holzspulen (Fig. 505), von denen die engere (A) mit einem ziemlich dicken, die weitere (B) mit einem sehr dünnen und wenigstens 100 m langen isolierten Kupferdraht umwickelt ist; die Enden des dünnen Drahtes (n_1 und n_2) werden mit einem sehr empfindlichen Galvanoskope, die des dicken Drahtes (m_1 und m_2) mit den Polen eines galv. Elementes leitend verbunden. Schiebt man nun die vom Strom umflossene Spule A rasch in die Spule B, so erhält man einen Ausschlag der Nadel des Galvanoskopes, welcher aber nur sehr kurze Zeit andauert. Zieht man darauf die Spule A wieder heraus, so entsteht abermals ein Ausschlag, aber nach der entgegengesetzten Seite. 2) *Schließen und Öffnen des Stromes.* Die angegebene Wirkung erfolgt auch, wenn man den Strom des Elementes schließt und unterbricht, während die Spulen ineinander stecken.

Fig. 505.



St ein Fa

Wird ein in sich geschlossener Leiter einem el. Strome genähert oder von ihm entfernt, oder wird ohne Änderung der Lage des Leiters der Strom geschlossen oder geöffnet, so entsteht im Leiter ein Strom von kurzer Dauer: **Volta-Induktion.**

Induktionsströme, welche durch *Öffnen* und *Schließen* des Hauptstromes hervorgerufen werden, sind stets von unmeßbar kurzer Dauer, während ihre Dauer bei *Annäherung* und *Entfernung* des Leiters von der Dauer dieser Bewegung abhängig ist. Auch durch bloße *Veränderung der Stärke* des Hauptstromes werden in einem benachbarten Leiter Induktionsströme erzeugt, deren Stärke und Dauer von der Größe jener Veränderungen abhängt.

An der Ablenkung der Galvanometernadel erkennt man, daß der bei Annäherung der Spule oder beim Schließen oder Verstärken des Hauptstromes entstehende Induktionsstrom eine dem Hauptstrom entgegengesetzte Richtung hat, während der beim Entfernen der Spule oder beim Öffnen oder Schwächen des Stromes entstehende mit dem Hauptstrom gleich gerichtet ist.

Um durch schnelle Unterbrechung und Schließung des Hauptstromes Induktionsströme in rascher Aufeinanderfolge hervorzubringen, bedient man sich besonderer Unterbrechungsvorrichtungen, z. B. des *Wagnerschen Hammers* (Seite 374).

Durch geeignete Versuche läßt sich nachweisen, daß auch in den Drahtwindungen des Hauptstromes selbst beim Schließen und Öffnen desselben Induktionsströme, sogen. **Extraströme**, entstehen, indem jede Windung auf die benachbarten Windungen induzierend einwirkt. Da der Schließungsstrom dem Hauptstrom entgegengesetzt, der Öffnungsstrom ihm aber gleich gerichtet ist, so muß ersterer den Hauptstrom schwächen, letzterer ihn dagegen verstärken. Die Verstärkung giebt sich durch den größeren Öffnungsfunken zu erkennen (bei f, Fig. 506; siehe ferner Frage 7).

b. Magnet-Induktion. Versuch. Schiebt man statt der Drahtrolle (A) einen Stabmagnet in die Induktionsspule (B) und zieht ihn wieder heraus, oder nähert man den Magnetpol dem einen Ende eines in die Spule gesteckten Eisenkerns bis zur Berührung und entfernt ihn wieder, so erhält man Wirkungen, wie die durch den galv. Strom hervorgebrachten.

Ein Magnet vermag wie ein el. Strom in einem geschlossenen Elektrizitätsleiter Induktionsströme hervorzurufen: **Magnet-Induktion.**

Jede Änderung im Zustande eines magnetischen Feldes, gleichviel ob dasselbe durch eine vom Strom durchflossene Drahtrolle oder durch einen Magnet erzeugt wird, ruft nach diesen Erscheinungen Induktionsströme hervor. Durch Magnete werden Ströme induziert nicht nur bei Bewegung des Magnets, sondern auch bei Bewegung des geschlossenen Leiters im magnetischen Felde.

Die durch Magnetinduktion, insbesondere durch Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde erzeugten Ströme haben bei der Konstruktion der magnetoelektrischen Maschinen (§ 143) eine äußerst wichtige Anwendung gefunden. Da nach der *Ampèreschen Theorie* ein Magnet von gleich gerichteten Molekularströmen umkreist wird und sich also wie eine von einem Strome durchflossene Drahtspule verhalten muß, so ergiebt sich aus der Richtung dieser Molekularströme sofort die der Induktionsströme: bei Annäherung eines Südpoles haben die Induktionsströme die der Uhrzeigerichtung entgegengesetzte Richtung, bei Annäherung eines Nordpols dagegen die gleiche Richtung. (Bei Entfernung eines Südpoles oder eines Nordpols ändern sich die Stromrichtungen.)

Indem man das *Ampèresche Gesetz* über die gegenseitige Einwirkung paralleler Ströme von gleicher oder entgegengesetzter Richtung zu Hilfe nimmt, läßt sich eine einfache Regel über die Richtung der Induktionsströme in diesen verschiedenen Fällen in folgender Form aussprechen:

Die durch Bewegung von Stromleitern oder Magnetpolen erzeugten Induktionsströme haben stets eine solche Richtung, daß die elektrodynamischen Anziehungs- oder Abstofsungskräfte auf die Bewegung hemmend einwirken: **Gesetz von Lenz** (1834).

Außer dem *Lenz'schen Gesetz* dient zur Bestimmung der Richtung der Induktionsströme auch die von *Faraday* angegebene Regel: Man denkt sich mit den Kraftlinien schwimmend, mit dem Gesicht nach der Bewegung des Leiters gewendet, so fließt der Induktionstrom nach rechts.

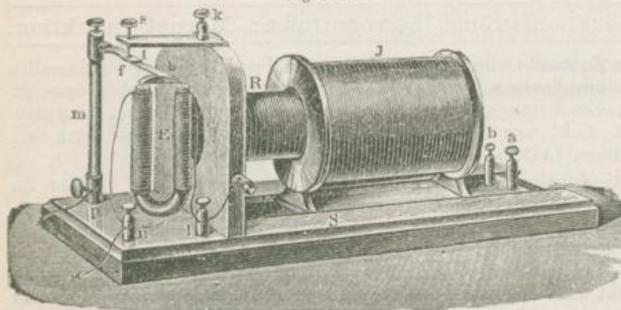
Wirkungen der Induktionsströme. Durch Induktionsströme lassen sich nicht nur alle Wirkungen der Batterieströme, sondern auch, da sie eine weit größere Spannung als die letzteren haben, die Erscheinungen der Reibungs-E. hervorrufen. Induktionsströme vereinigen überhaupt die Eigenschaften beider Elektrizitäten in sich und zeichnen sich namentlich durch physiologische und mechanische, sowie durch Licht- und Wärmewirkungen aus.

Die physiologischen Wirkungen der Induktionsströme sind so kräftig, daß sie leicht zum Nachweis der Induktionselektrizität benutzt werden können. Befestigt man z. B. an den Drahtenden der Induktionsspule metallene Handgriffe, so empfindet man bei Berührung Zuckungen in den Handgelenken, welche beim Öffnen des Stromes (infolge des Extrastromes) am stärksten und überhaupt um so kräftiger sind, je schneller die Stromunterbrechungen aufeinanderfolgen.

Ein gleichmäßig andauernder Batteriestrom von mäßiger Stärke wirkt auf unsere Nerven nicht merklich ein, so daß er nur im Augenblicke des Entstehens oder Verschwindens oder bei einer Veränderung der Stromstärke empfunden wird. Die Induktionsströme sind an sich von sehr kurzer Dauer und da sie durch geeignete Stromunterbrecher in schneller Aufeinanderfolge hervorgerufen werden können, wirken sie sehr stark auf die Nerven ein. Es erhöht die Wirkung, wenn in der Höhlung der Hauptspule ein Stab aus weichem Eisen oder noch besser ein Bündel isolierter (gefirnifster) Eisendrähte steckt. Im Augenblicke des Schließens nämlich wird das Eisen magnetisch und wirkt — wie aus den Versuchen unter b hervorgeht — ebenso wie der Hauptstrom. Beim Öffnen des Hauptstromes verschwindet mit diesem auch der Magnetismus des Eisens wieder.

Wegen ihrer Einwirkung auf die Nerven werden die Induktionsströme zu

Fig. 506.



Heilzwecken verwendet. Die Induktionsapparate, deren man sich für diese Zwecke gewöhnlich bedient (*Schlittenapparat von Du Bois-Reymond*, Fig. 506), sind meist so eingerichtet, daß die Induktionsspule (J) zur Regulierung der Stärke des Induktionsstromes über die Hauptspule (R) hinweggeschoben werden kann. Zum

schnellen Schließen und Öffnen des Hauptstromes dient ein *Selbstunterbrecher (Wagnerscher Hammer)*. Dieser besteht aus einem Elektromagnet (E), dessen Anker an einer dünnen metallenen Feder befestigt ist, welche gegen eine mit der Hauptspule leitend verbundene Schraube stößt. Sobald nun der bei n eintretende Strom durch die Windungen der Hauptspule hindurchfließt, wird der Anker vom Elektromagnet angezogen. Dadurch wird der Strom bei f unterbrochen, die Feder schlägt wieder zurück, schließt den Strom abermals u. s. w.

Kräftigere Wirkungen geben die Induktionsapparate mit Kondensator (*Ruhmkorffsche Funkeninduktoren*). Bei denselben haben die Spulen eine feste Lage und der beim Unterbrechen des Hauptstromes entstehende Extrastrom wird in einen Kondensator geleitet, der nach Art einer Franklinschen Tafel eingerichtet ist und sich jedesmal beim Schließen des Hauptstromes entladet. (Die eine Belegung des Kondensators ist mit k , die andere etwa mit p , Fig. 501, leitend zu verbinden.) Die Induktionsrolle wird aus sehr vielen Windungen dünnen Drahtes hergestellt und die Leitung zwischen den Drahtenden durch eine Luftstrecke unterbrochen; die in dem Drahte fließenden entgegengesetzten Elektricitäten erreichen dadurch eine so hohe Spannung, daß sie den Zwischenraum in Form eines Induktionsfunken überspringen. Apparate dieser Art mit einem etwa 60 km langen Induktionsdrahte geben Funken bis zu $\frac{1}{2}$ m Länge. Ebenso lassen sich durch Funkeninduktoren alle anderen Erscheinungen, zu denen eine große Spannung der E. gehört, in überraschender Weise ausführen, z. B. werden Nichtleiter (Glasplatten, Papier) durchbohrt, leicht brennbare Gegenstände (trockenes Holz, Äther, Leuchtgas) entzündet, die Luft wird unter starker Ozonbildung verändert, wenn der Induktionsfunke hindurchgeht. Besonders auffällig sind die prachtvollen Lichterscheinungen, die der Induktionsstrom in verdünnter Luft oder in Gasen erzeugt, wenn er durch die *Geißlerschen Röhren* (Glasröhren mit eingeschmolzenen Platindrähten) geleitet wird. Indes sind diese merkwürdigen Erscheinungen (Verschiedenheit der Lichtfülle am $+$ und $-$ Pol, eigentümliche Schichtungen, Einfluß eines genäherten Magnets) noch nicht genügend erklärt.

Übungsstoff. 1. Warum können zu Induktionsspulen dünnere Drähte benutzt werden, als zu den Hauptspulen? — 2. Welchen Vorteil gewährt dies für die Erzeugung starker Induktionsströme? — 3. Nach der Stärke der physiologischen Wirkung läßt sich unter sonst gleichen Umständen die Dauer der Induktionsströme ungefähr beurteilen; inwiefern? — 4. Wie gelangt der bei p (Fig. 501) in den Induktionsapparat eintretende galv. Strom nach n ? — 5. Wie erklärt sich die Stromunterbrechung? — 6. Ist bei einem Induktionsapparate ohne Kondensator die Induktionsspule nicht verschiebbar, so wird das in der Hauptspule steckende Eisen-drahtbündel mit einer verschiebbaren Messinghülse umgeben; w.? — 7. Wenn man die Enden der Hauptspirale R , Fig. 501 (etwa k und l), durch einen Draht verbindet (Nebenschließung), so werden die Funken bei f bedeutend schwächer. Erkl.! — 8. Inwiefern können die Induktionswirkungen zwischen benachbarten Leitungsdrähten beim Telegraphieren und Telephonieren (§ 142) Störungen im Betriebe veranlassen?

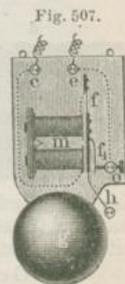
Technische Anwendung des Elektromagnetismus und der Induktion.

§ 142. Elektrische Klingel und Uhr. Telegraph. Telephon und Mikrophon.

1) **Elektrische Klingel.** Um durch den galv. Strom einfache Glockensignale zu geben, benutzt man den Selbstunterbrecher (Fig. 507). Vor dem Elektromagnet (m) desselben ist an einer elastischen Feder (f) ein Anker befestigt, der den Stromschluß herstellt, indem er mit dem federnden Streifen f_1 die Schraube o berührt. (Die Drähte der Klemmen c und e führen zur Batterie.)

Indem der Anker vom Elektromagnet angezogen wird und der Hammer h an die Glocke schlägt, ist der Strom unterbrochen, da die auf dem Anker befestigte Feder f_1 dann die Schraube o nicht mehr berührt. Der Anker schnell zurück, berührt die Feder wieder, schließt dadurch von neuem den Strom und wird infolgedessen abermals angezogen. Hierdurch wird der Strom wieder unterbrochen u. s. w.

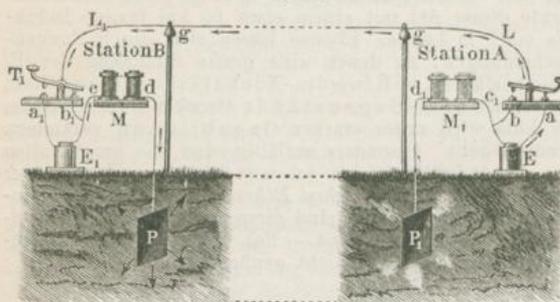
Elektrische Uhren sind Zeigerwerke, die durch den galv. Strom in übereinstimmendem Gange mit einer Normaluhr (Pendeluhr) gehalten werden. Man



erreicht dies dadurch, daß die Normaluhr etwa in jeder Minute einmal einen Stromleiter schließt und der Stromschluß durch einen Elektromagnet auf einen Anker einwirkt, wodurch ein Zahnrad um einen Zahn fortbewegt wird. Die Bewegung des Zahnrades rückt den Minutenzeiger, dessen Bewegung sich durch ein Räderwerk auf den Stundenzeiger überträgt.

2) **Telegraph.** Die magnetische Wirkung des galvanischen Stromes findet ihre wichtigste Anwendung in der **Telegraphie**. Jeder Telegraph

Fig. 508.



In Fig. 508 sind durch E und E₁ zwei Elemente dargestellt, welche die den Strom erzeugenden Batterien der Stationen A und B andeuten; P und P₁ stellen zwei mit den Batterien verbundene und in den Boden eingegrabene Metallplatten dar, T und T₁ die Zeichengeber, M und M₁ die Zeichenempfänger, L und L₁ die Drahtleitung; die Pfeile endlich geben die Stromrichtung für den Fall an, daß von A nach B telegraphiert wird.

Der Stromerzeuger. Zur Erzeugung des Stromes werden Batterien von sehr konstanten Elementen angewandt und zwar entweder die Meidinger-Krügerschen Kupferelemente (Zinkcylinder in einer Lösung von Zinkvitriol und eine Kupfer- oder Bleiplatte in Kupfervitriol) oder Zinkkohlenelemente (Zink und Kohle mit Salmiakfüllung). Versuche, die man in den letzten Jahren angestellt hat, haben ergeben, daß auch Akkumulatoren sich mit Vorteil für den telegraphischen Betrieb verwenden lassen. Die Zahl der zu einer bestimmten Leitung erforderlichen Elemente oder Akkumulatorzellen richtet sich hauptsächlich nach der Länge der Leitung; man rechnet durchschnittlich für je 5 km Leitung 1 Element und für den Betrieb eines Morseapparates 9 Elemente.

Die Leitung besteht aus verzinktem Eisendraht oder aus Kupfer-

Fig. 509.

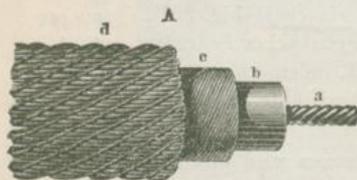
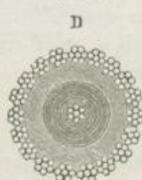


Fig. 510.



eine eigentliche Rückleitung des Stromes ist überflüssig, da es genügt, den anderen Pol der Batterie mit einer großen, in die feuchte Erde versenkten Kupferplatte leitend zu verbinden.

Die Geschwindigkeit, mit welcher der galv. Strom in den Telegraphendrähten sich fortpflanzt, ist der geringen Spannung der Berührungs-E. entsprechend bedeutend geringer als die, welche man für den Entladungsstrom der Rei-

(Fig. 508) besteht im wesentlichen aus 4 Teilen: 1) dem *Stromerzeuger*, 2) der *Leitung*, welche die Aufgabestation mit der Empfangsstation in der Weise verbindet, daß der Strom beliebig geschlossen und unterbrochen werden kann, 3) dem *Zeichengeber*, 4) dem *Zeichenempfänger*.

wöhnlich Glocken aus Porzellan (g, Fig. 508), bei unterirdischen und unterseeischen Leitungen Hüllen aus Guttapercha und geteertem Hanf, die zum Schutz gegen äußere Beschädigungen mit Stahldrähten umgeben sind (Fig. 509 und 510). Zwischen zwei Stationen ist nur ein Leitungsdraht erforderlich;

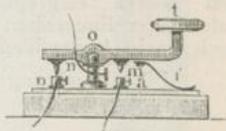
bungs-E. gefunden hat; bei längeren Leitungen verfließt sogar eine merkliche Zeit, ehe sie vom Strom durchlaufen werden. Man nennt diese Zeit die *Ladungszeit* und hat gefunden, daß sie dem Quadrat der Drahtlänge direkt proportional ist, d. h. daß z. B. in einem 3mal so langen Draht der Strom erst nach einer 9mal so langen Zeit seine Wirkung äußert. Da die Ladungszeit außerdem vom Stoff, von der Form und Dicke des Drahtes abhängig ist, so kann die Geschwindigkeit des galv. Stromes immer nur bedingungsweise angegeben werden (etwa 25 000 km in der Sek.).

Man unterscheidet *Druck-, Zeiger- und Nadel-Telegraphen*. Bei den ersteren wird die elektromagnetische Wirkung auf weiches Eisen, bei dem Nadel-Telegraphen die Ablenkung der Magnetsnadel durch den el. Strom angewandt. Der gebräuchlichste Telegraph ist der

Morsesche Zeichendruck-Telegraph.

a. Der Zeichengeber (Fig. 511) bildet einen zweiarmigen metallenen *Hebel*, Taster oder Schlüssel genannt, der so in die Leitung eingeschaltet wird, daß der Strom durch einen Druck auf den Knopf (t) des einen Hebelarmes geschlossen werden kann. Eine unter diesem Arme angebrachte Feder (f) bringt den Hebel, sobald der Druck aufhört, wieder in seine anfängliche Lage zurück.

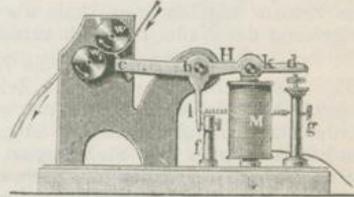
Fig. 511.



Befindet sich der Taster in seiner Ruhelage (vergl. Fig. 508, Station B), so ist die Batterie aus der Linienleitung ausgeschaltet und diese nur mit dem Zeichenempfänger und der Erdleitung beider Stationen verbunden; von dieser Station geht also kein Strom durch die Linie. Um die Batterie in die Leitung einzuschalten, braucht nur der Taster niedergedrückt zu werden (Station A), wodurch der Stromschluß hergestellt wird. Man nennt dies das Telegraphieren mit *Arbeitsstrom*, während beim Telegraphieren mit *Ruhestrom* für gewöhnlich ein Strom durch die Linie geht und das Zeichengeben in einer Unterbrechung desselben besteht.

b. Der Zeichenempfänger (Fig. 512) besteht 1) aus einem *Hebel* (H), dessen einer Arm mit einem eisernen Anker (k) und dessen anderer Arm mit einem Stahlstifte (c) versehen ist, 2) aus einem *Elektromagnet* (M) und 3) aus zwei durch ein Uhrwerk bewegten *Walzen*, zwischen denen ein Papierstreifen liegt, der mit gleichförmiger Geschwindigkeit langsam fortgeschoben wird. Sobald der Strom die beiden Eisenkerne des Elektromagnets (M) umkreist, wird der Anker angezogen und der Stift prägt eine Vertiefung in den Papierstreifen. Wird der Strom unterbrochen, so zieht eine (den Seitenarm l des Hebels mit der Säule g verbindende) Spiralfeder den Hebel wieder zurück. Je nachdem nun der Druck auf den Taster sofort wieder aufhört oder kurze Zeit andauert, entsteht auf dem Papierstreifen ein Punkt oder ein Strich. Aus Punkten und Strichen ist das ganze Alphabet zusammengesetzt. Beispiel:

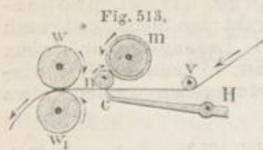
Fig. 512.



B i t t e u m A n t w o r t

.....

In neuerer Zeit hat man die Zeichenempfänger des Morseschen Telegraphen so eingerichtet, daß statt der Eindrücke farbige Zeichen auf dem Papierstreifen entstehen. Zu diesem Zwecke sind die drei Walzen *m*, *n* und *v* (Fig. 513) angebracht. Erstere ist mit einem Filzstreifen überzogen, welcher mit Farbstoff getränkt wird. Dadurch nimmt die anliegende Walze ebenfalls Farbstoff an, sodafs es nur eines geringen Druckes durch den Hebel (*H*) bedarf, um auf dem zwischen *n* und dem Stütze *c* des Hebels sich fortbewegenden Papierstreifen farbige Punkte und Striche hervorzurufen. Derartige Apparate („Farbschreiber“) sind in der deutschen Reichstelegraphie jetzt eingeführt.



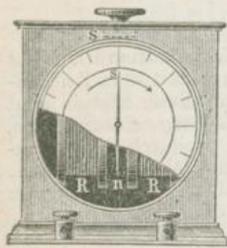
Zeiger- und Nadeltelegraph.

Bei den Zeigertelegraphen wird durch den Strom ein Zeiger gehemmt, der sich vor einem Zifferblatt, auf dem die Buchstaben des Alphabets und die Zahlen stehen, gleichmäfsig dreht.

Die Zeigertelegraphen stehen in der Schnelligkeit der Zeichengebung hinter den anderen Telegraphen sehr zurück. Da sie durch die Fernsprechapparate auch betreffs der Einfachheit des Gebrauchs weit übertroffen werden, so finden sie nur noch wenig Anwendung.

Die Einrichtung der Nadeltelegraphen beruht auf der Ablenkung der

Fig. 514.



Magnetnadel durch den galv. Strom. Der Zeichenempfänger bildet einen Multiplikator mit senkrechter Nadel, welche die Zeichen durch Ausschläge anzeigt (Fig. 514). Um Ausschläge nach rechts und links bewirken zu können, ist der Zeichengeber als Stromwender eingerichtet.

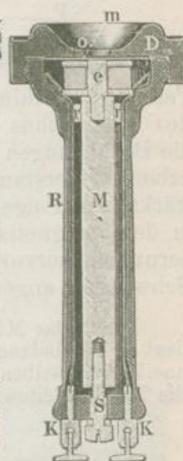
Nadeltelegraphen sind hauptsächlich bei der unterseeischen (transatlantischen) Telegraphie im Gebrauche. Auf der äußerst empfindlichen horizontalen Nadel ist ein kleiner Spiegel befestigt. Diesem gegenüber ist in einem Abstände von etwa 1 m ein mit einem schmalen Spalt versehener Schirm aufgestellt, durch den von einer Lampe ein Lichtstreifen auf den Spiegel fällt. Das vom Spiegel zurückgeworfene Licht ist auf einer über dem Schirm angebrachten Skala als helle Linie sichtbar, die durch die geringste Ablenkung der Nadel merklich verschoben wird (*Thomsons Spiegelgalvanometer*).

Der erste elektromagnetische Telegraph ist in *Göttingen* von *Gauß* und *Weber* (1833) eingerichtet worden. Als Zeichengeber diente ein Stahl- und ein Elektromagnet, als Zeichenempfänger ein wagerecht aufgehängter Magnetstab. Letzterer wurde durch Induktionsströme abgelenkt, die man dadurch erzeugte, daß man den Elektromagnet dem Stahlmagnet näherte und ihn wieder entfernte. Die beiden Leitungsdrähte verbanden die Sternwarte und das physikalische Kabinett der Universität. — 1837 machte *Steinheil* in *München* die Entdeckung, daß die eine der beiden Drahtleitungen durch die Erdleitung ersetzt werden kann. Von *Steinheil* wie auch von *Wheatstone* (spr. Uihstohn) sind (1837) die ersten für den praktischen Gebrauch geeigneten Nadeltelegraphen hergestellt worden. Letzterer erfand 1840 auch den Zeigertelegraphen. — Von 1837 bis 1844 wurde von *Morse* in *Newyork* der Zeichendruck-Telegraph und ungefähr 20 Jahre später von *Hughes* (spr. Juhs) der Typendruck-Telegraph erfunden. Letzterer giebt die Zeichen gleich in gewöhnlicher Druckschrift wieder. Der Typendrucktelegraph, der nur auf den Hauptlinien des deutschen Reiches in Gebrauch ist, sowie andere für den Telegraphendienst wichtige Erfindungen können hier nicht näher beschrieben werden. Solche Erfindungen sind: das Relais, das durch den Farbschreiber für kürzere Leitungen entbehrlich geworden ist (vergl. Übungsstoff, Frage 6); die automatischen Übertrager, die selbstthätig die Depesche auf einen Papierstreifen übertragen; die Methoden des Doppelsprechens und Gegensprechens, mittelst

deren man auf einem Drahte mehrere Depeschen gleichzeitig befördern kann u. s. w. Um die Entwicklung der Telegraphie namentlich auch der unterseeischen, haben sich die Gebrüder Siemens (*Werner Siemens*, † 1892 in Berlin, *William Siemens*, † 1883 in London) große Verdienste erworben. Die erste Kabellegung zwischen Europa und Amerika wurde 1866 glücklich ausgeführt (ein 1857 gelegtes Kabel zerrifs).

3) **Telephon und Mikrophon.** Das *Telephon von Bell* (1876) besteht aus einem Stahlmagnet (M, Fig. 515), der in einer mit trichterförmigem Mundstück versehenen Hülse von Holz oder Hartgummi steckt. Auf das vordere Ende des Magnets ist eine Induktionsrolle geschoben und nahe vor demselben ist eine dünne elastische Platte (m) von weichem Eisen befestigt, die in Schwingungen gerät, sobald man in das Mundstück hineinspricht. Zeichengeber und Zeichenempfänger haben dieselbe Einrichtung und sind durch Leitungsdrähte miteinander verbunden. Die Schwingungen der Platte des Zeichengebers bringen Änderungen in dem Zustande des magn. Feldes hervor, die in den Drahtwindungen der Rolle Induktionsströme erzeugen. Diese pflanzen sich bis zum Empfangstelephone fort und bewirken hier umgekehrt, indem sie den Magnetpol umkreisen, entsprechende Änderungen in dem magn. Zustande desselben, durch welche wieder die zugehörige Eisenplatte in die gleichen Schwingungen versetzt wird. Auf diese Weise werden im Telephone der Empfangsstation die Töne hörbar, die in das Telephon der Aufgabestation gesprochen wurden.

Fig. 515.



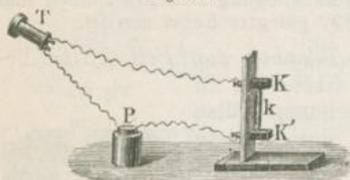
Das *Bellsche Telephon* muß beim Sprechen nahe vor den Mund und beim Hören dicht an das Ohr gehalten werden. Da die Deutlichkeit der gehörten Worte außerdem von der Aussprache und Betonung sehr abhängig ist, hat *Siemens* eine Verbesserung dadurch angestrebt, daß er statt des einfachen Stabmagnets einen Hufeisenmagnet mit mehreren Induktionsrollen und größerer Polfläche anwendete. Bei dieser Einrichtung sind Worte, die in gewöhnlicher Stärke gesprochen werden, auch in einiger Entfernung vom Schalltrichter noch deutlich zu verstehen. Das Anrufen zum Sprechen geschieht gewöhnlich durch Glockensignale, die mittelst einer el. Klingel gegeben werden.

Durch das Telephon ist ein direkter sprachlicher Verkehr auf weite Entfernungen in einfachster Weise ermöglicht. Die ersten erfolgreichen Versuche, einen Schall auf elektrischem Wege zu übertragen, wurden bereits 1861 von *Reis* angestellt; mittelst des von ihm erfundenen Telephons konnten indes nur musikalische Töne und einzelne Worte übertragen werden. Die vollständige Verwirklichung der Idee von *Reis* gelang durch das von *Bell* (1876) erfundene Telephon. Aber erst durch die Verbindung des Telephons mit dem Mikrophon ist es möglich geworden, auf sehr weite Entfernungen hin deutlich zu sprechen.

Das **Mikrophon** ist eine Vorrichtung, durch die mit Hilfe des galv. Stromes Töne und Worte und auch sehr leise, an und für sich vollständig unhörbare Geräusche so verstärkt werden können, daß sie durch ein in die Stromleitung eingeschaltetes Telephon auf große Entfernung hin deutlich hörbar sind. Das Mikrophon wurde erfunden von *Hughes* (1878) und besteht aus einem kleinen, senkrecht stehenden Resonanzboden (Fig. 516, folg. Seite), auf dem zwei Stäbchen (K und K₁) von harter Kohle befestigt sind; zwischen diesen ist ein an beiden Enden

zugespitztes Kohlenstäbchen (k) lose aufgestellt. Auf der Rückseite des Resonanzbodens sind zwei Klemmschrauben angebracht und mit jenen beiden Kohlenstäbchen leitend verbunden.

Fig. 516.



In die Leitung wird eine galv. Batterie (P) und ein Telefon (T) eingeschaltet. Spricht man nun leise gegen den Apparat, streicht mit einem feinen Haarpinsel über den Resonanzboden oder legt eine aufgezogene Taschenuhr darauf u. s. w., so sind selbst diese ganz schwachen Geräusche durch das Telefon weithin hörbar und werden sogar noch verstärkt. — Die Wirkung des Mikrophons erklärt sich daraus, daß durch die Schallwellungen die Berührungen der Kohlenstäbchen sich ändern. Diese Veränderungen haben Widerstandsänderungen, mithin auch Änderungen in der Stromstärke zur Folge. Durch die Änderung der Stromstärke aber werden in dem magnetischen Zustande des Telefonmagnets entsprechende Änderungen hervorgerufen, wodurch die Eisenplatte des Telefons zum Schwingen angeregt wird.

Auch das Mikrophon ist neuerdings noch mehrfach verbessert worden und dient in Verbindung mit dem verbesserten Telefon dem Fernsprechverkehr sowohl innerhalb derselben Stadt als auch auf Entfernungen von Hunderten von Kilometern (die Telephonleitung Newyork-Chicago ist über 1500 km lang). Bei der in Fig. 517

Fig. 517.

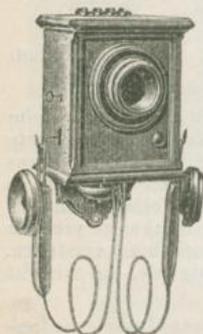
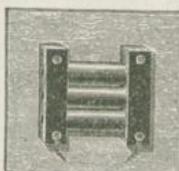


Fig. 518.



dargestellten Einrichtung ist das Mikrophon in ein Gehäuse eingeschlossen, dessen vordere Wand den Schalltrichter enthält. Dicht hinter dem Schalltrichter liegt die den Resonanzboden bildende dünne Platte mit den zugehörigen Kohlenstäbchen (Fig. 518). Von den beiden nur zum Hören dienenden Telefonen wird für den Ortsverkehr nur eins benutzt, während für sehr große Entfernungen beide zugleich angewandt werden. Unter dem Gehäuse ist die Signalglocke angebracht. — Die angeschlossenen Geschäftshäuser einer Stadt sind mit einer Centralstation leitend verbunden. Dieser wird zunächst durch Angabe einer bestimmten Nummer mitgeteilt, mit wem man sprechen will. Ist dies geschehen, so werden auf der Centralstation durch eine mechanische Vorrichtung („Klappenschrank“) die nach den beiden Geschäftshäusern führenden Drähte miteinander in leitende Verbindung gebracht.

Übungsstoff. 1. Welche wichtigen Entdeckungen mußten vorangehen, ehe die jetzt gebräuchlichen el. Telegraphen erfunden werden konnten, und welche waren für den von Gauss und Weber eingerichteten Telegraphen besonders wichtig? — 2. Geib den Lauf des el. Stromes an für den Fall, daß von Station B (Fig. 508) nach Station A telegraphiert würde. — 3. Da im Eisenkern eines Elektromagnets beim Öffnen des Stromes stets etwas Magnetismus zurückbleibt, so würde es störend wirken, wenn der Anker des Zeichenempfängers beim Telegraphieren die Eisenkerne berührte. Wodurch wird dies nach Fig. 512 verhütet? — 4. Zweck der beiden wagerechten Schrauben in den Säulen f und g? — 5. Welche Vorzüge hat der Schreibtelegraph vor dem Nadel- oder Zeigertelegraphen? — 6. Bei langen Leitungen ist zum Betriebe eines Morseschen Stiftschreibers auf der Empfangsstation ein Relais nötig, d. h. eine Vorrichtung, die aus einem äußerst leicht bewegbaren Hebel besteht, der, sobald der Strom der sogen. Linienbatterie wirkt, durch einen Elektromagnet angezogen wird und eine kleine Lokalbatterie schließt; der

Strom der letzteren setzt dann den Zeichenempfänger in Thätigkeit. Warum ist bei den Farbschreibern das Relais entbehrlich? — 7. Wie ist es zu erklären, daß ein unterseeisches Kabel ähnlich wie eine Leydener Flasche als Kondensator wirken kann, und weshalb wird die dadurch bewirkte Verzögerung des Signals bei Anwendung schwacher Ströme geringer sein? — 8. Inwiefern findet beim Telephon eine Umkehrung von Ursache und Wirkung statt? — 9. Durch welche Eigenschaften der Kohle ist es zu erklären, daß sie sich von allen Leitern am besten zur Herstellung des Mikrophons eignet?

§ 143. Magnetelektrische und Dynamo-Maschinen. El. Kraftübertragung. Faradays Entdeckung, daß in einem geschlossenen Stromkreise ein el. Strom entsteht, wenn sich der Stromkreis in einem magnetischen Felde bewegt, bildete den Ausgangspunkt zur Erfindung von Vorrichtungen, mittelst deren man kräftige Ströme durch mechanische Arbeit erzeugen kann. Man nennt dieselben elektrische Maschinen und unterscheidet magnetelektrische und dynamoelektrische Maschinen.

a. Magnetelektrische Maschinen. Eine der ältesten und einfachsten ist der *magnetelektrische Induktionsapparat von Stöhrer* (Fig. 519). Er besteht aus einem kräftigen Hufeisenmagnet, vor dessen Polen ein Anker in schnelle Umdrehung versetzt wird. Jeder der beiden Eisenkerne des Ankers ist von einer Induktionsrolle (C und D) umgeben; in den Windungen dieser Rollen entstehen Ströme von entgegengesetzter Richtung, wenn die Eisenkerne bei der Drehung vor den Polen des Magnets ihre Pole wechseln. Die Ströme werden durch Drähte in die beiden Handgriffe (P und Q) weiter geleitet und durch einen Stromwender (F) oder Kommutator in solche von gleicher Richtung verwandelt.

Bem. Die Beschreibung des Stromwenders soll übergangen werden, da die magnetelektrischen Maschinen mit Stromwender keine Bedeutung mehr haben.

Um die Stärke der induzierten Ströme zu steigern, wendete man mehrere Magnete und Induktorrollen an und versetzte die letzteren durch Dampfkraft in sehr schnelle Umdrehung (Maschinen zur Erzeugung von el. Licht auf Leuchttürmen).

Eine wirksamere Konstruktion erfand *Werner Siemens*, indem er dem Anker eine zweckmäßigere Form gab. Der von ihm benutzte Anker war walzenförmig und der Länge nach zur Aufnahme der zahlreichen Windungen des Induktionsdrahtes mit zwei Ausschnitten versehen: **Doppel-T-Anker** (Fig. 520). Da er sich zwischen halbkreisförmig ausgeschnittenen Magnetpolen dreht, so bleiben bei der Drehung die Drahtwindungen den Polen immer sehr nahe, wodurch die Induktion wesentlich wirksamer wird. Auch bei diesen Maschinen, die für manche Zwecke jetzt noch in Gebrauch sind (Läutewerke bei Eisenbahnen), konnten durch einen Stromwender die Wechselströme in gleich gerichtete verwandelt werden. Da jedoch die Anwendung des Stromwenders mit einem Verlust an Stromstärke verbunden ist, so war die Erfindung von Maschinen, die unmittelbar gleich gerichtete Ströme geben, ein wesentlicher Fortschritt. Fig. 521 (folg. Seite) giebt die äußere Ansicht einer solchen, der *magnetelektrischen Maschine von Gramme*.

Fig. 519.

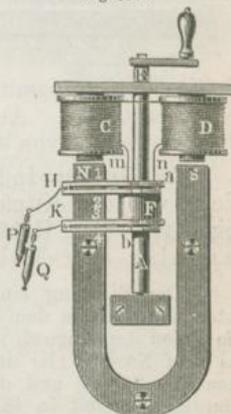
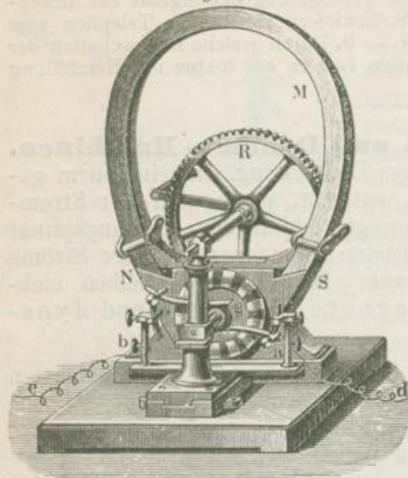


Fig. 520.



Zwischen den Polen S und N eines kräftigen Hufeisenmagnets dreht sich ein eiserner Ring, der senkrecht zu seiner Ebene auf einer

Fig. 521.



Welle (W in Fig. 523) befestigt ist. Der Ring ist so mit isoliertem Kupferdraht umwickelt, daß die Drahtwindungen etwa 30 oder mehr sehr nahe nebeneinander liegende Induktionsrollen bilden. Die benachbarten Drahtenden je zweier Induktionsrollen sind aneinander gelötet; somit bilden die Drahtspiralen zusammen gleichsam eine einzige Spirale. Von jeder Lötstelle führt ein speichenartig gerichteter kurzer Leitungsdraht (Strahlstück) bis nahe an die Welle. Hier sind sämtliche Drähte rechtwinklig umbogen und mit Kupferstreifen verbunden; diese sind voneinander und von der Welle isoliert und an letzterer befestigt (vergl. Fig. 524). Die

Streifen bilden somit einen Hohlzylinder, aus dem die Welle beiderseits hervorragt. Auf dem Hohlzylinder schleifen Drahtbürsten, die etwa gleichweit von den Polen des Magnets entfernt sind.

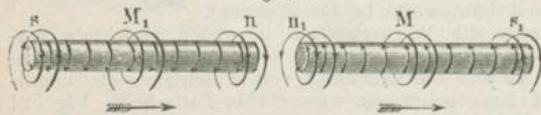
Alle in den Induktionsrollen erzeugten Ströme werden auf diese Weise von den Kupferstreifen gesammelt und durch die Schleifbürsten abgeleitet. Den Hohlzylinder nennt man aus diesem Grunde Stromsammelr oder Kollektor (vielfach auch Stromwender).

Die Wirkung einer Grammeschen Maschine wird verständlich, wenn man untersucht, was in dem Ring und in den Drahtwindungen vorgeht, die zwischen den Polen des Magnets rotieren. Der Ring besteht aus weichem Eisen, mithin wird das dem Nordpol (N) des Magnets zunächst liegende Stück des Ringes durch Induzenz ein Südpol und das dem Südpol (S) zunächst liegende Stück ein Nordpol. Allerdings kommt in jedem Augenblick ein anderer Teil des Ringes in die Nähe der Pole; da aber die Eisenteilchen ihren Magnetismus sofort wieder verlieren, wenn sie sich von den Polen entfernen und die im Ring entstandenen Magnetpole an derselben Stelle bleiben, so würde die Wirkung ganz dieselbe sein, wenn der Ring überhaupt stillstände und nur die Drahtwindungen um denselben herumlaufen.

Statt des Ringes kann man sich mithin auch zwei halbkreisförmig gebogene und mit ihren gleichnamigen Polen aneinanderstößende Magnete denken, über welche die Drahtspulen hinweggleiten.

Schiebt man eine Spule über einen Magnetstab hinweg, so entstehen in derselben Induktionsströme, deren Richtung sich nach dem Lenzschen Gesetz (§ 140) bestimmen läßt. In dem Teile des Ringes, der S zunächst liegt (Fig. 523), stoßen die Nordpole der beiden Ringmagnete aneinander. Denkt man sich nun zwei Stabmagnete mit ihren

Fig. 522.



allen Molekularströmen des Magnets M. Die Molekularströme des Magnets M_1 rufen

Nordpolen (n und n_1) zusammenstoßend (Fig. 522), so entfernt sich die in der Richtung des Pfeiles über den Nordpolen fortbewegte Spule von allen Molekularströmen des Magnets M_1 , und nähert sich

mithin gleich gerichtete und die des Magnets M entgegengesetzt gerichtete Induktionsströme hervor; da aber die Molekularströme der Magnetpole selbst einander entgegengesetzt gerichtet sind, weil gleichnamige Pole zusammenstoßen, so müssen die in der Spule durch die Einwirkung beider Pole erzeugten Induktionsströme gleich gerichtet sein. Es tritt demnach in der Spule kein Stromwechsel ein, wenn sie über den Doppelpol hinweggleitet. Geht die Spule über den Doppelpol hinaus und nähert sich der Mitte des Magnets M , so wird der Induktionsstrom zunächst schwächer, weil der kleinere Teil der Molekularströme des Magnets M jetzt in entgegengesetztem Sinne wirkt. Ist die Spule in der Mitte des Magnets angekommen, so heben sich die Wirkungen der Molekularströme beider Pole auf, es ist also gar kein Induktionsstrom vorhanden; erst nach dem Überschreiten der Indifferenzzone erzeugt der jetzt überwiegende Einfluss des Südmagnetismus wieder einen Induktionsstrom, der aber eine dem vorigen entgegengesetzte Richtung hat.

Dies gilt ebensowohl für die Stabmagnete M_1 und M_2 , wie für den Ring (Fig. 523). In jeder der beiden Ringhälften werden die Spulen von Strömen durchlaufen, welche den Kern in gleichem Sinne umkreisen. Der Stromwechsel erfolgt in der Indifferenzzone (in M und M_1), wo die Stromstärke gleich Null ist; in der Nähe der Pole dagegen erreichen die Ströme ihre größte Stärke.

Dieselben Vorgänge, welche in einer Spule nach und nach stattfinden, müssen in den zahlreichen Spulen des Ringes der Grammeschen Maschine gleichzeitig stattfinden, da ohne Unterbrechung die Spulen alle Lagen gegen die Pole einnehmen und demnach auch die einzelnen gleich gerichteten Ströme in beiden Hälften des Ringes so schnell aufeinander folgen, daß sie einen stetig fließenden Strom ergeben. (Daß an der Ableitungsstelle Stromunterbrechungen nicht eintreten können, erklärt sich daraus, daß die Drahtbürste das folgende Strahlstück schon berührt, ehe sie das vorhergehende verlassen hat.)

Erklärt sich somit die Stetigkeit der Ströme aus der großen Anzahl der Spulen, so beruht andererseits die Unveränderlichkeit der Stromrichtung auf dem Umstande, daß alle Ströme zwischen zwei Indifferenzonen die gleiche Richtung haben und in jeder Ringhälfte die gleichartigen Ströme nach derselben Indifferenzzone hinfließen, wo sie abgeleitet werden (vergl. Fig. 524).

Im Ring fließen somit die beiden Elektrizitäten einander entgegen und die Spulen verhalten sich wie die Elemente einer galvanischen Batterie. Man faßt jedoch nur die positive Elektrizität ins Auge, welche in M abgeleitet und durch den äußeren Schließungskreis nach M_1 zurückgeführt wird.

Der wesentliche Bestandteil der *Grammeschen Maschine*, der Ringinduktor, wurde von *Pacinotti* (1860) erfunden, aber erst durch *Gramme*, der ihn (1871) selbständig wieder erfand, erfolgreich angewendet.

Um gewisse Nachteile zu vermeiden, welche mit der Anwendung des Ringinduktors verbunden sind, ist derselbe mehrfach abgeändert worden. Einer der hauptsächlichsten Übelstände ist die starke Erhitzung des Ringkernes, die dadurch veranlaßt wird, daß derselbe bei der Rotation seine Pole schnell wechselt (vergl. S. 369). Von den verschiedenen Konstruktionen, mittelst deren man diesen Mangel zu beseitigen suchte, ist der sogen. *Trommelinduktor* besonders wichtig geworden (erfunden von *Hefner-Alteneck*). Bei den *Siemensschen* Maschinen mit Trommelinduktor ist der festliegende cylindrische Anker mit einem rotierenden Blechmantel (Trommel) umgeben, über den der Induktionsdraht parallel zur Längsachse läuft; ferner sind die magnetischen Felder dadurch stark vergrößert, daß man die zahlreichen, zu beiden Seiten der Trommel angebrachten Magnete mit bogenförmigen Polen ver-

Fig. 523.

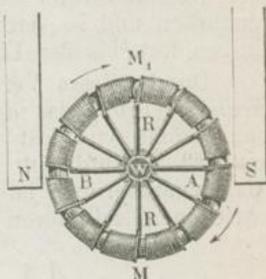
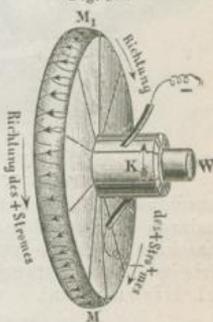


Fig. 524.



sieht, welche die Trommel in mehr als $\frac{3}{4}$ ihres Umfanges umfassen. Wie bei der Grammeschen Maschine, so werden auch hier die Einzelströme durch Strahlstücke einem Stromsammler zugeführt und von da mittelst der Drahtbesen weiter geleitet.

b. Dynamoelektrische Maschinen (Dynamomaschinen). Bei den dynamoelektrischen Maschinen werden statt der Stabmagnete Elektromagnete verwendet, wodurch eine bedeutend grössere Stromstärke erzielt werden kann.

Das Dynamoprincip. In einem Eisenstück, welches einmal magnetisch gewesen, bleibt stets etwas Magnetismus zurück. Dieser magnetische Rückstand dient dazu, einen schwachen Induktionsstrom hervorzurufen, der nun zunächst um den Eisenkern geleitet wird und den Magnetismus desselben verstärkt. Der verstärkte Magnetismus ruft aber stärkere Ströme hervor, die nun ihrerseits wieder den Magnetismus verstärken und so setzt sich diese gegenseitige Multiplikation der Wirkungen fort, bis der Eisenkern bis zur Sättigung magnetisiert ist.

Durch dieses Verfahren, das von seinem Entdecker *Werner von Siemens* (1867) das *dynamoelektrische Prinzip* genannt wurde, kann man Ströme von fast unbegrenzter Stärke erzeugen. Deshalb werden seit seiner Entdeckung alle Maschinen nach diesem Prinzip gebaut. Das Dynamoprincip läßt sich in Verbindung mit jedem der vorher beschriebenen Induktoren (*Doppel-T-Anker*, *Grammescher Ring*, *Hefnersche Trommel*) anwenden.

Fig. 525.

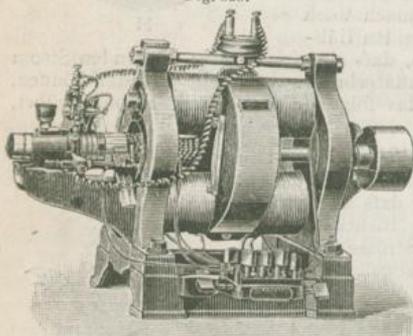
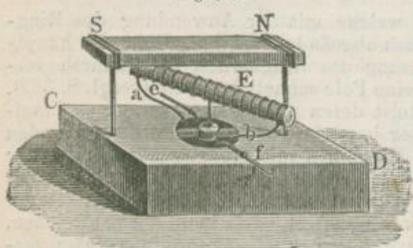


Fig. 525 zeigt eine für den Handbetrieb gebaute Dynamomaschine einer neueren, von *Fraas* erfundenen Konstruktion. Der Induktor (sogen. Flachring) ist durch eine Schutzplatte verdeckt und wird durch die wagrecht liegende Welle zwischen den vier Polschuhen zweier Elektromagnete in rasche Umdrehung versetzt. Der Stromsammler mit den Schleifbürsten befindet sich links an der Welle, wo auch die Ableitungsdrähte sichtbar sind. Die übrigen Drahtleitungen und die im vorderen Teile des Fußgestelles sichtbaren Metallstößel vermitteln verschiedene Umschaltungen und die Einschaltung von Widerständen.

Elektrische Kraftübertragung. Leitet man den Strom einer Dynamomaschine in die Drahtspulen des Ankers einer zweiten Maschine, so wird der Anker dadurch in Umdrehung versetzt. Durch die drehende Bewegung kann eine Arbeitsmaschine betrieben werden. Die Elektrizität ist somit die bewegende Kraft, die eine Arbeitsleistung hervorbringt, z. B. durch Drehung der Räder eines Eisenbahnwagens (el. Eisenbahn).

Fig. 526.



Apparate, die durch den el. Strom in Bewegung versetzt werden, heißen **el. Motoren oder elektromagnetische Maschinen**. Ihr Prinzip wird veranschaulicht durch eine nach Fig. 526 konstruierte Vorrichtung: *elektromagnetische Maschine von Ritchie* (1833). Über einem leicht drehbar unterstützten Elektromagnet (E), dessen Drahtenden in Quecksilber eintauchen, ist ein Stahlmagnet angebracht. Die im Fusse des Apparates hergestellte Höhlung, die das Qu. enthält, ist durch eine niedrige, dem Stabmagnet parallele

Scheidewand so in 2 Hälften geteilt, daß das Qu. über der Scheidewand getrennt ist und letztere von den Drahtenden bei der Drehung nicht berührt wird. Leitet man nun einen Strom in das Qu., so wird der Eisenstab magnetisch und bei der angegebenen Stellung durch den Stahlmagnet in Drehung versetzt, wobei er infolge seiner Trägheit die Scheidewand überschreitet. Ist letzteres erfolgt, so kehrt sich die Polarität des Stabes um. Die vorher angezogenen Pole werden dadurch wieder abgestoßen und der Stab setzt seine Drehung andauernd fort. Größere Elektromotoren haben statt der mit Quecksilber gefüllten Schale einen Stromwender, der aus einem in zwei isolierte Hälften geteilten Messingring besteht; an gegenüberliegenden Punkten desselben schleifen zwei Metallfedern.

Im Jahre 1839 trieb *Jacobi* auf der Newa ein Boot durch einen Elektromotor, der durch einen Strom von 64 Groveelementen in Bewegung gesetzt wurde. Der Betrieb von Elektromotoren durch Batterieströme ist indes viel zu kostspielig, als daß man im großen eine Anwendung davon machen könnte. Erst durch die Erfindung der Dynamomaschinen wurde es möglich, starke el. Ströme so billig zu erzeugen, daß sie zur Leistung einer Arbeit und auch zur Übertragung einer mechanischen Arbeitskraft nach einem entfernten Orte hin dienen können. Hierin liegt das *Prinzip der el. Kraftübertragung*, nach dem z. B. Wasserkraft zunächst dazu benutzt werden kann, mittelst einer Turbine eine Dynamomaschine zu treiben; die Ströme werden dann durch Drähte nach einem an einem anderen Orte aufgestellten el. Motor geleitet und leisten durch dessen Betrieb eine Arbeit.

Die Leitung starker Ströme auf große Entfernungen bot jedoch bis in die neueste Zeit scheinbar unüberwindliche Schwierigkeiten und ist schon wegen der hohen Kosten unausführbar, die durch die erforderlichen dicken Leitungsdrähte verursacht werden würden. Wie nun aber bei fließendem Wasser eine kleine Wassermenge mit großem Gefälle dieselbe Arbeit leisten kann, wie eine große Wassermenge mit geringem Gefälle, so kann auch ein schwacher el. Strom von hoher Spannung statt eines starken Stromes von kleiner Spannung verwendet werden. Nachdem man Methoden ersonnen hatte, die starken Ströme von geringer Spannung in Ströme von geringer Stärke, aber hoher Spannung umzuformen, wurde es möglich, diese hochgespannten Ströme auf weite Strecken fortzuleiten. Die Umformung geschieht durch die sogen. *Transformatoren*, welche dem Prinzip nach ebenso wirken, wie die Induktionsapparate. Ströme von hoher Spannung lassen sich durch dünne, genügend isolierte Kupferdrähte fortleiten und an der Verbrauchsstelle wieder in starke Ströme von geringer Spannung transformieren.

Zur Kraftübertragung mittelst hochgespannter Ströme eignen sich besonders die Wechselstrommaschinen. Durch geeignete Einrichtungen (sogen. *Drehstrommotoren*) gelang es (1891), die Kraftübertragung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt a. M. (auf eine Entfernung von 175 km) auszuführen. Die Wasserkraft, die sich in Lauffen in el. Energie umsetzte, lieferte in Frankfurt el. Strom zur Beleuchtung des Ausstellungsplatzes und setzte eine Pumpe in Bewegung, die einen Wasserfall von 10 m Höhe hervorbrachte.

Da mit der Kraftübertragung zugleich eine *Kraftverteilung* verbunden werden kann, so ermöglicht sie nicht nur die Nutzbarmachung von Naturkräften im großen, sondern auch deren Verwertung für den Maschinenbetrieb im Kleingewerbe (el. Kraftübertragung und Kraftverteilung in Berlin, Breslau u. a. O.).

Übungsstoff. 1. Vergl. die Dauer der zwischen den folgenden Entdeckungen liegenden Zeiträume miteinander: a. Nachweis der Anwendbarkeit der Dampfspannung zum Maschinenbetriebe und wirkliche Anwendung derselben, b. Entdeckung, daß Bernstein durch Reiben el. wird, und Erfindung der Influenzmaschinen, c. Entdeckung der Berührungs-E. und Anwendung derselben in der Telegraphie, d. Entdeckung der Induktionsströme und Erzeugung derselben durch Dynamomaschinen. — 2. Inwiefern geht bereits aus den einfachsten Versuchen über Induktionsströme (§ 141) hervor, daß zur Erzeugung solcher Ströme mechanische Arbeit erforderlich ist? — 3. Inwiefern ist durch die Anwendung der Dampfkraft überall die Möglichkeit gegeben, die el. Kraft im Großbetriebe auszunutzen? — 4. Welchen Einfluß muß a. die Zahl der Windungen des Induktionsdrahtes, b. die Zahl der Umläufe des Induktors, c. die Größe des magnetischen Feldes auf die Strom-

stärke einer el. Maschine ausüben? — 5. Bei welchen el. Maschinen ist die Intensität des magn. Feldes eine konstante Größe und bei welchen nicht? Grund? — 6. Bei welchen dieser Maschinen muß sich hiernach eine Änderung in der Umdrehungsgeschw. am leichtesten bemerklich machen? — 7. Der Ringanker der Grammeschen Maschine wirkt am kräftigsten, wenn er aus zahlreichen ausgeglühten Eisendrähten zusammengesetzt ist, da in diesen der Magnetismus am schnellsten entsteht und wieder verschwindet. Auf welche Beziehung zwischen den Zustandsänderungen im Ringe und in den Induktionsdrähten läßt sich hieraus schließen? — 8. Entfernt man den Schnurlauf einer Influenzmaschine und verbindet ihre Konduktoren mit den Konduktoren einer anderen, in Thätigkeit versetzten Elektrifiziermaschine, so wird die bewegliche Scheibe der Influenzmaschine in Umdrehung versetzt. (Versuch von Mascart.) Erkläre diesen Versuch nach dem Prinzip der el. Kraftübertragung! — 9. Welche Vorteile bietet die Kraftübertragung durch den el. Strom gegenüber derjenigen durch mechanische Hilfsmittel, und inwiefern vollendete ein Teil der mittelst E. von Lauffen nach Frankfurt übertragenen Wasserkraft einen vollständigen Kreislauf?

Thermo-Elektricität und tierische Elektricität.

§ 144. Elektrische Ströme lassen sich nicht nur durch chemische Vorgänge und mechanische Arbeit, sondern auch durch Wärme erzeugen. Dies geschieht in der Weise, daß man zwei Streifen von verschiedenen Metallen an beiden Enden zusammenlötet und eine der beiden Lötstellen erwärmt oder abkühlt. Eine solche Verbindung zweier Metalle heißt ein **Thermoelement** (Fig. 527); mehrere Thermoelemente bilden eine **Thermosäule** (Fig. 528).

Versuch. 1) Wird eine der beiden Lötstellen des aus einem



Fig. 527.

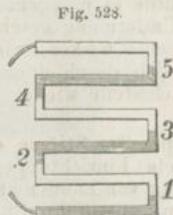


Fig. 528.

Kupferstreifen und einem Bügel aus Antimon oder Wismut zusammengesetzten Thermoelementes (Fig. 527)

durch eine Flamme erwärmt, so giebt eine innerhalb des Metallbügels angebrachte Magnetnadel einen Ausschlag. Abkühlung der Lötstelle bewirkt einen Ausschlag in entgegengesetzter Richtung.

2) Schaltet man in den Schließungsbogen einer aus Eisen u. Neusilber zusammengesetzten Thermosäule (Fig. 528)

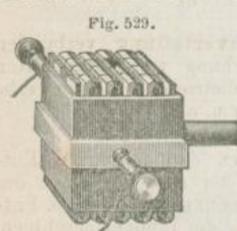


Fig. 529.

ein Galvanoskop ein, so erhält man beim Erwärmen der geradzahigen oder ungeradzahigen Lötstellen einen um so stärkeren Ausschlag, je größer die Zahl der zugleich erwärmten Lötstellen ist. — Thermosäulen, die aus zahlreichen Antimon- und Wismutstäbchen zusammengesetzt sind (**Thermomultiplikator**, Fig. 529), wirken schon bei äußerst schwacher Erwärmung auf die Nadel eines sehr empfindlichen Galvanoskopes ein.

Die Metalle lassen sich in eine Reihe ordnen, in der bei Verbindung je zweier Metalle zu einem Thermoelement an der wärmeren Lötstelle der positive Strom von dem in der Reihe voranstehenden zu dem folgenden Metalle übergeht. Die wichtigsten Glieder dieser Reihe sind: *Wismut, Nickel, Platin, Blei, Gold, Kupfer, Silber, Zink, Eisen, Antimon.* Für gleiche Temperaturunterschiede ist der Strom um

so stärker, je weiter die Metalle in dieser Reihe voneinander entfernt sind. (Die elektromotorische Kraft eines aus Neusilber und einer Zink-Antimon-Legierung hergestellten Elementes beträgt etwa 0,1 Daniell.)

Die Stärke der Thermoströme ist abhängig 1) von der Natur der Metalle, 2) von der Anzahl der Elemente und 3) von dem Temperaturunterschiede der Berührungsstellen.

Auf das thermoelektrische Verhalten der Metalle übt der Grad der Reinheit und Härte, sowie die Struktur derselben einen Einfluss aus. Ein sehr empfindlicher Multiplikator zeigt schon einen Thermostrom an, wenn der eingeschaltete Draht an einer Stelle etwa durch Hämmern, durch Bildung eines Knotens oder dergl. in seiner Dichtigkeit verändert worden ist und diese Stelle darauf erhitzt wird. — Thermomultiplikatoren lassen sich zu sehr empfindlichen Versuchen über strahlende Wärme anwenden (§ 125).

Die Thermoelektrizität wurde 1821 von *Seebeck* entdeckt, während die umgekehrte Verwandlung von Elektrizität in Wärme schon lange vorher bekannt war. Später zeigte *Peltier* (1834), daß eine Wärmewirkung entsteht, wenn der Strom eines galv. Elementes durch die Berührungsstelle der Metalle geleitet wird; geht der Strom in der Richtung von Wismut zum Antimon, so kühlt sich die Lötstelle ab.

Auch in den Muskeln und Nerven des menschlichen und tierischen Körpers hat man el. Strömungen nachgewiesen, die in engem Zusammenhang mit der Lebensthätigkeit stehen (Untersuchungen von *Du Bois-Reymond*). Einige Fische aus der Familie der Rochen (der Zitterrochen) und aus der Familie der Aale (der Zitteraal) besitzen sogar besondere elektrische Organe, durch welche sie bei bloßer Berührung sehr empfindliche el. Schläge erteilen können.

Übungsstoff. 1. Wie wird sich die Magnetnadel (Fig. 527) verhalten, a. wenn man beide Lötstellen zugleich erwärmt, b. wenn man sie zugleich abkühlt? — 2. Wie hat man zu verfahren, um einen möglichst starken Strom zu erhalten? — 3. Leite aus der Spannungsreihe ab, warum Eisen und Nickel, namentlich aber Antimon und Wismut zu Thermoelementen besser geeignet sind, als z. B. Eisen und Kupfer. — 4. Führe nach der Spannungsreihe mehrere Metallverbindungen an und ordne sie nach der Stärke des Stromes, den sie bei gleicher Temperaturveränderung liefern würden. — 5. Welche Richtung hat der + Strom in Fig. 527 und 528 bei einer Erwärmung a. der links, b. der rechts gelegenen Lötstellen an diesen Lötstellen selbst? — 6. Desgl. im Schließungsbogen der Thermosäule (Fig. 528)? — 7. Wie läßt sich bei der angeführten Reihe, wenn man die Anfangsbuchstaben des ersten und letzten Gliedes berücksichtigt, leicht behalten, welche Richtung der + Strom im Schließungsbogen hat? (Vergl. dies mit der auf eine galv. Batterie anwendbaren Regel über die Stromrichtung.) — 8. Neusilber hat einen bedeutend höheren Schmelzpunkt als Wismut oder Antimon. Wismut schmilzt bei +270°, Antimon bei +425° C. Warum ist dies bei der Herstellung einer zur Erzeugung von starken Strömen bestimmten Thermosäule zu berücksichtigen? — 9. Welchen Zweck hat es, die Thermosäulen so einzurichten, daß die ungeradzahigen Lötstellen den geradzahigen gegenüberliegen?

VIII. Abschnitt.

Rückblick.

§ 145. Lebendige Kraft. Spannkraft. Wird ein Körper in Bewegung versetzt, etwa eine Kugel abgeschossen, ein Eisenbahnzug

fortgezogen, ein Stein gehoben, eine Feder gespannt, ein Bohrer gedreht u. s. w., so verrichtet die Kraft, welche die Bewegung hervorruft, eine mechanische Arbeit, indem sie den vom Körper geleisteten Widerstand auf einer gewissen Strecke überwindet (§ 60). Sobald die Kraft zu wirken aufhört, verhalten sich die in Bewegung gesetzten Körper verschieden. Während Kugel und Wagen ihre angenommene Bewegung noch kürzere oder längere Zeit fortsetzen, scheint es, als ob die zur Bewegung des Steines, der Feder u. s. w. aufgewandte Arbeit vollständig vernichtet sei. Wir betrachten zunächst den ersten Fall.

a. Lebendige Kraft. Setzt der bewegte Körper nach dem Aufhören der Krafteinwirkung seine Bewegung noch weiter fort, so vermag er auf seinem Wege Widerstände zu überwinden. Indem z. B. die abgeschossene Kugel fortfliegt, hat sie den Widerstand der Luft zu überwinden. Durchbohrt sie auf ihrem Wege einen festen Körper, so wird von ihr der noch grössere Widerstand der Kohäsion der Körperteilchen überwunden. Dabei nimmt die Geschwindigkeit der Bewegung ab und zwar um so mehr, je grösser die Widerstände sind. Eine ähnliche Wirkungsfähigkeit zeigen auch die Wagen des fahrenden Eisenbahnzuges, nachdem die Dampfkraft zu wirken aufgehört hat. Kugel und Wagen sind demnach durch die Arbeit, welche die bewegende Kraft an ihnen verrichtete, selbst arbeitsfähig geworden.

Die einem bewegten Körper innewohnende Fähigkeit, Arbeit zu leisten, wird lebendige Kraft (Energie der Bewegung oder Wucht der bewegten Masse) genannt. *Kinetische Energie!*

Die lebendige Kraft ist hiernach nicht etwa als eine besondere Kraft in dem in § 3 angeführten Sinne aufzufassen, der (von Leibnitz herrührende) Ausdruck bedeutet vielmehr soviel wie Arbeitsfähigkeit. — Man verwechsle ferner die Wirkung, welche ein bewegter Körper durch seine lebendige Kraft auszuüben vermag, nicht mit der Druckwirkung eines ruhenden Körpers. Eine ruhende Büchsenkugel von 20 g Gewicht kann nur einen ihrem Gewicht entsprechenden Druck ausüben. Wird sie abgeschossen, so vermag sie, wie aus den nachfolgenden Betrachtungen hervorgeht, bei einer Geschwindigkeit von 500 m eine Arbeit von $\frac{1}{2} \cdot \frac{0,02}{10} \cdot 500^2 = 250$ mkg zu verrichten, d. h. sie kann einen Druck von 250 kg auf einer 1 m langen Strecke oder auch einen Druck von 25 000 kg auf einer Strecke von 1 cm überwinden. In einen Körper z. B., dessen Widerstand 250 kg beträgt, vermag sie 1 m tief einzudringen.

Somit kann eine bewegte Masse die Arbeit, die eine Kraft an ihr verrichtet, indem sie ihr eine gewisse Geschwindigkeit erteilt, gleichsam in sich ansammeln. Dadurch wird die Masse zu gleicher Arbeitsleistung befähigt.

Beispiel: Wenn z. B. ein Stein von 2 kg Gewicht 125 m hoch herabfällt, so verrichtet die Schwerkraft 2×125 mkg Arbeit, denn auf dem ganzen Wege hat sie den Widerstand zu überwinden, mit welchem die träge Masse des Körpers der Beschleunigung widerstrebt. Nach § 73 erlangt nun ein aus 125 m Höhe herabfallender Körper eine Endgeschw. von 50 m. Unten angekommen, schlägt der Stein mit einer bestimmten Wucht auf. Stiege der Stein mit derselben Geschw. senkrecht aufwärts, so würde er umgekehrt eine Höhe von 125 m erreichen und auf dieser Strecke ebenfalls einen Widerstand von 2 kg überwinden, da die Erde den Stein mit dieser Kraft anzieht. Dies ergibt wiederum eine Arbeitsleistung von 2×125 mkg.

4) Jedesmal, wenn eine Masse gegen einen Widerstand Arbeit leistet, verliert sie eine Abnahme ihrer lebendigen Kraft ein, und diese ist die von dem Widerstand verbrauchte Arbeit gleich der Abnahme der lebendigen Kraft

Allgemein: Fällt ein Körper, dessen Gewicht Q beträgt, von der Höhe h herab, so ist die von der Schwerkraft an ihm geleistete Arbeit gleich $Q \cdot h$. Hierdurch erlangt er eine Geschwindigkeit (v), welche umgekehrt ausreichen würde, ihn bis zu derselben Höhe wieder emporzutreiben (§ 73), folglich ihn auch befähigen würde, eine gleiche Arbeit wieder zu verrichten. Um die Gröfse dieser Arbeit durch die Masse und Geschwindigkeit des Körpers auszudrücken, setzt man $v = \sqrt{2gh}$ (S. 171). Da nach dieser Gleichung $h = \frac{v^2}{2g}$ ist, so ergibt sich für die lebendige Kraft des Körpers

$$Q \cdot \frac{v^2}{2g} \text{ oder, wenn man in diesem Ausdrucke statt } \frac{Q}{g}$$

als Zeichen für die Masseneinheit m setzt (Seite 137),

$\frac{1}{2}mv^2$, d. h. man erhält die Gröfse der Arbeit, welche der bewegte Körper zu leisten vermag, wenn man die Hälfte seiner Masse mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit multipliziert.

Was in Bezug auf die Arbeitsfähigkeit von dem senkrecht aufsteigenden Körper gilt, muß auch für jeden anderen in Bewegung befindlichen Körper Geltung haben, da weder die Art, wie die Geschwindigkeit erlangt wird, noch die Beschaffenheit der Widerstände, noch die Richtung, in welcher die Bewegung erfolgt, einen Einfluß auf die Gröfse der lebendigen Kraft ausübt. Es gilt daher ganz allgemein der Satz:

Die lebendige Kraft eines bewegten Körpers ist gleich dem halben Produkte aus seiner Masse und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit.

b. Spannkraft. Im zweiten Falle setzt der bewegte Körper nach dem Aufhören der Krafteinwirkung seine angenommene Bewegung nicht fort. Die Veränderung der Lage oder die Verschiebung der Teile des Körpers erfolgt dann ähnlich wie beim gehobenen Steine oder der gespannten Feder. In diesem Falle läßt sich ebenfalls nachweisen, daß die vom Körper verbrauchte Arbeit ebenso wenig wie bei der abgeschossenen Kugel oder dem Wagen des fahrenden Zuges vernichtet ist. Wird nämlich ein Stein auf eine gewisse Höhe gehoben, so kann er zwar lange im Ruhezustande verharren; er kann aber auch, sobald ihm seine Unterlage entzogen wird, ebenso tief fallen, als er gehoben wurde, und bei dieser Bewegung ebenso viel Arbeit leisten, als die bewegende Kraft an ihm verrichtet hatte. Ähnlich verhält es sich mit einer gespannten Feder. Sobald sie ausgelöst wird, vermag sie in jedem Punkte ihres Weges einen ebenso großen Widerstand zu überwinden, als sie vorher der Kraft entgegengesetzte, durch welche sie gespannt wurde.

Die Fähigkeit eines Körpers, verbrauchte Arbeit zu irgend welcher Zeit wieder in lebendige Kraft zu verwandeln, wird Spannkraft (Spannungs-Energie oder Energie der Lage) genannt.

Das letzte der oben angeführten Beispiele (Bohrer) zeigt, daß die an einem Körper verrichtete Arbeit durch Bewegungshindernisse (Reibung oder dgl.) auch in

(Fortsetzung Reyer 206.)

der Weise verbraucht werden kann, daß der bewegte Körper nach dem Aufhören der Krafteinwirkung weder fähig ist, seine Bewegung fortzusetzen und vermöge seiner lebendigen Kraft mechanische Arbeit zu verrichten, noch Spannkraft besitzt, welche ihn zu späterer Leistung mechanischer Arbeit befähigt. Auch in diesem Falle ist die Vernichtung der Kraftarbeit nur eine scheinbare, denn überall, wo durch Bewegungshindernisse Arbeit verbraucht wird, entsteht Wärme (§ 126).

Ändert der Körper, indem er mechanische Arbeit verbraucht, seinen Aggregatzustand, wird z. B. Eis ohne Zuführung von Wärme durch Reibung flüssig, so findet zwar während der Änderung des Aggregatzustandes keine Temperaturerhöhung statt, die Wirkungsfähigkeit oder Energie geht aber dennoch nicht verloren. Der Körper erlangt nämlich durch die an ihm verrichtete Arbeit die Fähigkeit, Wärme zu erzeugen, wenn er in seinen früheren Aggregatzustand zurückkehrt; er giebt dann ebenso viele Wärmeeinheiten ab, als er verbraucht haben würde, wenn er durch Wärme in den jetzigen Aggregatzustand übergeführt worden wäre (§§ 119 und 120).

Hieraus geht hervor, daß ruhende Körper große Vorräte von Arbeit in Form von Spannungsenergie enthalten können. Solche Arbeitsvorräte finden sich in großer Menge in der Natur, namentlich in den Wassermassen der Erde, und werden auf die mannigfaltigste Art zur Arbeitsleistung angewandt. Die durch die Wärme der Sonnenstrahlen täglich gebildeten und emporsteigenden Wasserdämpfe sind reich an Spannkraften. Indem die aus den Dämpfen entstehenden Wolken als Regen oder Schnee niederfallen, verwandelt sich ein Teil dieser Spannkraft in lebendige Kraft. Die Verwandlung setzt sich fort, indem das Wasser der Bäche, Flüsse und Ströme dem Meere wieder zufließt. Findet irgendwo auf der Erdoberfläche eine Ansammlung von Wasser oder Schnee statt, so erleidet jene Verwandlung solange eine Unterbrechung, bis ein Abfließen erfolgt. Ist das Wasser in Bewegung, so können die Arbeitsvorräte in der verschiedensten Weise nutzbar gemacht werden.

Übungsstoff. 1. Wie verhält sich die leb. Kr. einer Bleikugel zu der einer ebenso großen Kugel von Kork, wenn beide sich mit gleicher Geschw. bewegen? — 2. Wie ändert sich bei beiden die leb. Kr., wenn die Geschw. 2-, 3-, 4... mal so groß wird? — 3. Wie verhalten sich die zerstörenden Wirkungen zusammenstoßender Eisenbahnzüge zu einander, wenn a. bei gleicher Geschw. die bewegte Masse, b. bei gleicher Masse die Geschw. des einen Zuges doppelt so groß ist als die des anderen, c. wenn Masse und Geschw. bei dem einen doppelt so groß ist als beim anderen? — 4. Ein Schwungrad läßt sich mit einem Behälter vergleichen, welcher W. aufnimmt und nach Erfordernis wieder abfließen läßt; inwiefern? — 5. Erläutere an einem Beispiel (Gewichtstück einer Uhr, Rammbar oder dergl.) die Entstehung von Spannungsenergie. — 6. Inwiefern kann man von einem schwingenden Pendel sagen, daß bei demselben fortwährend eine Umsetzung von leb. Kr. in Spannkraft und umgekehrt stattfindet? — 7. Welcher K. der Erde ist für die Ansammlung von Spannkraft, wie für die Verwandlung derselben in leb. Kr. von größter Bedeutung; inwiefern? (Nutzbarmachung der in den Wasser- und Schneemassen der Gebirge vorhandenen Arbeitsvorräte, verglichen mit den in den Felsmassen aufgespeicherten.) — 8. Wodurch wird diese Ansammlung von Spannkraft bewirkt, und wann ist der Arbeitsvorrat erschöpft? (Kreislauf des W.) — 9. Wv. mkg Arbeit kann eine 5 m hoch herabfallende Wassermasse von 1600 kg verrichten? — 10. Wie groß ist der gesamte Arbeitsvorrat eines 720 m über dem Meeresspiegel gelegenen Teiches, wenn derselbe 600 cbm W. enthält? — 11. Inwiefern kann die Heizkraft der Steinkohle oder die Blutwärme und Muskelkraft des Menschen auf die Energie der Sonne zurückgeführt werden? — 12. Wie tief ungefähr kann eine Kugel von 400 m Geschw. in einen Baumstamm eindringen, wenn eine Kugel von gleichem Gew. und 200 m Geschw. 10 cm tief eindringt? — 13. Wv. mkg Arbeit kann eine Kanonenkugel von 10 kg Gew. und 400 m Geschw. leisten? — 14. Gesetzt, eine solche Kugel habe auf ihrem Wege die Hälfte ihrer Geschw. ver-

loren; wie tief würde sie dann noch in einen Festungswall einschlagen können, der einen Widerstand von 5000 kg bietet?

§ 146. Äquivalenz von Wärme und Arbeit. Wärme und Licht als Arten der Bewegung.

a. **Mechanisches Wärme-Äquivalent.** Die Erfahrung lehrt, daß nicht nur durch mechanische Arbeit Wärme erzeugt, sondern daß auch umgekehrt durch Wärme mechanische Arbeit verrichtet werden kann. Die Dampfmaschinen liefern hiervon den augenfälligsten Beweis.

Versuche, welche nach verschiedenen Methoden mit größter Sorgfalt ausgeführt worden sind, haben ergeben, daß zur Erzeugung einer bestimmten Wärmemenge stets eine gleichgroße Arbeit erforderlich ist, während umgekehrt zur Leistung einer bestimmten Arbeit eine unveränderliche Wärmemenge ausreicht.

Soll z. B. in einem Stück Blei durch Hämmern eine Wärmeeinheit erzeugt werden, so müssen 424 Hammerschläge mit einer Wucht von 1 mkg auf das Blei ausgeübt werden, oder es muß von dem Blei überhaupt soviel Arbeit verbraucht werden, als jener Arbeit entspricht.

Wenn durch Dampf eine Maschine bewegt wird, so verschwindet (von Wärmeverlusten abgesehen) so oftmal eine Wärmeeinheit, als 424 mkg Arbeit verrichtet werden.

Um durch mechanische Arbeit eine Wärmeeinheit zu erzeugen, sind 424 Meterkilogramm Arbeit erforderlich; umgekehrt können durch eine Wärmeeinheit 424 Meterkilogramm Arbeit verrichtet werden:

mechanisches Äquivalent der Wärmeeinheit.

Das mechanische Äquivalent der Wärme ist von *Robert Mayer in Heilbronn* (1842) zuerst gefunden und gleichzeitig von *Joule in Manchester* durch eine Reihe von Versuchen (Reibung von Gußeisen mit Wasser und Quecksilber) genau bestimmt worden. *Hirn* hat später durch Versuche an Dampfmaschinen nachgewiesen, daß für je 424 Meterkilogramm geleistete Arbeit eine Wärmeeinheit verschwindet.

b. **Wesen der Wärme und des Lichtes.** Die Thatsache, daß durch bloße Aufhebung einer Körperbewegung Wärme erzeugt werden kann, hat zu folgender Vorstellung über das Wesen der Wärme geführt: Wie sich die Bewegung des Hammers, welcher an eine Glocke schlägt, auf die Glocke überträgt und in ein Erzittern derselben verwandelt, so findet überall, wo die Bewegung eines Körpers durch Bewegungshindernisse teilweise oder ganz aufgehoben wird, eine Übertragung der Bewegung statt, indem sich die sichtbare Bewegung der Masse in eine unsichtbare Bewegung der Moleküle verwandelt. Diese Bewegung der Moleküle empfinden wir als Wärme. Wichtige Gründe haben zu der weiteren Annahme geführt, daß die Moleküle aller Körper in steter Bewegung sind, und daß diese Bewegungen bei einem Körper um so schneller erfolgen, je wärmer uns der Körper erscheint, ähnlich wie ein Tonerreger um so schneller schwingt, je höher der Ton ist, den wir von ihm hören. Da alle bekannten Wärmeerscheinungen sich durch diese Annahme

vollständig erklären lassen, so gewinnt folgender Satz einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit:

Die Wärme eines Körpers ist Bewegung seiner Moleküle.

Da die Körper nach genügender Erhöhung ihrer Temperatur anfangen zu leuchten, so liegt der Gedanke nahe, daß auch die Lichterscheinungen durch äußerst schnelle Bewegungen kleinster Teilchen hervorgerufen werden, daß diese Bewegungen aber mit größerer Geschwindigkeit erfolgen, als bei den Wärmeerscheinungen. Die Fortpflanzung von Licht und strahlender Wärme würde man sich hiernach ähnlich wie die Fortpflanzung des Schalles als ein schnelles Fortschreiten einer derartigen Bewegung vorzustellen haben. Diese Vorstellung kann um so mehr als richtig angesehen werden, als selbst die auffälligsten Lichterscheinungen (Beugung, Interferenz, Polarisation) sich danach erklären lassen.

Das Fortpflanzungsmittel kann jedoch nicht wie beim Schalle die Luft sein; denn Licht und strahlende Wärme pflanzen sich auch durch den Weltenraum hindurch fort. Man hält es daher für höchst wahrscheinlich, daß der ganze Weltenraum von einem äußerst feinen unwägbaren Stoffe, den man *Äther* nennt, erfüllt sei; man nimmt ferner an, daß dieser Stoff nicht nur im freien Raume zwischen den Weltkörpern, sondern auch in den unmeßbar kleinen Zwischenräumen zwischen den Molekülen aller Körper vorhanden, und daß seine Dichtigkeit und Elasticität im Innern der Körper je nach der Einwirkung, welche seine Teilchen durch die Körpermoleküle erleiden, verschieden ist. Wichtige Gründe sprechen dafür, daß die Schwingungen der Teilchen dieses Stoffes, indem sie Licht und Wärme fortpflanzen, nicht (wie bei der Fortpflanzung des Schalles durch die Luft) in der Richtung des Strahles selbst erfolgen (Longitudinalwellen); sie finden vielmehr rechtwinklig zum Strahle statt (Transversalwellen).

Licht und strahlende Wärme sind ihrem Wesen nach eins, nämlich eine Wellenbewegung des Lichtäthers; sie unterscheiden sich nur durch die Schnelligkeit, mit der die Ätherteilchen schwingen.

Ein Körper strahlt hiernach Licht oder aber dunkle Wärme aus, indem die zitternde Bewegung seiner Moleküle sich dem umgebenden Äther mitteilt und durch diesen im Raume fortpflanzt. Die Farbe des Lichtes ist durch die Schnelligkeit bedingt, mit der die Schwingungen der Teilchen erfolgen; die Farbeindrücke des Spektrums vom Rot bis zum Violett werden durch eine Stufenfolge von immer schnelleren Schwingungen hervorgerufen, sodaß man die Farbenfolge geradezu als Lichttonleiter bezeichnet hat. (Die Anzahl der Schwingungen beläuft sich auf 500—700 Billionen in 1 Sek.)

Licht- oder Wärmestrahlen werden von einem Körper absorbiert, heißt hiernach: die Geschwindigkeit, mit der die Körpermoleküle bereits schwingen, wird durch die in den Körper eindringenden Strahlen vergrößert. Ein Körper ist vollkommen durchsichtig oder durchwärmig (diatherman), wenn alle Licht- oder Wärmestrahlen durch ihn hindurchgehen, ohne seine Moleküle zu schnellerem Schwingen anzuregen. Hat die Mitteilung der Ätherbewegung nicht nur ein rascheres Schwingen, sondern auch eine Auflockerung oder Trennung der die Körpermoleküle zusammensetzenden Atome zur Folge, so treten zugleich chemische Erscheinungen auf (Assi-

milation in den grünen Zellen der Pflanzen unter der Einwirkung des Lichtes, d. h. Umwandlung von Kohlensäure und Wasser in organische Substanz bei Ausscheidung von Sauerstoff; Zersetzung der Silbersalze beim Photographieren). Je nachdem die Schwingungen der Ätherteilchen beim Zusammentreffen zweier Strahlen einander gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind, findet eine Verstärkung oder Aufhebung der Bewegung statt (Interferenz). Dadurch, daß sich die Schwingungen der zwischen den Rändern eines schmalen Spaltes befindlichen Ätherteilchen nach den Seiten hin auf benachbarte Ätherteilchen übertragen, entsteht die als Beugung bezeichnete Lichterscheinung. Bei einem gewöhnlichen Lichtstrahl schwingen die Ätherteilchen in allen möglichen, zur Fortpflanzungsrichtung senkrechten Ebenen; wird durch Reflexion, durch Brechung oder Absorption der Strahl derart verändert, daß die Schwingungen der Ätherteilchen nur noch in einer Ebene stattfinden, so nennt man diese Veränderung Polarisation der Lichtstrahlen.

Die Annahme, daß Licht und Wärme eine Art der Bewegung sind (Undulations- oder Wellentheorie), wird wie jede andere zur Erklärung von Naturerscheinungen dienende Annahme eine Hypothese genannt.

Hypothesen gewinnen um so mehr an Wahrscheinlichkeit, je vollständiger und ungezwungener sich die bezüglichen Erscheinungen danach erklären lassen. Eine Hypothese muß verworfen werden, sobald sich neu entdeckte Erscheinungen mit ihr nicht in Einklang bringen lassen.*) Die Hypothese z. B., nach welcher man sich das Licht als einen feinen, von den leuchtenden Körpern ausgesendeten Stoff vorstellte (*Emissionstheorie*), konnte nur so lange, aufrecht erhalten werden, als die Erscheinungen ihr nicht widersprachen (vergl. S. 397).

Übungsstoff. 1. Bei vollkommen elastischen Körpern ist die leb. Kr. der Masse vor und nach dem Stöße dieselbe, nicht aber bei unel. K.; w.? — **2.** Inwiefern ist bei letzteren die verlorene leb. Kr. nicht vernichtet? — **3.** Welche Verwandlung muß beim elastischen Stöße stattfinden, indem der elastische K. sich abplattet; welche hingegen, indem er beim Zurückprallen seine ursprüngliche Gestalt wieder annimmt? — **4.** Man bezeichnet die Wärme auch als leb. Kr. der Moleküle. Was läßt sich hier nach von der Größe der leb. Kräfte elastischer und unelast. K. vor und nach dem Stöße behaupten? — **5.** Wovon hängt es ab, ob bei nicht vollkommen elastischen Körpern, nach dem Stöße die leb. Kr. der Masse oder diejenige der Moleküle größer ist? — **6.** Eine Kanonenkugel von 10 kg Gew. schlage mit 400 m Geschw. gegen einen Schiffspanzer und verliere dadurch ihre Bewegung vollständig. Wv. Wärmeeinheiten entstehen dabei? (Berechne zunächst die lebendige Kraft.) — **7.** Warum kann die Temp. des W. durch den Verbrauch von mech. Arbeit nicht so schnell steigen als die irgend eines anderen festen oder flüssigen K.? — **8.** Welchen Einfluß muß es auf die Temp. des Dampfes ausüben, wenn der Dampf den Kolben einer Dampfmaschine noch bewegt, nachdem die Verbindung zwischen Cylinder und Dampfkessel bereits aufgehoben ist? (Expansionsmaschine.) — **9.** Wv. mechanische Arbeit müßte an 2 Stücken Eis geleistet werden, wenn von denselben 100 g durch bloße Reibung geschmolzen werden sollten? (§ 119.) — **10.** Die Verbrennungswärme von 1 kg Steinkohle beträgt 7000 Wärmeeinheiten. Wv. mkg Arbeit könnte dadurch geleistet werden, wenn sich die ganze Wärme nutzbar machen ließe?

§ 147. Verwandlung der Energie. Nach den beiden vorigen Paragraphen kann sich mechanische Arbeit in lebendige Kraft oder in Spannkraft der Masse des bewegten Körpers, oder auch in lebendige Kraft oder in Spannkraft der Moleküle

*) Die Hypothese, daß die elektrischen Erscheinungen mit den Lichterscheinungen dem Wesen nach eins sind (*Maxwells elektromagnetische Lichttheorie*), ist durch die neueren Untersuchungen von *Hertz* bestätigt worden, sodaß sie jetzt an Anspruch auf Sicherheit der Undulationstheorie des Lichtes nahezu gleichkommt. Die „Strahlen elektrischer Kraft unterliegen denselben Gesetzen der Fortpflanzung, Reflexion und Brechung wie die Lichtstrahlen.“

desselben verwandeln und umgekehrt. Wie nun von jenen beiden sichtbaren Formen der Wirkungsfähigkeit die eine in die andere umgewandelt werden kann, so läßt sich auch von den beiden unsichtbaren Formen, nämlich von der lebendigen Kraft und von der Spannkraft der Moleküle, die eine in die andere verwandeln.

Indem z. B. ein Körper durch Aufnahme von Wärme, ohne daß sich seine Temperatur erhöht, schmilzt oder verdampft, wird durch die Vergrößerung des Abstandes der Moleküle ein Widerstand überwunden, und zwar beim Verdampfen auf einem weit größeren Wege als beim Verflüssigen. Da nun die Moleküle des Körpers sowohl beim Erstarren als bei der Kondensation ihre ursprüngliche Lage gegeneinander wieder einnehmen und dabei dieselbe Wärmemenge wieder entsteht, welche beim Schmelzen und Verdampfen verschwand, so findet durch diese Vorgänge offenbar nur ein *Wechsel in der Form der Energie* statt: die Energie der molekularen Bewegung oder die lebendige Kraft der Moleküle verwandelt sich in Energie der Lage oder in Spannkraft der Moleküle oder es findet der umgekehrte Vorgang statt.

Wie folgende Beispiele zeigen, kann die mechanische Arbeit außer der Umwandlung in Wärme noch mancherlei andere Umwandlungen erfahren. Durch mechanische Arbeit entsteht z. B. ein Schall, wenn eine Glocke durch einen Schlag in Schwingungen versetzt wird, Licht, wenn ein Körper durch Reibung sich entzündet, Magnetismus, wenn Stahl mit einem Magnetpol gestrichen wird, el. Spannung, wenn zwei ungleichartige Körper aneinander gerieben werden (Elektriermaschine), ein el. Strom, wenn eine magnet- oder dynamo-elektrische Maschine in Bewegung gesetzt wird, ein chemischer Vorgang, wenn der durch mechanische Arbeit erzeugte Strom chemische Verbindungen zersetzt u. s. w. — Einzelne der angeführten Beispiele zeigen zugleich, daß die aus der mechanischen Arbeit unmittelbar hervorgegangene Form der Energie wieder einer weiteren Umwandlung fähig ist. Andere früher erwähnte Beispiele dieser Art sind die Verwandlung von Wärme in Elektrizität beim Erwärmen der Lötstellen zweier Metalle (Thermoelektricität), die Verwandlung von Elektricität in Wärme, wenn entgegengesetzte Elektrizitäten sich ausgleichen (Entzündung durch den el. Funken, galv. Glühen von Drähten), ferner die Verwandlung von Licht in Wärme, wenn ein Körper Lichtstrahlen absorbiert u. s. w.

Bezeichnet man ganz allgemein *jede Wirkungsfähigkeit einer Kraft* als *Energie*, so sind Schall, Wärme, Licht, Elektrizität, Magnetismus, mechanische Energie und chemische Verwandtschaft nur als verschiedene Formen der Energie aufzufassen (Einheit der Naturkräfte).

Es liegt nun die Frage nahe, ob in den Fällen, in denen eine Umwandlung von Energie stattfindet, diese Umwandlung ohne Gewinn oder Verlust an Energie erfolgt. Da die verschiedensten Formen der Energie sich in Wärme verwandeln lassen und da man im Wärme-Äquivalent ein Maß besitzt, mittelst dessen Arbeitseinheiten und Wärme-einheiten ausgedrückt werden können, so ist man auf Grund genauer Versuche zu dem Grundgesetz aller Naturerscheinungen gelangt:

Die in der Natur vorhandene Energie oder Wirkungsfähigkeit der Kräfte wird durch die Verwandlungsvorgänge weder vergrößert noch verkleinert: Prinzip der Erhaltung der Energie (Erhaltung der Kraft).

Geschichtliche Übersicht.

Archimedes, († 212 v. Chr. in Syrakus) begründet die Lehre vom Gleichgewicht der festen und flüssigen Körper.

Hebelgesetz, Schraube ohne Ende, Flaschenzug; Archimedisches Prinzip.

Claudius Ptolemäus (um 120 n. Chr. (?) in Alexandrien), neben **Hipparch** von Nicaea der bedeutendste Astronom des Altertums, begründet das nach ihm benannte Weltsystem in seinem „Almagest“ (*Μεγίστη σύνταξις* [Megiste syntaxis], d. h. „Größte Zusammenstellung“, von den Arabern „el Megiste“ genannt).

Optische Untersuchungen (das Sehen, Reflexion und Brechung des Lichtes, Spiegelung); Trigonometrie; Geographie.

Heron von Alexandrien (um 120 v. Chr.) erfindet den Heronsball und verwendet die Spannkraft des Dampfes als bewegende Kraft.

William Gilbert († 1603 in London) legt den Grund zu einer wissenschaftlichen Untersuchung der magnetischen und elektrischen Erscheinungen.

Simon Stevinus († 1620 in Leyden) entdeckt das Gesetz der schiefen Ebene und den Satz vom Boden- und Seitendruck der Flüssigkeiten, ergänzt das archimedische Prinzip.

Nikolaus Kopernikus (geb. 1473 in Thorn, † 1543 in Frauenburg), begründet das nach ihm benannte Weltsystem in seinem Werke: „De revolutionibus (orbium coelestium)“.

Galileo Galilei (geb. 1564 in Pisa, † 1642 in Florenz), verteidigt das Kopernikanische System; begründet die Mechanik (Beharrungsgesetz, Fallgesetze, Lehre vom Wurf, Pendel, Parallelogramm der Kräfte); konstruiert ein Fernrohr (Mondberge, Jupitermonde, Phasen der Venus, Sonnenflecken) und versucht eine Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit (Olaf Römer 1676).

Johannes Kepler (geb. 1571 im Württembergischen, † 1630 in Regensburg), Begründer der Mechanik des Himmels (das 1. und 2. Gesetz der Planetenbewegung fand er — durch Berechnung der von Tycho Brahe am Mars angestellten Beobachtungen — 1609 in Prag, das 3. 1618 in Linz). Optische Untersuchungen (Spiegelung und Brechung der Lichtstrahlen — das Brechungsgesetz entdeckt Snellius 1621 —, Einrichtung des Auges, das Sehen; astronomisches Fernrohr).

Christian Huyghens (geb. 1629, † 1695 in Leyden), Schöpfer der Wellentheorie des Lichtes (Ätherschwingungen). Astronomische Forschungen (Saturnring) und Fortschritte auf dem Gebiete der Mechanik (Pendel, Schwingkraft, Gestalt der Erde, Lehre vom Stofs).

Isaak Newton (geb. 1643, † 1727), Entdecker des Gravitationsgesetzes, mittelst dessen er die Bewegungen der Weltkörper, sowie die Erscheinungen von Ebbe und Flut erklärt. Untersuchungen auf dem Gebiete der Optik: farbige Zerlegung des weissen Lichtes, natürliche Farben der Körper, Farben dünner Blättchen, Spiegelteleskope; Emissionstheorie des Lichtes. Akustische und elektrische Forschungen.

Evangelista **Torricelli** († 1647 in Florenz) entdeckt den Luftdruck und erfindet das Quecksilberbarometer.

Erste bar. Höhenmessung 1648 am Puy de Dôme auf Veranlassung von **Pascal**.

Otto von **Guericke** († 1668) wendet sein Wasserbarometer als „Windanzeiger“ an, erfindet die Luftpumpe (1650) und eine einfache Elektrisiermaschine.

Robert **Boyle** entdeckt 1660 das 1679 von **Mariotte** bestätigte und nach letzterem benannte Gesetz und erfindet die Verdichtungspumpe.

Denis **Papin** († 1742) untersucht die Abhängigkeit des Siedens vom Luftdruck und benutzt die Spannkraft des Dampfes zur Bewegung eines Kolbens (1687).

James **Watt** (geb. 1736, † 1819) beschäftigt sich mit Untersuchung der Elasticität des Dampfes und erfindet die doppeltwirkende Niederdruckmaschine (vergl. S. 311).

Im 18. Jahrhundert wurde durch eine Reihe von Forschern die Lehre von der *Elektricität* wesentlich gefördert. Es sind dies besonders:

Gray, der den Unterschied der Leiter und Nichtleiter entdeckt (1729),

Du Fay, der Glas- und Harz-Elektricität unterscheidet (1733);

Syammer, der die Zwei-Fluida-Theorie aufstellt und

Franklin, der die elektrische Natur des Gewitters nachweist und den Blitzableiter erfindet (1760).

Coulomb endlich zeigt, wie man magnetische und elektrische Kräfte messen kann und führt die Lehre von der Reibungselektricität zu einem vorläufigen Abschluss (1789).

Alessandro Volta (geb. 1745, † 1827 zu Como) erfindet den Elektrophor (1775), den Kondensator (1782), die Voltasche Säule (1800) und erklärt die Erscheinungen des Galvanismus durch seine Kontakttheorie.

André Marie Ampère (geb. 1775, † 1836 in Marseille) erforscht die elektrodynamischen Wirkungen des galvanischen Stromes (angeregt durch **Oersted's** Entdeckung der Einwirkung desselben auf die Magnetnadel, 1820) und stellt die nach ihm benannte Theorie über das Wesen des Magnetismus auf. (Maxwell nannte Ampère den „Newton der Elektricität.“)

Georg Simon Ohm (geb. 1789, † 1854 in München) entdeckt das Gesetz über den Zusammenhang zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft und Widerstand. Akustische Untersuchungen (Klangfarbe).

Michael Faraday (geb. 1791, † 1867 in London), „der erste aller Experimentatoren“ (nach **Tyndall**), entdeckt die Induktionselektricität (1831), die Gesetze der Elektrolyse und des Diamagnetismus; begründet die elektrochemische Theorie, führt den Begriff der magnetischen Kraftlinien ein und erfafst das Wesen der Elektricität unter dem Gesichtspunkt der Einheit der Naturkräfte. In dieser Hinsicht sind Faradays Untersuchungen für die gesamte Physik von besonderer Wichtigkeit geworden, und bilden den Ausgangspunkt für eine Reihe von er-

folgreichen Forschungen über den Zusammenhang zwischen Magnetismus, Elektrizität und Licht (Versuche von Professor Hertz in Bonn 1887).

Auch in anderer Beziehung sind Faradays Entdeckungen von grundlegender Bedeutung, da auf ihnen der gewaltige Aufschwung beruht, den die *Elektrotechnik* in den letzten drei Jahrzehnten genommen hat.

Werner von **Siemens** (geb. 1816, † 1892 in Berlin), der „James Watt des Elektromagnetismus“, wie ihn Du Bois-Reymond nannte. (Telegraphie, unterseeische Kabel, Telephon, Dynamomaschine, galv. Messungen, Widerstandseinheit).

In der *Optik* behauptete länger als ein Jahrhundert die von Newton zu großer Vollendung ausgebildete Emissionstheorie den Vorrang vor der Wellentheorie, die zunächst weniger einfach erschien, weil sie die Annahme eines Mittels der Wellenbewegung, des Äthers, notwendig machte. Erst zu Anfang des 19. Jahrhunderts wurde der Streit zwischen beiden Theorien zu Gunsten der Wellentheorie entschieden.

Thomas **Young** († 1829 in London) erklärt die Farbenerscheinungen dünner Blättchen durch die Interferenz der Lichtwellen.

Aug. Jean **Fresnel** († 1827 bei Paris) vervollständigt die Untersuchungen des vorigen durch seine Erklärung der Beugungerscheinungen.

Joseph von **Fraunhofer** († 1826 in München) untersucht die dunklen Linien im Sonnenspektrum und bringt die achromatischen Fernrohre zu hoher Vollkommenheit. (Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungsvermögens verschiedener Glassorten).

Kirchhoff († 1887 in Berlin) und **Bunsen** in Heidelberg begründen die Spektralanalyse (1859) und wenden sie zur Untersuchung der Himmelskörper an (*Astrophysik*).

Die *Akustik* wurde durch **Chladni** (Klangfiguren, Schallgeschwindigkeit), durch die Gebrüder **Weber** in Göttingen (Wellenlehre, 1825) und durch **Helmholtz** („Lehre von den Tonempfindungen“, 1862) wesentlich ausgebildet.

In der *Wärmelehre* hat Robert **Mayer** (geb. 1814, † 1878 in Heilbronn) durch die Begründung der mechanischen Wärmetheorie (1842) einen Fortschritt von größter Bedeutung herbeigeführt, nachdem schon **Thompson** (Graf Rumford) die Beziehung zwischen mechanischer Arbeit und Wärme erkannt hatte (1798).

Joule ermittelte (von 1842 bis 1849) durch genaue Versuche das Verhältnis zwischen Arbeitsgröße und Wärmemenge (mechanisches Wärmeäquivalent) und

Hermann von Helmholtz (Direktor der physikalisch-technischen Reichsanstalt in Charlottenburg) bewies mathematisch den bereits von Mayer aufgestellten Satz von der „Erhaltung der Kraft“ (1847). Aus diesem Gesetz folgt zugleich der Grundgedanke der neueren Naturbetrachtung: der Satz von der „Einheit der Kraft.“