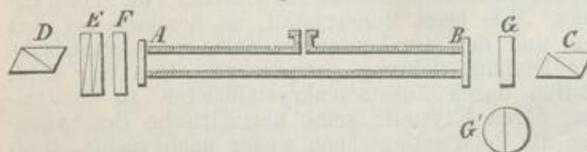


wird die Drehung der Polarisationssebene in der Zuckerlösung durch eine zwischen *A* und *D* angebrachte Vorrichtung aufgehoben. Diese besteht aus einer rechtsdrehenden Quarzplatte *F* und aus zwei keilförmig geschliffenen Platten von linksdrehendem Quarz, welche, mit entgegengesetzten Kanten über einander gelegt, zusammen eine linksdrehende Platte bilden, deren Dicke veränderlich ist, je nachdem die Keile mehr oder minder über einander geschoben werden. Diese Verschiebung geschieht mittelst einer Mikrometerschraube, an welcher die Änderung der Dicke der Platte genau abgelesen werden kann. Sind die Platten *E* und *F* gleich dick, so heben sie ihre drehende Wirkung gegenseitig auf, und beide Hälften der Platte *G* erscheinen in der Übergangsfarbe. Nach Einschaltung der Flüssigkeitssäule *AB* wird die Übergangsfarbe durch Änderung der Dicke der Platte *E* mittelst der Mikrometerschraube wiederhergestellt. Die zu diesem Zweck erforderliche Drehung der Schraube ist dem Prozentgehalt der Lösung proportional.

Manche Körper, welche an sich keine Drehung der Polarisationssebene bewirken, erlangen diese Fähigkeit, wie Faraday (1847) entdeckt hat, unter dem Einfluß des Magnetismus, oder eines elektrischen Stromes, z. B. Faradays „schweres Glas“ (kieselborsaures Bleioxyd), Flintglas, Schwefelkohlenstoff, Wasser. Bei Körpern, welche, wie Terpentinöl, schon an sich ein Drehungsvermögen besitzen, wird dasselbe durch Einwirkung des elektrischen Stromes verändert. Um

Fig. 204.



die elektromagnetische Drehung der Polarisationssebene nachzuweisen, kann man die mit der Flüssigkeit gefüllte Röhre *AB* (Fig. 204) mit einer Spirale aus starkem, mit Seide besponnenem Kupferdraht umgeben und durch diesen einen kräftigen elektrischen Strom leiten, oder man kann die zu prüfende Substanz zwischen die Pole der Halbanker eines kräftigen Elektromagnets (§ 321) bringen, wobei es zweckmäßig ist, die Anker in der Richtung der Verbindungslinie der Pole zu durchbohren, um in dieser Richtung hindurchsehen zu können. Sobald der Strom geschlossen, oder die Polarität des Elektromagnets erregt wird, beobachtet man die Drehung der Polarisationssebene, welche durch Wechsel der Stromrichtung oder Umkehrung der Pole des Elektromagnets in die entgegengesetzte übergeht.

Sechster Abschnitt.

Wärmelehre.

1. Wärmegrad oder Temperatur.

§ 196. Wärmeempfindung, Temperatur. Die Empfindungen der Wärme und Kälte, welche die uns umgebenden Körper durch die Berührung in unseren Hautnerven hervorrufen, lassen uns auf gewisse Verschiedenheiten des Zustandes dieser Körper schließen, welche wir als einen höheren oder niederen Wärmegrad oder eine höhere oder niedere Temperatur derselben bezeichnen. Werden zwei Körper von verschiedener Temperatur in Berührung gebracht, so findet eine Ausgleichung ihrer Temperatur oder ein Übergang von Wärme zwischen beiden statt; ein kalter Körper wird durch umgebende Körper von höherer Temperatur erwärmt, ein warmer Körper durch Berührung mit kälteren abgekühlt.

Der veränderte Wärmegrad der Körper äußert sich nicht nur durch

das Gefühl, welches dieselben bei der Berührung in uns hervorrufen, sondern es sind damit anderweitige Veränderungen in der Beschaffenheit der Körper selbst verbunden. Mit wachsendem Wärmegrad findet eine Volumenzunahme der Körper statt, oder alle Körper werden (mit einzelnen unten zu besprechenden Ausnahmen) durch die Wärme ausgedehnt (§ 198 u. ff.). Ferner ändert sich mit der Temperatur der Kohäsionszustand der Körper. Feste Körper, welche bei niedriger Temperatur hart und spröde sind, werden bei höherer Temperatur weich und biegsam (Wachs, Glas, viele Metalle) und werden durch stärkere Erwärmung in den flüssigen und endlich in den luftförmigen Aggregatzustand übergeführt (§§ 203, 209).

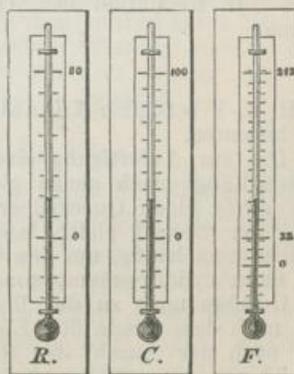
Obleich der verschiedene Wärmegrad der Körper unmittelbar durch das Gefühl erkannt werden kann, ist doch dieses Mittel zur Beurteilung desselben ein sehr unvollkommenes. Einerseits werden nämlich die Wärmeempfindungen unserer Hautnerven durch vorhergehende Eindrücke mitbestimmt, indem uns derselbe Körper warm oder kalt erscheint, je nachdem wir vorher einem geringeren oder höheren Wärmegrad ausgesetzt waren; auch sind, wie später gezeigt wird, andere Umstände, namentlich das verschiedene Wärmeleitungsvermögen der Körper (§ 232), bei dieser unmittelbaren Beurteilung des Wärmegrades von wesentlichem Einfluß. Andererseits ist eine Wahrnehmung geringerer Temperaturunterschiede durch das Gefühl schwierig und eine Messung derselben ganz unmöglich. — Ein weit geeigneteres Mittel zur Beurteilung und Messung der Temperaturunterschiede bietet daher die Ausdehnung der Körper durch die Wärme dar (§ 197).

Man erklärte früher den verschiedenen Erwärmungsgrad der Körper durch die Annahme eines besonderen Wärmestoffes, eines unwägbaren (gewichtlosen) Fluidums, welches alle Körper durchdringen und durch seine grössere oder geringere Quantität den verschiedenen Wärmegrad der Körper erzeugen sollte. Es ist jedoch aus mehrfachen Gründen (§§ 238, 241) äusserst wahrscheinlich, daß die Wärmeerscheinungen vielmehr in einem gewissen, bald mehr, bald weniger intensiven Bewegungszustand der kleinsten Körperteilchen ihren Grund haben. Der Übergang der Wärme von einem wärmeren zu einem kälteren Körper ist danach als eine Mitteilung dieses Bewegungszustandes aufzufassen, wobei der wärmere Körper ebensoviel an der lebendigen Kraft seiner Wärmebewegung verliert, wie der kältere gewinnt (vergl. §§ 43, 68).

§ 197. Thermometer. Zur Messung der Temperaturen dient das Thermometer, dessen Gebrauch einerseits auf der Ausdehnung der Körper durch die Wärme, andererseits auf der Ausgleichung des Temperaturzustandes in Berührung befindlicher Körper beruht, infolge deren das Thermometer selbst jederzeit die Temperatur seiner Umgebung annimmt. — Am meisten ist zur Messung der Temperatur die Ausdehnung der flüssigen Körper (Quecksilber, Weingeist, Gase) geeignet, weil dieselben im allgemeinen stärker als feste Körper ausgedehnt werden und eine leichtere Beobachtung ihrer Volumenzunahme gestatten (Vergl. § 200).

Das Quecksilber- oder Weingeist-Thermometer (Fig. 205) besteht im wesentlichen aus einer engen Glasröhre mit einem daran geblasenen, weiteren, gewöhnlich kugelförmigen Behälter. Dieser und ein Teil der Röhre sind mit Flüssigkeit gefüllt und darauf die Röhre oben zugeschmolzen. Bei zu-

Fig. 205.



nehmender Temperatur steigt der Gipfel der in der Röhre enthaltenen Flüssigkeitssäule infolge der Ausdehnung der in dem weiteren Gefäß enthaltenen Flüssigkeit, und der Stand derselben kann an einer an der Röhre angebrachten Skala abgelesen werden. Die gebräuchlichsten Thermometerskalen sind die von Celsius (C.), Réaumur (R.) und Fahrenheit (F.). Die erstere ist am meisten in wissenschaftlichen Untersuchungen gebräuchlich und wird im folgenden zu Grunde gelegt werden, wo nicht ausdrücklich eine andere Skala angegeben ist. Die Skala von Réaumur wird am häufigsten in Deutschland, die Fahrenheitsche in England gebraucht. Als unveränderliche und leicht zu bestimmende Ausgangs- oder Fundamentalpunkte der Thermometerskala wählten Réaumur (1710) und Celsius (1742) die Temperatur des schmelzenden Schnees (§ 203) und die des (beim Barometerstand von 28", nahe gleich 760 mm) siedenden Wassers (§ 209). Den Fundamentalabstand zwischen beiden Punkten teilte Réaumur in 80, Celsius in 100 gleiche Grade, und nunmehr ist der Gefrierpunkt oder Schmelzpunkt des Schnees bei beiden Skalen mit 0°, der Siedepunkt aber bei Réaumur mit 80°, bei Celsius mit 100° bezeichnet. Die Teilung wird über die Fundamentalpunkte hinaus fortgesetzt, und die Grade unterhalb des Gefrierpunktes oder Kältegrade werden mit dem Vorzeichen „—“ bezeichnet, wobei jedoch, da die Wahl des Nullpunktes eine willkürliche ist, nicht an einen Gegensatz von Wärme- und Kältegraden gedacht werden darf.

Celsius bezeichnete den Siedepunkt des Wassers mit 0, den Gefrierpunkt mit 100 und setzte diese Teilung nach unten bis 150 fort; sechs Jahre nach seinem Tode kehrte Strömer (1750) diese Skala um und stellte so die jetzt übliche Centesimalskala her, deren Grade kurz als Centigrade bezeichnet werden. Viviani erwähnt in seiner Biographie des Galilei, daß dieser kurze Zeit nach dem Antritt seines Lehramtes in Padua (1592) das Thermometer erfunden habe. (Heller, Geschichte der Physik I, pag. 388.)

Fahrenheit wählte (1710), um den Gebrauch negativer Grade zu vermeiden, als Nullpunkt die Temperatur einer künstlichen Kältemischung aus Eis und Salmiak oder Seesalz. Der Gefrierpunkt des Wassers ist in Fahrenheit's Skala mit 32°, der Siedepunkt mit 212° bezeichnet, so daß der Fundamentalabstand zwischen diesen beiden Punkten 180 Grade umfaßt. Es ergibt sich daraus, daß das Verhältnis der Anzahl der Grade der verschiedenen Skalen durch die Zahlen 80 : 100 : 180 oder 4 : 5 : 9 ausgedrückt wird und da der Nullpunkt der Fahrenheit'schen Skala um 32° tiefer liegt, als der der beiden anderen Skalen, so dient zur Reduktion der Temperaturangaben nach den drei Skalen folgende Formel:

$$\frac{R}{4} = \frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9},$$

wo R, C, F bezüglich Anzahl von Graden der Skala Réaumur, Celsius, Fahrenheit bedeuten.

Die zur Anfertigung eines Thermometers dienende enge Röhre muß ihrer ganzen Länge nach genau gleich weit sein, wovon man sich überzeugt, indem man zuvor einen Quecksilberfaden von geringer Länge durch die Röhre laufen läßt, der überall gleich lang erscheinen muß. Bei Quecksilberthermometern braucht man häufig, um den Stand des Quecksilbers leichter zu erkennen, Röhren mit nicht cylindrischem, sondern flachem, bandförmigem Hohlraum. Die Weite des Gefäßes muß zu der Röhre in einem passenden Verhältnis stehen, welches sich nach dem Grade der Empfindlichkeit, den man vom Thermometer verlangt, und nach der Anzahl der Grade richtet, welche die Skala umfassen soll. Um das Thermometergefäß mit Flüssigkeit zu füllen, erwärmt man dasselbe zuerst schwach, um einen Teil der im Gefäß enthaltenen Luft durch die Ausdehnung auszutreiben. Bringt man dann das offene Ende der Röhre unter Quecksilber, so füllt sich beim Erkalten ein Teil des Gefäßes mit Quecksilber, indem die im Gefäß zurückgebliebene Luft sich wieder auf ein kleineres Volumen zusammen-

zieht. Erhitzt man dann das in das Gefäß eingedrungene Quecksilber bis zum Sieden, so treiben die sich entwickelnden Dämpfe alle Luft aus dem Gefäß und beim abermaligen Erkalten füllt sich das Gefäß und die Röhre ganz mit Quecksilber. Man erwärmt darauf das Thermometergefäß bis zu der höchsten Temperatur, welcher dasselbe später ausgesetzt werden soll, wodurch ein Teil des Quecksilbers ausfließt, und schmilzt bei dieser Temperatur das obere Ende der Röhre vor der Lampe zu. Beim Erkalten zieht sich das Quecksilber zurück, und es bleibt über dem Gipfel der Quecksilbersäule ein leerer Raum.

Um die Fundamentalpunkte zu bestimmen, umgibt man das Thermometer zuerst mit einem Gemisch von Schnee oder gestoßenem Eis und destilliertem Wasser, welches stets genau die Temperatur des Gefrierpunktes besitzt. Sodann bringt man das Thermometer in ein Siedegefäß, in welchem Kugel und Röhre bis dicht unter den zu bezeichnenden Siedepunkt von den Dämpfen destillierten Wassers umgeben sein müssen. Beträgt der gleichzeitig beobachtete Barometerstand nicht genau 28" (beziehungsweise 760 mm), so ist eine entsprechende Verbesserung des Siedepunktes anzubringen (§ 214). Der Abstand beider Fundamentalpunkte wird dann in 80 oder 100 gleiche Teile geteilt. — Umfaßt die Thermometerskala nicht den ganzen Fundamentalabstand, so muß dieselbe durch Vergleichung mit einem genauen Normalthermometer festgestellt werden.

Das Quecksilber dehnt sich für jeden Grad der hundertteiligen Skala um $\frac{1}{5550}$, der Weingeist im Mittel um $\frac{1}{800}$ seines Volumens aus. Die Ausdehnung des Weingeistes ist also stärker. Da sich aber das Quecksilber gleichmäßiger ausdehnt (§ 201), so giebt man im allgemeinen dem Quecksilberthermometer den Vorzug. Da das Quecksilber bei $-38,2^{\circ}$ C. gefriert, so müssen für tiefere Temperaturen Weingeistthermometer gebraucht werden, dagegen ist für hohe Temperaturen bis zu 360° C. das Quecksilber allein brauchbar, da Weingeist schon bei $78,3^{\circ}$ siedet. Für Temperaturen über dem Siedepunkte des Quecksilbers bedient man sich des Luftthermometers (§ 202).

Häufig kommt es, besonders bei Witterungsbeobachtungen (§ 246), darauf an, nicht nur die augenblickliche Temperatur eines Raumes, sondern auch die höchste und tiefste Temperatur zu kennen, welche während eines gewissen Zeitabschnitts, z. B. eines Tages, stattgefunden hat. Man bedient sich dazu der sogenannten Registrierthermometer oder Thermometrographen. Der bekannteste ist der von Rutherford (1794.) Derselbe besteht aus einem Quecksilberthermometer, welches das Maximum, und einem Weingeistthermometer, welches das Minimum der Temperatur anzuzeigen bestimmt ist. Die Röhren beider Thermometer liegen horizontal. In der des Quecksilberthermometers befindet sich ein feiner Stahlstift, welcher beim Vorrücken der Quecksilbersäule von dieser fortgestoßen wird, beim Zurückweichen des Quecksilbers aber liegen bleibt und so das stattgehabte Maximum der Temperatur bezeichnet. In der Röhre des Weingeistthermometers dagegen befindet sich ein feines Glasstäbchen, welches vom Weingeist benetzt und beim Zurückweichen der Weingeistsäule durch Adhäsion von dieser mitfortgezogen wird, bei steigender Temperatur aber an der dem stattgehabten Minimum entsprechenden Stelle liegen bleibt. Nach geschehener Ablesung werden beide Stäbchen durch vorsichtiges Neigen der Thermometerrohren wieder mit dem Gipfel der Quecksilber- und Weingeistsäule in Berührung gebracht.

2. Ausdehnung der Körper durch die Wärme.

§ 198. Ausdehnung fester Körper. Daß die festen Körper durch die Wärme ausgedehnt werden, geht aus vielen Erscheinungen des täglichen Lebens hervor und kann durch einfache Versuche nachgewiesen werden. Besonders stark ist die Ausdehnung der Metalle durch die Wärme. Eine Metallkugel, welche genau in einen Ring paßt, wenn beide Körper gleiche Temperatur haben, bleibt auf demselben liegen, wenn sie zuvor auf eine höhere Temperatur erwärmt worden ist, und fällt erst hindurch, nachdem die Temperaturlausgleichung zwischen Kugel und Ring stattgefunden hat. Ein eiserner Reifen, welcher heiß um einen Radkranz gelegt worden, schließt sich bei dem Erkalten fest an denselben an.

Beim Legen von Eisenbahnschienen, bei Röhrenleitungen und anderen Metallverbindungen, welche Temperaturveränderungen ausgesetzt sind, muß zwischen den einzelnen Stücken ein hinreichender Spielraum gelassen, oder die Verbindung auf nachgiebige Weise hergestellt werden, um ein gewaltsames Zersprengen beim Temperaturwechsel zu verhindern. Spröde Körper, wie Glas, zerspringen bei schnellem Temperaturwechsel, indem die einzelnen Teile die höhere oder niedere Temperatur nicht gleich schnell annehmen und deshalb in ungleichem Maße durch die Wärme ausgedehnt werden.

Die Größe der Ausdehnung eines Körpers durch die Wärme wird durch seinen Ausdehnungskoeffizienten angegeben, und zwar hat man bei festen Körpern den linearen und kubischen Ausdehnungskoeffizienten zu unterscheiden. Der lineare Ausdehnungskoeffizient giebt an, mit welchem Faktor die ursprüngliche Länge eines Körpers bei 0° C. zu multiplizieren ist, um deren Zuwachs bei einer Temperaturerhöhung auf 1° C. zu erhalten.

Bezeichnet man die den Temperaturen 0°, t , t_1 entsprechenden Längen durch l_0, l, l_1 und durch α den Ausdehnungskoeffizienten, so hat man

$$l = l_0 (1 + \alpha t) \text{ und } l_1 = l_0 (1 + \alpha t_1),$$

folglich:

$$l_1 = \frac{l (1 + \alpha t_1)}{1 + \alpha t},$$

und wenn man $t < t_1$ annimmt und die Division ausführt:

$$l_1 = [1 + \alpha (t_1 - t) - \alpha^2 t (t_1 - t) + \dots],$$

wofür sich, weil α nur sehr kleine Werte besitzt, setzen läßt:

$$l_1 = l [1 + \alpha (t_1 - t)].$$

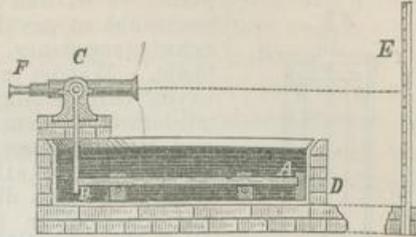
Hieraus ergibt sich, daß man den linearen Ausdehnungskoeffizienten auch erklären kann als den Faktor, mit welchem man die Länge eines Körpers zu multiplizieren hat, um deren Zuwachs bei einer Temperaturerhöhung von einem Grad C. zu erhalten. Ebenso ist der kubische Ausdehnungskoeffizient der Faktor, welcher mit dem anfänglichen Volumen multipliziert, die Zunahme desselben bei Erhöhung der Temperatur um einen Grad C. ergibt. Zwischen beiden findet der einfache Zusammenhang statt, daß der kubische Ausdehnungskoeffizient gleich dem dreifachen linearen ist.

Denkt man sich nämlich aus der Substanz des Körpers einen Würfel geformt, dessen Kantenlänge bei 0° gleich 1 ist, dessen Volumen also bei dieser Temperatur ebenfalls gleich 1 ist, und bezeichnet α den linearen Ausdehnungskoeffizienten, so ist die Kantenlänge des Würfels bei 1° C. gleich $1 + \alpha$, mithin sein Volumen $(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$. Da α für alle festen Körper ein sehr kleiner Bruch ($< 0,001$) ist, so dürfen die Glieder $3\alpha^2$ und α^3 ohne merklichen Fehler vernachlässigt werden, und die Volumenzunahme für 1° oder der kubische Ausdehnungskoeffizient wird durch 3α ausgedrückt, ist also gleich dem dreifachen linearen.

Zur genauen Bestimmung der linearen Ausdehnungskoeffizienten fester Körper dient am besten die Methode von Lavoisier und Laplace (1778). Der Stab AB (Fig. 206), dessen Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden soll, ist von einem Kasten umgeben, in welchem er durch schmelzendes Eis auf 0° abgekühlt, oder durch ein Wasser- oder Ölbad, dessen Temperatur durch genaue Thermometer angegeben und durch Umrühren in allen Teilen gleichförmig erhalten wird, auf beliebige Grade erwärmt werden kann. Ein Ende des Stabes A stößt gegen ein festes Widerlager D , das andere gegen den vertikalen Arm eines um die Axe C

drehbaren Winkelhebels. Der horizontale Arm des letzteren wird durch das Fernrohr *F* gebildet, welches auf eine entfernte, vertikale Skala *E* gerichtet ist. Durch die Ausdehnung des Stabes wird der Hebel und das Fernrohr um die Axe *C* gedreht und letzteres auf einen anderen Teilstrich der Skala gerichtet. Kennt man das Verhältnis zwischen der Länge des Hebelarmes *BC* und der Entfernung der Skala von der Umdrehungsaxe *CE*, so kann aus der beobachteten Größe der Verschiebung der Skala am Fadenkreuz des Fernrohrs (§ 173) die Größe der Verlängerung des Stabes gefunden, und wenn die ursprüngliche Länge desselben und der Temperaturunterschied bekannt ist, der Ausdehnungskoeffizient berechnet werden. Die folgende Tabelle enthält die Ausdehnung einiger festen Körper zwischen den Temperaturgrenzen von 0° und 100° C.

Fig. 206.



	100 α	100 α	
Weißes Glas . . .	0,0007006	Kupfer	0,0017173
zweiertei Sorten . . .	0,0008226	Messing	0,0018782
Platin	0,0008841	Silber	0,0019097
Eisen	0,0012204	Zinn	0,0020547
Stahl, gehärtet . . .	0,0012250	Blei	0,0028484
Gold	0,0014661	Zink	0,0029416.

Krystalle, welche nicht dem regulären System angehören, erleiden in verschiedenen Richtungen eine verschiedene Ausdehnung, infolge deren sich ihre Kantenwinkel mit der Temperatur ändern. Krystallisierter Gips zeigt, nach Mitscherlich, in der zur Hauptaxe des Krystalls senkrechten Richtung bei erhöhter Temperatur eine Zusammenziehung, dagegen in der Richtung der Hauptaxe selbst eine Ausdehnung.

Das Jodsilber bildet, wie Fizeau gefunden hat, eine merkwürdige Ausnahme, indem es sich innerhalb der Temperaturgrenzen von -10° und 70° , auf welche die Beobachtungen sich erstrecken, mit wachsender Temperatur nicht ausdehnt, sondern zusammenzieht und bei sinkender Temperatur sich wieder ausdehnt, obschon es erst bei 400° C. schmilzt.

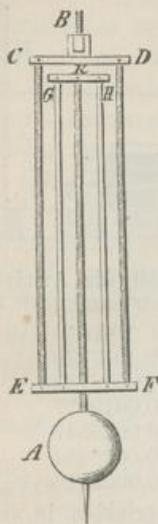
Eine scheinbare Ausnahme findet ferner beim gebrannten Thon statt, indem derselbe, selbst nachdem er durch schwaches Brennen aller Feuchtigkeit beraubt ist, doch bei höherer Temperatur noch eine Zusammenziehung erleidet, welche auf einer innigeren Vereinigung seiner Teile beruht und nach dem Erkalten andauert.

§ 199. Kompensation der Uhren, Metallthermometer. Die Ausdehnung der Körper durch die Wärme übt einen störenden Einfluss auf den Gang der Pendeluhr und Chronometer, welcher durch geeignete Kompensationsvorrichtungen beseitigt werden muß. Da nämlich die Schwingungsdauer des Pendels (§§ 61, 63) mit seiner Länge zunimmt, so gehen Pendeluhr, namentlich mit metallischer Pendelstange, bei hoher Temperatur zu langsam, bei niedriger Temperatur zu schnell. Bei gewöhnlichen Pendeluhrn pflegt man deshalb Pendelstangen aus sehr trockenem, mit Öl getränktem Fichtenholz anzuwenden, welches dem Einfluss der Temperatur und Feuchtigkeit wenig unterworfen ist. Bei astronomischen und anderen sehr genauen Uhren aber wendet man sogenannte Kompensationspendel an, bei welchen der Einfluss der Temperatur durch geeignete Vorrichtungen aufgehoben wird. Die bekanntesten Vorrichtungen dieser Art sind das Rostpendel und das Pendel mit Quecksilberkompensation, beide von Graham (1715) erfunden.

Beim Rostpendel ist der linsenförmige, schwere Körper *A* (Fig. 207) nicht unmittelbar an einer einfachen Pendelstange aufgehängt, sondern an dem kurzen Stahlstab *B* ist ein rechteckiger Rahmen *CDEF* befestigt, dessen vertikale Seiten *CE*, *DF* ebenfalls von Stahlstäben gebildet sind. Auf dem unteren Querstab *EF* stehen zwei Zinkstäbe, welche an ihrem oberen Ende abermals durch einen Querbalken *GH* verbunden sind. An diesem ist erst die Stahlstange aufgehängt, welche die Pendellinse *A* trägt und durch eine Öffnung des Querbalkens *EF* frei hindurchgehen muß, ohne mit diesem fest verbunden zu sein. Es ist klar, daß

die Pendellinse *A* durch die Ausdehnung der Stahlstäbe *CE* und *DF*, sowie *KA*, gesenkt wird, dagegen wird dieselbe durch die Ausdehnung der an ihrem unteren

Fig. 207.



Ende befestigten Zinkstäbe gehoben. Da nun das Zink mehr als doppelt so stark durch die Wärme ausgedehnt wird als Stahl, so ist klar, daß das Längenverhältnis der Zink- und Stahlstäbe so gewählt werden kann, daß die Pendellänge und Schwingungsdauer bei wechselnder Temperatur ungeändert bleibt. Wendet man anstatt des Zinks das weniger leicht oxydierbare Messing an, so muß dieselbe Vorrichtung nochmals wiederholt werden, da die Ausdehnungskoeffizienten des Stahls und Messings ungefähr im Verhältnis von 2 : 3 stehen.

Die Quecksilberkompensation eines Pendels besteht darin, daß die Pendelstange an ihrem unteren Ende ein mit Quecksilber gefülltes cylinderförmiges Glasgefäß trägt. Weil der Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers (§ 200) größer ist als der der metallischen Pendelstange, so kann die Pendellänge entsprechend der Quecksilbermenge in dem Gefäß so gewählt werden, daß bei veränderter Temperatur der Schwingungspunkt des Pendels (§ 62) seine Lage beibehält, also die Schwingungsdauer dieselbe bleibt.

Bei Taschenuhren und Chronometern wird die Regulierung des Ganges durch eine elastische Spiralfeder bewirkt, welche, in Verbindung mit einem kleinen Rädchen, die sogenannte Unruhe bildet. Wird durch Temperaturerhöhung der Durchmesser des Rädchens vergrößert, so werden dadurch die Schwingungen verzögert. Um dies zu verhindern, wird der Radkranz an zwei gegenüberliegenden Punkten *A*, *B* unter-

brochen, so daß derselbe in zwei halbkreisförmige Stücke zerfällt. Jeder der beiden Teile ist aus zwei ihrer ganzen Länge nach zusammengelöteten, halbkreisförmigen Streifen zusammengesetzt, von denen der innere aus Stahl, der äußere aus Messing besteht. Infolge der stärkeren Ausdehnung des Messings durch die Wärme wird die Krümmung eines solchen aus jenen Metallen zusammengelöteten

Fig. 208.



Kompensationsstreifens bei höherer Temperatur stärker als bei niedriger. Es werden sich deshalb bei steigender Temperatur die freien Enden *AB* der halbkreisförmigen Streifen mehr nach innen krümmen. Durch passend angebrachte Gewichte läßt sich erreichen, daß durch diese stärkere Krümmung der Einfluß der Vergrößerung des Durchmessers *CD* genau aufgehoben wird. — Ähnlicher, aus verschiedenen Metallen zusammengelöteter Streifen bedient man sich zur Herstellung von Metallthermometern. Breguet wendete (1817) zu diesem Zweck einen solchen Streifen in Form einer Spiralfeder an, welcher aus Silber, Gold und Platin zusammen-

gelötet war. Durch Temperaturerhöhung wird, wenn sich das Silber auf der äußeren, das Platin auf der inneren Seite befindet, die Krümmung der Spirale vergrößert, durch Temperaturerniedrigung verringert. Ist nun die Spiralfeder an einem Ende befestigt, so zeigt ein am anderen Ende angebrachter Zeiger die Temperaturveränderung an einer kreisförmigen Skala an, deren Teilung durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer bestimmt werden kann.

§ 200. Ausdehnung flüssiger Körper. Bei Flüssigkeiten kann, da dieselben keine bestimmte Gestalt besitzen, nur vom kubischen Ausdehnungskoeffizienten (§ 198) die Rede sein. Man bestimmt denselben, indem man die Flüssigkeit in ein thermometerähnliches Gefäß bringt, das aus einem weiteren Behälter und einem daran geschmolzenen, engen Rohr besteht. Das Verhältnis des Rauminhalts von Gefäß und Röhre wird zuvor genau bestimmt, am zweckmäßigsten durch Wägung der Quecksilbermenge, welche entweder das Gefäß oder die Röhre bei einer bestimmten Temperatur aufzunehmen imstande ist. Beträgt z. B. der Rauminhalt der ganzen Röhre 0,001 von dem des Gefäßes, und teilt man die Länge der Röhre in 100 gleiche Teile, so entspricht jeder Skalenteil einem Hundert-

taus
viele
wir
ist
teiln
Steig
sch
desh
Flüs
dem
cient

folge
Falle
dure
Nun
ein v
weis
ged

Weg
komm
silber
dener
oder
in de
Flüss
so ge
mitte
100°
Petit
1° C.

halte
und V
stimm
ander
mit d
man
für je
Es fo
ander
nungs
punkt
das V
Volu
größ
sende
wie b
fluß
Da nä
leitern
in gr
in de
so sin
und l

tausendstel des ganzen Rauminhalts, und wenn man beobachtet, um wie viele Skalenteile die Flüssigkeit für jeden Temperaturgrad ausgedehnt wird, so kann daraus der Ausdehnungskoeffizient gefunden werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß auch das Gefäß an der Temperaturerhöhung teilnimmt, und daß sein Rauminhalt dadurch vergrößert wird. Das Steigen der Flüssigkeitssäule in der Röhre zeigt daher nur den Unterschied der Volumenzunahme von Flüssigkeit und Gefäß an, und man muß deshalb zu dem beobachteten, scheinbaren Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit noch den kubischen Ausdehnungskoeffizienten des Glases, aus dem das Gefäß besteht, hinzufügen, um den wahren Ausdehnungskoeffizienten zu finden.

Taucht man das Gefäß in heißes Wasser, so kann man sogar, infolge der zuerst eintretenden Ausdehnung der Gefäßwand, anfänglich ein Fallen des Niveaus im Rohr beobachten, bis die Wärme Zeit gehabt hat, durch die Gefäßwand hindurch sich der inneren Flüssigkeit mitzuteilen. Nunmehr erst tritt, vermöge der stärkeren Ausdehnung der Flüssigkeit, ein wirkliches Steigen ihres Niveaus ein. Es ist damit zugleich der Beweis geführt, daß die Flüssigkeit durch die Wärme stärker ausgedehnt wird, als die sie umgebende feste Substanz des Gefäßes.

Um die wahre oder absolute Ausdehnung des Quecksilbers auf direktem Wege zu bestimmen, bedienten sich Dulong und Petit (1816) des Gesetzes der kommunizierenden Röhren (§ 74). Dieselben wendeten zwei vertikale, mit Quecksilber gefüllte und unten durch ein enges Querrohr verbundene Röhren an, von denen die eine mit schmelzendem Schnee, die andere mit einem erhitzten Ölbad, oder den Dämpfen siedenden Wassers umgeben war. Da das spezifische Gewicht in demselben Verhältnis abnimmt, wie das Volumen wächst, die Höhen der Flüssigkeitssäulen aber den spezifischen Gewichten umgekehrt proportional sind, so giebt das Verhältnis der Höhen der warmen und kalten Quecksilbersäule unmittelbar die Volumenausdehnung an. Bei einem Temperaturunterschied von 100° standen die Höhen nahe im Verhältnis von 55:56, und Dulong und Petit bestimmten demnach den Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers für

$$1^{\circ} \text{ C.} = \frac{1}{5550} = 0,00018018.$$

§ 201. Ungleichförmige Ausdehnung der Flüssigkeiten, Verhalten des Wassers. Zwei mit verschiedenen Flüssigkeiten, z. B. Quecksilber und Weingeist, gefüllte Thermometer, welche an zwei festen Punkten übereinstimmen, weichen in ihrem Gange bei zwischenliegenden Temperaturen von einander ab. Da ein mit Quecksilber gefülltes Thermometer zwischen 0° und 100° mit dem Luftthermometer (§ 202) in seinem Gange übereinstimmt, so nimmt man an, daß das Quecksilber innerhalb dieses Intervalls gleichförmig, d. h. für jeden Temperaturgrad um gleich viel, durch die Wärme ausgedehnt werde. Es folgt daraus, daß die Ausdehnung des Weingeistes und ebenso der meisten anderen Flüssigkeiten eine ungleichförmige ist, und zwar wächst der Ausdehnungskoeffizient mit steigender Temperatur, namentlich in der Nähe des Siedepunkts der Flüssigkeiten. Das am meisten abweichende Verhalten aber zeigt das Wasser, welches sich zwischen 0° und 4° C. nicht ausdehnt, sondern sein Volumen verringert, so daß seine Dichtigkeit bei etwa 4° C. am größten ist, worauf es sich bei weiter steigender Temperatur wieder mit wachsender Geschwindigkeit ausdehnt und bei 8° etwa dieselbe Dichtigkeit besitzt, wie bei 0°. Dieses eigentümliche Verhalten des Wassers ist von wichtigem Einfluß auf die Temperaturverhältnisse stehender Gewässer von beträchtlicher Tiefe. Da nämlich das Wasser, wie die meisten Flüssigkeiten, zu den schlechten Wärmeleitern gehört (§ 233), so geschieht die Verbreitung von Temperaturveränderungen in größeren Wassermassen vorzugsweise durch Flüssigkeitsströmungen. Werden in der kalten Jahreszeit die Wassermassen von ihrer Oberfläche aus abgekühlt, so sinken die kälteren Teile, als die dichteren, herab, während die wärmeren und leichteren aus der Tiefe emporsteigen, bis die ganze Wassermasse die der

größten Dichtigkeit entsprechende Temperatur von 4° angenommen hat. Schreitet jetzt die Abkühlung an der Oberfläche weiter fort, so bleiben die kalten Teile an der Oberfläche, und diese bedeckt sich mit einer spezifisch leichteren, daher auf dem Wasser schwimmenden Eisschicht, während die tieferen Teile, infolge des schlechten Leitungsvermögens des Wassers, die Temperatur des Dichtigkeitsmaximums beibehalten. Es wird dadurch das Ausfrieren stehender Gewässer bis auf den Grund verhindert.

Die Flüssigkeiten, welche durch die Verdichtung von Gasen unter starkem Druck entstehen (§ 212), werden durch die Wärme sehr stark, zum Teil selbst stärker als die Gase (§ 202), ausgedehnt. So ist z. B. der Ausdehnungskoeffizient der verflüssigten Kohlensäure zwischen 0° und 30° nach Thilorier gleich 0,0142, der der flüssigen schwefligen Säure nach Drion zwischen 0° und $10^{\circ} = 0,0018$, dagegen zwischen 100° und $110^{\circ} = 0,0054$.

§ 202. Ausdehnung luftförmiger Körper. Luftthermometer. Die Ausdehnung luftförmiger Körper durch die Wärme ist eine sehr beträchtliche und kann leicht sichtbar gemacht werden, indem man eine enge Röhre, an welche ein weiteres Gefäß angeschmolzen ist, mit dem offenen Ende in ein mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß tauchen läßt. Schon die Annäherung der warmen Hand genügt, um einen Teil der im Gefäß enthaltenen Luft aus dem Gefäß zu verdrängen, indem dieselbe in Form von Blasen durch die Flüssigkeit entweicht. Beim Erkalten steigt dann, indem die Luft sich zusammenzieht, eine Flüssigkeitssäule in der Röhre empor. Einer ähnlichen Vorrichtung bediente sich schon im Jahre 1621 Cornelius Drebbel und wahrscheinlich andere vor ihm, um die Temperaturveränderungen der Luft sichtbar zu machen.

Die Luft dehnt sich für jeden Temperaturgrad um $\frac{11}{3000}$ oder $\frac{1}{273}$ ihres Volumens bei 0° aus, ihr Ausdehnungskoeffizient ist gleich 0,003665. Gay-Lussac fand 1802, daß alle Gase durch die Wärme gleich stark ausgedehnt werden. Wegen dieser Übereinstimmung betrachtet man die Ausdehnung der Gase durch die Wärme als eine gleichförmige. Da das Volumen einer Gasmasse, außer von der Temperatur, auch von dem Druck abhängt, unter welchem dieselbe steht (§ 92), so muß dieser während des Versuches unveränderlich erhalten, oder die etwa stattfindende Änderung desselben in Rechnung gebracht werden. Wegen der Schwankungen des atmosphärischen Luftdruckes kann daher ein Luftthermometer nicht mit einer festen Skala versehen werden, welche eine direkte Ablesung des Temperaturgrades gestattet, sondern dieser muß aus der beobachteten Volumenveränderung und dem gleichzeitig beobachteten Barometerstand jedesmal berechnet werden.

Ist v_0 das Volumen eines Kilogramms Luft unter dem Druck einer Atmosphäre oder bei dem Barometerstand $p_0 = 760$ mm und bei der Temperatur von 0° , und bezeichnet α den Ausdehnungskoeffizienten der Luft, so wird sich bei gleichbleibendem Luftdruck jedes cdm bei 1° C. auf $1 + \alpha$, bei 2° C. auf $1 + 2\alpha$ und bei t° C. auf $(1 + \alpha t)$ cdm ausdehnen. Das Volumen eines Kilogramms Luft also bei t° und unter dem Druck p_0 beträgt $v_0 (1 + \alpha t)$ cdm. Wird dagegen der Luftdruck verändert, und geht derselbe aus p_0 in p über, so ändert sich gleichzeitig das Volumen, und zwar hat man, wenn v das Volumen eines Kilogramms Luft unter diesen Umständen bezeichnet, nach dem Gesetz von Mariotte (§ 92):

$$v : v_0 (1 + \alpha t) = p_0 : p$$

oder:

$$pv = p_0 v_0 (1 + \alpha t).$$

Mittelst dieser Gleichung ist es möglich, für jeden gegebenen Druck p und jede gegebene Temperatur t das Volumen v einer Luftmasse zu berechnen, wenn

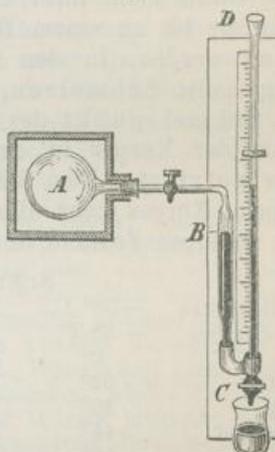
deren Volumen im Normalzustande, d. h. bei 0° und unter dem Druck einer Atmosphäre, bekannt ist, und wenn man außerdem den Ausdehnungskoeffizienten α kennt. Die beiden wichtigsten Folgerungen, welche aus dieser Gleichung gezogen werden können, sind folgende:

1. Erwärmt man eine Gasmasse von 0° auf t° , während der Druck ungeändert bleibt, so ist $p = p_0$ zu setzen, mithin $v = v_0 (1 + \alpha t)$, oder das Volumen der Gasmasse wächst im Verhältnis von $1 : 1 + \alpha t$.

2. Erwärmt man eine Gasmasse, indem dieselbe durch ein Gefäß von unveränderlichem Volumen an der Ausdehnung gehindert wird, von 0° auf t° , so ist $v = v_0$ zu setzen, oder es ist $p = p_0 (1 + \alpha t)$. In diesem Falle wächst also der Druck der an der Ausdehnung verhinderten Gasmasse im Verhältnis von $1 : 1 + \alpha t$.

Jeder dieser beiden besonderen Fälle kann zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten α benutzt werden. Die letztere Methode gestattet die größere Genauigkeit. Ein mit Luft, oder einem anderen Gase gefüllter Glasballon A steht

Fig. 209.



durch ein enges Rohr mit dem aus zwei ungleich langen, parallelen Schenkeln gebildeten, weiteren Rohr BCD in Verbindung. Dieses enthält Quecksilber, dessen Niveau im kürzeren Schenkel bis zu einer am Rohr angebrachten Marke B reicht, während der Ballon A mit schmelzendem Schnee umgeben ist. Wenn dabei das Niveau des Quecksilbers in beiden Schenkeln gleich hoch ist, so steht das in A abgesperrte Luftvolumen unter dem Druck einer Atmosphäre, entsprechend einer Quecksilbersäule von 760 mm. Wird jetzt der Ballon A auf 100° erwärmt, so strebt die Luft sich in demselben auszudehnen, drückt auf das Quecksilber bei B mit größerer Elastizität, und das Quecksilberniveau sinkt im Schenkel CB und steigt im offenen Schenkel CD . Um die Luft auf ihr ursprüngliches Volumen zurückzuführen, gießt man bei D Quecksilber zu, so lange bis durch den vermehrten Druck der Quecksilbersäule das Niveau im anderen Schenkel wieder bei B steht. Man beobachtet dann die Niveaudifferenz in beiden Schenkeln. Dieselbe beträgt ungefähr 278 mm. Es folgt daraus, daß $1 : 1 + 100\alpha = 760 : 760 + 278$, mithin $\alpha = 0,00366$

ist. Die genauesten Versuche von Regnault und Magnus (1842) haben für den Ausdehnungskoeffizienten der atmosphärischen Luft den Wert $\alpha = 0,003665$ oder

fast genau $\frac{11}{3000}$ ergeben. Es ist klar, daß, nachdem der Wert von α einmal be-

stimmt ist, der beschriebene Apparat als Luftthermometer zur Messung von Temperaturen dienen kann und auch für hohe Hitzgrade als sogenanntes Luftpyrometer anwendbar bleibt, wenn das Gefäß A aus Platin oder einem anderen sehr schwer schmelzbaren Stoff besteht.

Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenoxydgas stimmen in ihrer Ausdehnung durch die Wärme mit der atmosphärischen Luft fast genau überein; im übrigen weichen die Gase von diesem von Gay-Lussac aufgefundenen Gesetz um so mehr ab, je näher sie ihrem Verflüssigungspunkt sind (vergl. §§ 92 und 212). So fand Regnault für Kohlensäure zwischen 0° und 100° $\alpha = 0,003688$, für die sehr leicht flüchtig zu machende schweflige Säure $\alpha = 0,003845$.

§ 202a. Absolute Temperatur. Aus der im letzten Paragraphen gegebenen Gleichung:

$$p = p_0 (1 + \alpha t),$$

welche den Zusammenhang zwischen dem Druck p und p_0 eines Gases, bezüglich bei der Temperatur t° und 0° , bei gleichem Volumen, darstellt, und in der α

für alle Gase denselben Wert $\frac{1}{273}$ hat, ergibt sich, daß für $t = -273^{\circ}$ das Gas

keinen Druck erleidet. Man nennt -273° den absoluten Nullpunkt der Temperatur, und wenn man sich zu diesem den Nullpunkt eines hunderttheiligen Thermometers verschoben denkt, die der Temperatur t° entsprechende Temperatur

$$T = 273 + t$$

die absolute Temperatur, welche also beim Gefrierpunkt gleich 273° , beim Siedepunkt gleich 373° u. s. w. ist. Die obige Gleichung wird alsdann:

$$p = \frac{p_0 \cdot T}{273},$$

und ebenso ergibt sich für gleich bleibenden Druck (§ 202, 1):

$$v = \frac{v_0 \cdot T}{273};$$

das Gesetz von Gay-Lussac gestattet also folgende einfache Darstellung:

Bei gleichem Volumen ist der Druck eines Gases und bei gleichem Druck das Volumen eines Gases der absoluten Temperatur proportional.

3. Änderung des Aggregatzustandes.

§ 203. Schmelzen. Die meisten festen Körper, welche durch die Wärme nicht ihrer chemischen Natur nach verändert werden, gehen, wenn sie bis zu einem für jeden Körper bestimmten Temperaturgrad erwärmt werden, in den flüssigen Aggregatzustand über. Dieser Übergang heißt Schmelzen, die Temperatur, bei welcher derselbe eintritt, der Schmelzpunkt des Körpers. Bis unter den Schmelzpunkt abgekühlt, kehrt der Körper in den festen Aggregatzustand zurück, er erstarrt oder gefriert. Dem Schmelzen geht häufig ein Erweichen voran, so daß manche Körper ganz allmählich durch den weichen und halbflüssigen in den flüssigen Zustand übergehen.

Schmelzpunkte einiger Körper.

Kohlensäure	-58° C.	Stearinsäure	70°	Kupfer	1050°
Quecksilber	$-38,2^{\circ}$	Natrium	90°	Gulßeisen	1200°
Eis	0°	Schwefel	$113,6^{\circ}$	Gold	1200°
Butter	32°	Zinn	230°	Gußstahl	1300° — 1400°
Talg	40°	Wismut	265°	Schmiedeeisen	1600°
Phosphor	44°	Blei	330°	Platin	1700°
Kalium	58°	Zink	360°		
Wachs	68°	Silber	1000°		

Der Schmelzpunkt der Metalllegierungen ist in der Regel niedriger als der der Metalle, aus welchen sie gebildet sind. So schmilzt die Legierung $Pb_3 Sn_5$ oder etwa 3 Gewichtsteile Blei und 5 Gewichtsteile Zinn bei 186° , Rosés Metalllegierung aus 2 T. Wismut, 1 T. Blei und 1 T. Zinn, $Pb Sn Bi_2$, schon bei 94° , Woods Metall aus 1—2 T. Kadmium, 7—8 T. Wismut, 2 T. Zinn und 4 T. Blei bei 66 — 70° , die Legierung von Lipowitz ($Bi_{15} Sn_4 Pb_3 Cd_4$) schon bei 60° (vergl. § 21). — Die Temperatur der schmelzenden Lava liegt zwischen 1250° und 1500° . Kieselsäure (Quarz) und Thonerde (Korund) zeigen nur im Knallgasgebläse Spuren von Schmelzung. Unter den Metallen ist Platin sehr schwer schmelzbar, indes ist es Deville gelungen, dasselbe vor dem Knallgasgebläse in Kalktiegeln in großen Quantitäten zu schmelzen. Kohle ist unschmelzbar.

Die meisten Körper erfahren beim Schmelzen eine Zunahme des Volumens oder sind im flüssigen Zustand leichter als im festen. Wasser und Wismut hingegen dehnen sich im Augenblick des Erstarrens aus. Daher schwimmt Eis auf Wasser, und irdene Gefäße werden zersprengt, wenn das in denselben enthaltene Wasser von der Oberfläche aus gefriert. Vicentini fand (1887) für chemisch reines Wismut bei der Temperatur 24° die Dichte = $9,804$, bei der Schmelztemperatur die des festen Wismut = $9,68$, die des flüssigen = $10,01$.

Durch vermehrten Druck wird der Schmelzpunkt bei denjenigen Körpern, welche sich beim Schmelzen ausdehnen, erhöht, beim Wasser hingegen (um etwa $0,0075^{\circ}$ für 1 Atmosphäre) erniedrigt. So gelang es Mousson, durch sehr starken Druck das Eis bei -18° zu schmelzen.

§ 204. Schmelzungs- und Verdampfungswärme. Wird Schnee oder gestoßenes Eis in einem Gefäß im warmen Zimmer, oder über einer

Flamme bis zum Schmelzen erwärmt, so sieht man die Temperatur an einem hineingesteckten Thermometer, wenn dieselbe anfänglich unter 0° war, bis zum Schmelzpunkte steigen, dann aber unveränderlich auf diesem Punkt verharren, bis aller Schnee geschmolzen ist. Bei weiterer Zuführung von Wärme steigt das Thermometer wieder, bis die Temperatur den Siedepunkt erreicht hat, bei welchem dasselbe abermals unveränderlich stehen bleibt, solange noch flüssiges Wasser vorhanden ist. Die während des Schmelzens und Siedens dem Wasser zugeführte Wärme hat also nicht zur Erhöhung der Temperatur gedient, sondern ist lediglich zur Überführung aus dem festen in den flüssigen, oder aus dem flüssigen in den luftförmigen Aggregatzustand verbraucht worden. Man nennt die auf diese Weise verbrauchte Wärmemenge die Schmelzungswärme, beziehungsweise die Verdampfungswärme des Wassers. Dieselbe Erscheinung findet bei jedem Schmelzungs- oder Verdampfungsprozess statt. Umgekehrt verharrt beim Übergang aus dem luftförmigen in den flüssigen oder aus dem flüssigen Aggregatzustand in den festen das Thermometer so lange auf der Temperatur des Siedepunktes oder des Schmelzpunktes, bis aller Dampf verdichtet, oder alle Flüssigkeit erstarrt ist, indem beim Übergang aus dem höheren in den niederen Aggregatzustand eine gleich große Wärmemenge wieder erzeugt wird.

Nach der früher gangbaren Vorstellung, daß die Wärme ein besonderer Stoff sei, konnte nicht angenommen werden, daß beim Schmelzen oder Verdampfen eine gewisse Quantität dieses Stoffes verloren gehe, oder vernichtet werde, was dem Begriff des Stoffes zuwider gewesen wäre. Man war daher zu der Annahme genötigt, daß eine Quantität von Wärmestoff in einen besonderen, sogenannten latenten Zustand übergeführt werde, in welchem derselbe auf das Thermometer nicht wirken sollte, und daß diese latente Wärme erst beim Flüssigwerden des Dampfes, oder beim Erstarren der Flüssigkeit wieder frei werde oder zum Vorschein komme. Die neuere Theorie der Wärme hingegen (§§ 196, 241), nach welcher dieselbe kein Stoff, sondern ein besonderer Bewegungszustand der Körperteilchen ist, nimmt an, daß zu der Trennung der Körperteilchen eine gewisse Arbeitsgröße erforderlich sei, und daß zur Leistung dieser Arbeit eine gewisse Quantität der Wärmebewegung verbraucht werde, während umgekehrt beim Übergang aus dem luftförmigen in den flüssigen, oder aus dem flüssigen in den festen Aggregatzustand durch Wiedervereinigung der Teilchen eine gleich große Quantität der Wärmebewegung wieder erzeugt wird (vergl. § 241).

§ 205. Wärmeeinheit. Um die Temperatur eines Kilogramms Wasser um 1° C. zu erhöhen, muß demselben eine gewisse Wärmemenge zugeführt werden, welche man Wärmeeinheit oder Kalorie nennt. Mittelst dieser Wärmeeinheit können alle einem Körper zugeführten oder entzogenen, erzeugten oder verbrauchten Wärmemengen der Quantität nach mit einander verglichen werden. Um demnach p kg Wasser von 0° auf t° zu erwärmen, werden $p \cdot t$ Wärmeeinheiten erforderlich sein, und umgekehrt wird demselben eine gleiche Wärmemenge entzogen werden müssen, um seine Temperatur um t Grade zu erniedrigen.

Mischt man p_1 kg Wasser von t_1° mit p_2 kg Wasser von t_2° , so kann die Mischungstemperatur t° berechnet werden, indem man die von beiden Wassermengen abgegebenen und aufgenommenen Wärmemengen in Wärmeeinheiten ausdrückt. Ist $t_2 > t_1$, so werden die p_1 kg, deren Temperatur von t_1 auf t gestiegen ist, $p_1(t - t_1)$ Wärmeeinheiten aufgenommen haben. Die Temperatur der p_2 kg wärmeren Wassers ist gleichzeitig von t_2 auf t erniedrigt worden. Dabei hat dasselbe $p_2(t_2 - t)$ Wärmeeinheiten abgegeben. Da nun die von dem warmen Wasser abgegebene Wärmemenge von dem kalten Wasser aufgenommen worden ist und zu dessen Temperaturerhöhung gedient hat, so muß

sein, woraus folgt:

$$p_1(t-t_1) = p_2(t_2-t)$$

$$t = \frac{p_1 t_1 + p_2 t_2}{p_1 + p_2}$$

Es ist leicht, diese Betrachtung auf die Mischung beliebig vieler Wassermengen von ungleichen Anfangstemperaturen auszudehnen. (Richmannsche Regel 1750.)

§ 206. Bestimmung der Schmelzwärme. Mengt man 1 kg Wasser von 100° mit 1 kg Wasser von 0° , so beträgt die Mischungstemperatur 50° . Das warme Wasser hat, indem es sich von 100° auf 50° abkühlte, 50 Wärmeeinheiten abgegeben, und diese waren hinreichend, um eine gleiche Gewichtsmenge des kalten Wassers von 0° auf 50° zu erwärmen. Mischt man dagegen ein Kilo Wasser von 100° mit einem Kilo Schnee von 0° , so erhält man, indem der Schnee geschmolzen wird, 2 kg Wasser von $10,4^{\circ}$. Das heiße Wasser hat also 89,6 Wärmeeinheiten abgegeben, welche dazu gedient haben, den Schnee von 0° aus dem festen in den flüssigen Aggregatzustand überzuführen und die Temperatur des durch die Schmelzung entstandenen Wassers von 0° auf $10,4^{\circ}$ zu erhöhen. Zu letzterem Zweck sind 10,4 Wärmeeinheiten erforderlich. Es sind mithin zur Schmelzung eines Kilo Schnee $89,6 - 10,4 = 79,2$ Wärmeeinheiten verbraucht worden. Auf ähnliche Weise kann die Verflüssigungswärme anderer Körper bestimmt werden. — Das Wasser besitzt unter allen Körpern, für welche die Bestimmung ausgeführt worden ist, die größte Verflüssigungswärme.

Die genauesten Versuche über die Schmelzwärme des Eises (Regnault, 1843) haben die Zahl von 79,25 Wärmeeinheiten ergeben. Es ist leicht, mit Hilfe der in diesem und im vorgehenden Paragraphen erläuterten Sätze die Endtemperatur eines Gemenges von m kg Wasser von t° mit n kg Schnee von 0° zu berechnen, oder im Fall, daß die Menge des Wassers nicht zur Schmelzung des Schnees hinreicht, anzugeben, wieviel Schnee ungeschmolzen bleibt.

§ 207. Lösungswärme, Kältemischungen. Wie beim Schmelzen, so wird auch bei der Auflösung von Salzen in Wasser, oder in anderen Flüssigkeiten Wärme verbraucht. So bringen z. B. Salpeter und Salmiak bei ihrer Auflösung in Wasser eine beträchtliche Temperaturerniedrigung hervor. — Salzlösungen gefrieren bei einer niederen Temperatur als reines Wasser. Ein Gemenge von Schnee und Kochsalz wird daher bei der Vereinigung beider Bestandteile flüssig, und infolge des zur Verflüssigung derselben erforderlichen Wärmeverbrauchs sinkt die Temperatur, wenn Salz in hinreichender Menge vorhanden ist, bis zum Gefrierpunkt der gesättigten Salzlösung, welche das Produkt der Vereinigung bildet. Dasselbe findet bei Gemengen von Schnee mit anderen Salzen statt. Darauf beruhen die künstlichen Kältemischungen. So sinkt die Temperatur eines Gemenges gleicher Gewichtsteile Schnee und Kochsalz von 0° bis $-21,3^{\circ}$, die eines Gemenges von 1 Gewt. Schnee und 3 Gewt. krystallisiertem Chlorcalcium auf -33° C. Mäßig verdünnte Schwefelsäure bewirkt, auf Schnee gegossen, durch Verflüssigung desselben eine Temperaturerniedrigung bis zu -40° und -50° C.

Nach Rüdorff geben 150 Teile Schwefelcyankalium in pulverisierter Form mit 100 Teilen Wasser gemischt bei der in höchstens einer Minute erfolgenden Auflösung eine Temperaturerniedrigung von $34,5^{\circ}$. Dieses Salz bietet zugleich den Vorteil, daß es durch Eindampfen der Lösung ohne erheblichen Verlust wiedergewonnen und zu neuen Versuchen benutzt werden kann. — Schmelzen von Schnee und Eis auf den Schienen der Pferdeisenbahn durch aufgestreutes Salz.

§ 208. Überschmelzung. Viele flüssigen Körper können bei vorsichtiger Vermeidung von Erschütterungen und namentlich bei Abhaltung des Luftzutritts in geschlossenen Gefäßen bis weit unter den Schmelzpunkt abgekühlt werden, ohne zu erstarren. Bei einer Erschütterung, bei Berührung mit einem festen Körper, namentlich aber mit einem festen Teilchen desselben Körpers, schreitet dann plötzlich die Erstarrung durch die ganze Masse fort, wobei die Temperatur eines hineingesteckten Thermometers infolge der beim Festwerden stattfindenden Wärmeerzeugung bis zum Schmelzpunkt steigt. Man bezeichnet den Zustand einer auf diese Weise bis unter ihren Erstarrungspunkt abgekühlten Flüssigkeit mit dem Namen der Überschmelzung.

Mit Wasser gelingt der Versuch am besten in einem kleinen, luftleeren Glasgefäß, das zur Hälfte mit Wasser gefüllt ist und die Thermometerkugel in sich schließt. Das Wasser bleibt, bis auf -8° oder -10° abgekühlt, flüssig. Durch eine Erschütterung erstarrt dasselbe plötzlich, und das Thermometer steigt auf 0° . Ebenso können kleine Wassertröpfchen, welche in einer Flüssigkeit von gleichem spezifischen Gewichte schweben, bis weit unter 0° abgekühlt werden, ohne zu erstarren. Auf einer ähnlichen Erscheinung beruht die Bildung des sogenannten Glatteises, wobei die in der Luft bis unter 0° abgekühlten Wassertropfen durch Berührung mit dem festen Erdboden plötzlich erstarren und denselben mit einer Eistrinde überziehen. Auch die Bildung der Hagelkörner (§ 261) wird auf diese Weise erklärt.

Phosphor zeigt die Erscheinung der Überschmelzung sehr leicht beim Schmelzen unter Wasser. Geschmolzenen Schwefel kann man eine Zeit lang in heißem Wasser von 95° in flüssigem Zustande erhalten, selbst wenn man das Gefäß bewegt, oder einen Stab hineinführt; die Masse wird aber sofort fest, wenn man ein selbst noch so kleines Stück festen Schwefels hineinfallen läßt. Sehr schön beobachtet man die Überschmelzung und darauf folgende Krystallisation der wasserhaltigen Krystalle des unterschwefligsauren Natrons (Natriumthiosulfats), dessen Krystalle bei 48° schmelzen. — Eine ganz analoge Erscheinung ist die der Übersättigung der Salzlösungen.

§ 209. Verdampfen, Verdunsten, Sieden. Der Übergang aus dem flüssigen in den luftförmigen Aggregatzustand heißt Verdampfung. Dieselbe findet entweder allmählich an der Oberfläche der Flüssigkeit statt und heißt dann Verdunstung, oder sie erfolgt, bei erhöhter Temperatur, schnell und unter aufwallender Bewegung der Flüssigkeit, indem sich vom Boden des Gefäßes Dampfblasen entwickeln, welche sich beim Aufsteigen durch die Flüssigkeit vergrößern, bis sie die Oberfläche derselben erreichen. Dieser schnelle Übergang in den Dampfzustand oder das Sieden, erfolgt bei einer bestimmten Temperatur, welche der Siedepunkt der Flüssigkeit genannt wird. Derselbe ist für jede Flüssigkeit verschieden, hängt aber außerdem von dem Luftdruck ab, bei welchem das Sieden stattfindet. Der Siedepunkt des Wassers ist 100° C. bei dem mittleren Barometerstand von 760 mm (28 par.'). Bei geringerem Luftdruck, also z. B. auf hohen Bergen (§ 95), unter der Glocke der Luftpumpe (§ 98, 7), tritt das Sieden schon bei niederer Temperatur ein. In einem luftleer gemachten Glasgefäß von geeigneter Gestalt (Puls- oder Wasserhammer) kann das Wasser schon durch die Wärme der Hand in eine dem Sieden ähnliche, aufwallende Bewegung versetzt werden. Umgekehrt kann, in einem luftdicht verschlossenen Gefäß mit hinreichend starken Wänden, die Flüssigkeit bis über die Temperatur ihres Siedepunktes erhitzt werden, indem der Druck des am Entweichen verhinderten Dampfes mit der Temperatur steigt und die weitere Dampfbildung unmöglich macht. Darauf beruht der Gebrauch des Papinschen Topfes oder Digestors (1681),

welcher in einem luftdicht verschließbaren und, zur Vermeidung der Gefahr des Zerspringens, mit einem Sicherheitsventil versehenen eisernen Gefäß besteht und zum Ausziehen im Wasser löslicher Bestandteile aus Substanzen dient, welche einer höheren Lösungswärme als 100° bedürfen.

Die Erniedrigung des Siedepunktes durch eine Abnahme des Barometerstandes um 1 mm ($1''$) beträgt etwa $\frac{1^{\circ}}{27}$ C. ($\frac{1^{\circ}}{12}$ C.). Das Thermometer kann daher anstelle des Barometers zur Bestimmung des Luftdruckes gebraucht werden und wird, weil es leichter transportabel ist, namentlich zu barometrischen Höhenmessungen angewendet. Man braucht dazu ein Thermometer (Thermobarometer oder Hypsothermometer), dessen Skala nur das Intervall von etwa $85-101^{\circ}$ C. umfaßt, welchem ein Wechsel des Barometerstandes von 43—79 cm ($16-29$ par.'') entspricht (s. § 217), das aber empfindlich genug ist, um Hundertstel eines Grades mit Sicherheit beobachten zu können. — Auf dem Montblanc siedet das Wasser schon bei 85° C.

Dem Sieden geht in der Regel ein singendes Geräusch voran, welches, wie man sich durch Beobachtung des Vorganges in Glasgefäßen leicht überzeugen kann, davon herrührt, daß, wenn noch nicht die ganze Flüssigkeitsmasse bis zur Temperatur des Siedepunktes erwärmt ist, die am Boden des Gefäßes gebildeten Dampfblasen beim Aufsteigen durch die kältere Flüssigkeit wieder verdichtet werden. — Erhitzt man Wasser, welches zuvor an der Luft gestanden hat, oder Brunnenwasser, so entweicht vor dem Beginn des Siedens die im Wasser absorbierte atmosphärische Luft oder Kohlensäure (§ 107) in Form kleiner Bläschen. Erst durch längeres Kochen wird das Wasser vollkommen von der aufgelösten Luft befreit. — Im Wasser aufgelöste Salze erhöhen den Siedepunkt. — In Gefäßen mit glatten Wänden kann völlig luftfreies Wasser bis etwas über den dem stattfindenden Luftdruck entsprechenden Siedepunkt erwärmt werden, ohne ins Sieden zu geraten. Die Dampfbildung tritt dann plötzlich unter heftigem Stofsen ein. Manche anderen Flüssigkeiten zeigen diese Erscheinung in noch höherem Grade, z. B. die konzentrierte Schwefelsäure, die deshalb nur schwierig aus Glasgefäßen destilliert werden kann. Das Stofsen wird vermindert, wenn man die Dampfbildung durch einen in die Flüssigkeit gebrachten, rauhen oder pulverförmigen Körper, oder einen Metalldraht befördert. Der aus der Flüssigkeit aufsteigende Dampf zeigt immer genau die dem stattfindenden Luftdruck entsprechende Siedetemperatur.

Der aus siedendem Wasser aufsteigende Dampf ist völlig farblos und durchsichtig, solange er den luftförmigen Aggregatzustand beibehält. Durch Vermengung mit der kalten Luft verdichtet er sich zu flüssigem Wasser, welches in Form feiner Tröpfchen in der Luft schwebt und den sichtbaren Dunst bildet.

Siedepunkt einiger Flüssigkeiten unter dem Druck einer Atmosphäre (760 mm [28 par.''] Quecksilberdruck).

Stickstoffoxydul	— 87,9	Chloräthyl	+ 12,5	Phosphor	290
Kohlensäure	— 78,2	Äther	+ 35,0	Schwefelsäurehydrat	325
Schwefelwasserstoff	— 61,8	Schwefelkohlenstoff	+ 46,2	Quecksilber	357
Ammoniak	— 38,5	Alkohol	+ 78,3	Schwefel	447
Chlor	— 33,6	Wasser	100,0	Kadmium	860
Cyan	— 20	Terpentinöl	159,2	Zink	1040.
Schweflige Säure	— 10,1				

§ 210. Leidenfrosts Phänomen (1756). Eine eigentümliche Erscheinung zeigt sich, wenn Wasser, oder eine andere flüchtige Flüssigkeit, in geringen Mengen auf eine glühende Metallfläche gebracht wird. Die Flüssigkeit kommt in diesem Falle nicht ins Sieden, sondern rundet sich zu einem Tropfen ab, der in wirbelnde Bewegung gerät und allmählich durch Verdunstung verschwindet. Es findet dabei zwischen der heißen Metallfläche und der Flüssigkeit keine eigentliche Berührung statt; letztere schwebt vielmehr, gleichsam von einer von ihrer Oberfläche sich entwickelnden Dampfschicht getragen, und behält eine Temperatur, die immer um mehrere Grade unter dem Siedepunkt liegt. Boutigny nannte diesen Zustand der Flüssigkeit den sphäroidalen Zustand. Läßt man die Unterlage allmählich erkalten, so tritt bei einer gewissen Temperatur (171° bei Wasser) plötzlich die Berührung unter heftiger Dampfbildung und gewaltsamem Umherspritzen der Flüssigkeit ein. Der sphäroidale Zustand nämlich dauert nur so

lange, als der unter dem Tropfen befindliche Dampf imstande ist, den Druck der Atmosphäre, vermehrt um den des Tropfens, zu tragen. Es ist gelungen, denselben unter der Luftpumpe auf einer Unterlage, deren Temperatur geringer als 100° war, darzustellen. Faraday brachte in einen glühenden Platintiegel ein Gemenge von Äther und fester Kohlensäure (§ 212), welches den sphäroidalen Zustand annahm und dabei eine so niedere Temperatur behielt, daß man im glühenden Tiegel Quecksilber gefrieren lassen konnte. Deville goß geschmolzene Platinmassen in Wasser, welche unter dem Wasser einige Zeit lang flüssig und weißglühend blieben, ohne daß dieses ins Sieden geriet. — Es ist eine bekannte Erfahrung der Hüttenarbeiter, daß man die Hände gefahrlos in geschmolzenes Eisen tauchen kann.

§ 211. Bestimmung der Verdampfungswärme, Destillation.

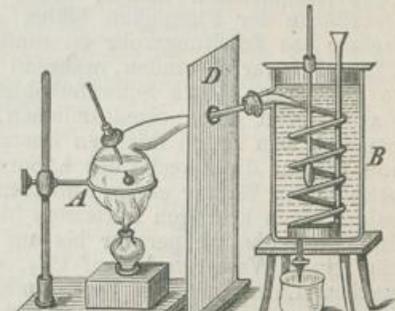
Während des Siedens bleibt die Temperatur der Flüssigkeit ungeändert, und alle derselben zugeführte Wärme wird zur Überführung aus dem flüssigen in den luftförmigen Aggregatzustand verbraucht. Eine gleich große Wärmemenge wird umgekehrt bei der Verdichtung des Dampfes zu tropfbarer Flüssigkeit wieder erzeugt (Black, 1757). Bei der Destillation einer Flüssigkeit wird der durch Erhitzung in einem Kessel (Destillierblase), oder einer Retorte entwickelte Dampf in einen von kaltem Wasser umgebenen Kolben, oder ein Schlangenrohr geleitet, in welchem derselbe sich zu Flüssigkeit verdichtet. Wegen der bei der Verdichtung stattfindenden, beträchtlichen Wärmeentwicklung muß für hinreichend schnelle Erneuerung des Kühlwassers gesorgt werden. Wasser kann in hölzernen Gefäßen durch Einleiten von Dampf bis zum Sieden erhitzt werden, und zwar vermag ein Kilogramm Dampf mehr als die fünffache Wassermenge von 0° bis zu 100° zu erwärmen. Um ein Kilogramm Wasser (bei 100° C.) in Dampf zu verwandeln, sind nämlich 537 Wärmeeinheiten erforderlich, und eine gleiche Wärmemenge wird bei der Verdichtung des Dampfes abgegeben. Das Wasser besitzt unter allen Flüssigkeiten die größte Verdampfungswärme. †

Um die Verdampfungswärme zu bestimmen, leitet man den in einem Dampfkessel *A* (Fig. 210) erzeugten Dampf in ein Schlangenrohr, das von einem Gefäß *B* umgeben ist, welches eine genau bestimmte Menge kalten Wassers enthält. Es sei dessen Gewicht *p*, seine anfängliche Temperatur t_1° . Nachdem die Temperatur des Kühlgefäßes auf t_2° gestiegen, bestimmt man die in dem Schlangenrohr verdichtete Dampfmenge *q*. Es sei *x* die gesuchte Verdampfungswärme für 1 kg Wasser. Indem *q* kg Dampf von 100° zu Wasser verdichtet worden sind, haben dieselben $q \cdot x$ Wärmeeinheiten abgegeben. Da sich ferner die *q* kg des durch Verdichtung des Dampfes entstandenen Wassers bis zur Temperatur des Kühlwassers, also auf t_2° , abgekühlt haben, so haben dieselben noch $q(100 - t_2)$ Wärmeeinheiten abgegeben. Die *p* kg kalten Wassers haben sich von t_1° auf t_2° erwärmt, mithin $p(t_2 - t_1)$ Wärmeeinheiten aufgenommen. Es muß also $qx + q(100 - t_2) = p(t_2 - t_1)$ sein, woraus:

$$x = \frac{p}{q}(t_2 - t_1) - (100 - t_2).$$

Zur Erzielung eines richtigen Resultats sind mehrfache Vorsichtsmaßregeln erforderlich. Zunächst muß das Gefäß mit kaltem Wasser vor der Erwärmung durch Strahlung vom Kessel (§ 234) durch einen Schirm *D* geschützt sein; sodann muß verhütet werden, daß flüssiges Wasser mechanisch mit dem Dampfstrom aus dem Kessel nach dem Kühlgefäß hinübergerissen werde, ferner ist der Einfluß

Fig. 210.



der äußeren Umgebung auf die Temperatur des Kühlgefäßes zu berücksichtigen. Um diesen möglichst zu beschränken, richtet man zweckmäßig den Versuch so ein, daß die Temperatur der Umgebung das Mittel zwischen der Anfangs- und Endtemperatur des Kühlgefäßes ist. Endlich ist zu beachten, daß nicht nur das im Kühlgefäße enthaltene Wasser, sondern auch das Metall, aus welchem die Wände desselben und des Schlangenrohres bestehen, erwärmt worden ist (vergl. § 226).

Regnault fand (1847), daß die latente Verdampfungswärme nicht bei allen Temperaturen dieselbe ist. Die Gesamtwärme des Dampfes wird nämlich nach Regnault durch die Formel $Q = 606,5 + 0,305 t$ ausgedrückt, d. h. so viel Wärmeinheiten sind erforderlich, um 1 kg Wasser von 0° auf t° zu erwärmen und bei dieser Temperatur in Dampf zu verwandeln. Da t Wärmeinheiten zur Erwärmung von 0° auf t° verwendet werden, so bleibt für die Verdampfungswärme bei t° die Wärmemenge $Q - t = 606,5 - 0,695 t$, also z. B. bei 100° , $606,5 - 69,5 = 537$ Wärmeinheiten.

§ 211a. Verdunstungskälte. Wie bei der schnellen Dampfbildung beim Sieden, so wird auch bei der Verdunstung Wärme verbraucht, welche der verdunstenden Flüssigkeit selbst und deren Umgebung entzogen wird. Durch schnelle Verdunstung kann daher eine bedeutende Temperaturerniedrigung erzeugt werden. Darauf beruht die Abkühlung der Flüssigkeiten durch Umwickeln der Gefäße mit feuchten Tüchern, die Anwendung poröser Thongefäße (Alkarazzas) zu demselben Zweck, von deren feuchter Oberfläche die Flüssigkeit verdunstet. Ein trockener Luftstrom beschleunigt die Verdunstung und verstärkt daher die Abkühlung. Durch Verdunstung des Äthers und anderer sehr flüchtiger Flüssigkeiten können sehr hohe Kältegrade erzeugt werden, namentlich wenn die Verdunstung im luftleeren Raum geschieht (vgl. § 98, 8). Man benutzt daher die Verdunstungskälte des Äthers und des flüssigen Ammoniaks zur künstlichen Eisbereitung (vgl. § 212).

Durch die Verdunstungskälte hat (1873) Wartha Schwefelkohlenstoff in festem Aggregatzustand dargestellt. Leitet man über die Oberfläche des in einem Glasgefäße befindlichen Kohlensulfides einen kräftigen Strom trockener Luft, so schlägt sich, während ein in die Flüssigkeit tauchendes Thermometer noch einige Grade über Null zeigt, an den inneren Wänden des Gefäßes und an dem aus der Flüssigkeit hervorragenden Teile des Thermometers eine schneeige Kruste von starrem Schwefelkohlenstoff nieder, wobei die Temperatur bis -18° sinkt. Auf der Oberfläche der Flüssigkeit bilden sich dann blumenkohlartige, weiße Massen, welche das Zuleitungsrohr verstopfen, wenn es nicht weit genug ist; bald ist alle Flüssigkeit verschwunden, während das Thermometer bis etwa -12° steigt. Der so gewonnene, feste Schwefelkohlenstoff hält sich ziemlich lange in diesem Zustande, zeigt einen eigentümlichen, aromatischen Geruch und soll schwerer entzündlich sein als im flüssigen Zustande. Er eignet sich vortrefflich zur Herstellung von Eis für die Zwecke des Laboratoriums. Man setzt dem in einer Glasflasche befindlichen Wasser einige Kubikcentimeter CS_2 zu und treibt mittelst eines Blasebalges einen kräftigen Luftstrom hindurch, so erstarrt das Wasser in kurzer Zeit, und kann die Temperatur bis auf -13° sinken. Wird mit einer Spritzflasche ein feiner Wasserstrahl auf CS_2 , der bei gewöhnlicher Temperatur durch einen starken Luftstrom zum Verdampfen gebracht wird, gespritzt, so gefriert jeder Wassertropfen augenblicklich bei der Berührung mit der Masse.

§ 212. Verdichtung der Gase. Wie die tropfbaren Flüssigkeiten durch hinreichend erhöhte Temperatur und verminderten Druck in den gasförmigen oder Dampfzustand übergeführt werden können, so ist es umgekehrt gelungen, durch hinreichend gesteigerten Druck und erniedrigte Temperatur sämtliche Gase (zuletzt [1877] auch den Sauerstoff, den Stickstoff und die atmosphärische Luft, sowie den Wasserstoff) zu tropfbaren Flüssigkeiten zu verdichten. Die Verdichtung erfolgt mehr oder minder leicht. So verdichtet sich schwefligsaures Gas schon bei der Tempe-

ratur einer Kältemischung aus Schnee und Kochsalz (§ 207) zu einer farblosen Flüssigkeit, welche bei -10° siedet, Cyangas erfordert zu seiner Verflüssigung unter dem Druck einer Atmosphäre schon eine beträchtlichere Temperaturerniedrigung, und der Siedepunkt der entstandenen Flüssigkeit liegt bei -20° u. s. f. Zwischen Gasen und Dämpfen kann eine Grenze nicht gezogen werden. Man pflegt diejenigen gasförmigen Körper Dämpfe zu nennen, welche unter dem Druck einer Atmosphäre sich schon bei den gewöhnlich herrschenden Lufttemperaturen zu Flüssigkeiten verdichten, Gase diejenigen, bei welchen ein höherer Druck, oder eine niedere Temperatur zur Verdichtung erforderlich ist. Die Tabelle der Siedepunkte (§ 209) zeigt aber, daß zwischen beiden ein völlig stetiger Übergang stattfindet.

Das wirksamste Mittel zur Verdichtung der Gase ist der Druck. Dieser kann entweder mittelst der Kompressionspumpe (§ 99) bewerkstelligt werden, oder auch dadurch, daß man die in einem geschlossenen Raum sich entwickelnden Gase sich durch ihren eigenen Druck komprimieren läßt. Bringt man z. B. in den längeren Schenkel *A* einer starken, gebogenen Glasröhre (Fig. 211) eine Quantität Cyansilber oder Cyanquecksilber und erwärmt dasselbe vorsichtig, nachdem man zuvor den kürzeren Schenkel bei *B* zugeschmolzen hat, so entwickelt sich Cyangas, welches sich durch seinen Druck in dem kürzeren Schenkel, den man in kaltes Wasser eintaucht, zu einer farblosen Flüssigkeit verdichtet. Auf ähnliche Weise kann man Ammoniakgas verdichten, welches durch Erwärmen aus einer konzentrierten wässrigen Auflösung entwickelt wird. Wasser vermag bei gewöhnlicher Temperatur etwa sein 700faches Volumen von Ammoniakgas aufzulösen (§ 107), welches beim Erwärmen bis zum Siedepunkt fast vollständig entweicht. Leitet man das Gas in einen starken eisernen, von kaltem Wasser umgebenen Recipienten, so verdichtet sich dasselbe bei einem Druck von 6 Atmosphären (bei 10° C.) zu einer Flüssigkeit, deren schnelle Verdunstung im leeren Raum sodann zur Erzeugung hoher Kältegrade, künstlicher Eisbereitung u. dgl. benutzt werden kann (Carrés Eismaschine).

Fig. 211.



Kohlensäure verdichtet sich, in einem hinreichend starkwandigen, geschlossenen Gefäß entwickelt, unter einem Druck von 38 Atmosphären bei 0° C., oder etwa 50 Atmosphären bei 10° C. (vergl. § 212a). Sicherer bedient man sich jedoch zur Erzeugung so starken Druckes der Kompressionspumpe (§ 99), mittelst deren zuerst Thilorier größere Quantitäten von Kohlensäure verflüssigte. Die durch Druck verdichtete Kohlensäure bildet eine farblose Flüssigkeit, welche, sobald der Recipient geöffnet wird, in Form eines Strahles aus demselben hervorspringt, sich aber infolge der lebhaften Verdunstung sofort bis unter ihren Gefrierpunkt (-58° C.) abkühlt und in ein weißes, schneeähnliches Pulver verwandelt. Sammelt man eine größere Menge dieser festen Kohlensäure an, so erhält sie sich, weil durch die niedere Temperatur die Verdunstung verzögert wird und ihre eigene Masse ein schlechter Wärmeleiter ist, eine Zeit lang an freier Luft und zeigt dabei eine Temperatur von -70° . Vermengt man dieselbe mit Äther und bringt das Gemenge unter den Recipienten einer Luftpumpe, so kann die Temperatur bis auf -110° erniedrigt werden. Es war dies die tiefste Temperatur, welche Faraday zu erzeugen vermochte, und mittelst welcher es ihm gelang, die meisten anderen Gase flüssig zu machen, indem dieselben entweder nur durch Uförmig gebogene Glasröhren geleitet wurden, welche an beiden Enden in feine Spitzen ausgezogen und von der Äther-Kohlensäuremischung umgeben waren, oder indem er dieselben bei dieser niederen Temperatur einem verstärkten Druck unterwarf. Mittelst dieser Methoden konnten z. B., außer den oben bereits genannten Gasen, Schwefelwasserstoff, Arsenwasserstoff, Brom- und Jodwasserstoff, Chlor, Chlorschwefelwasserstoff, Stickstoffoxydul, ölbildendes Gas in den flüssigen und zum Teil in den festen Aggregatzustand übergeführt werden.

§ 212a. Kritische Temperatur. Andrews hat 1869 gezeigt, daß ein erhöhter Druck allein zur Verdichtung eines Gases nicht immer

ausreicht, daß vielmehr einem jeden Gase eine bestimmte Temperatur zugehört, welche Andrews die kritische Temperatur des betreffenden Gases nennt, über welche hinaus das Gas durch keinen noch so sehr erhöhten Druck in den flüssigen Zustand versetzt werden kann. Diese kritische Temperatur hat Andrews z. B. für die Kohlensäure auf $30,9^{\circ}$ C. bestimmt. Wird die Kohlensäure bei dieser Temperatur einem stärkeren Druck ausgesetzt, so folgt sie zunächst als Gas dem Mariotteschen Gesetz, bis sie bei einem Druck von 74 Atm. in einen eigentümlichen Zwischenzustand zwischen Gas und Flüssigkeit, den sogenannten kritischen Zustand, gerät. Es kann keine Trennung zwischen Flüssigkeit und Gas entdeckt werden, eine kleine Veränderung aber des Druckes bewirkt eine große Veränderung der Dichtigkeit, und es zeigen sich innerhalb des Rohres ähnliche Bewegungen, wie bei der Mischung von Flüssigkeiten ungleicher Dichte, oder beim Aufsteigen erwärmter Luft in kühlere Schichten. Es gehen also bei diesem Drucke der gasförmige und flüssige Zustand ohne Unterbrechung der Continuität in einander über.

Bei $21,5^{\circ}$ C. findet die Verdichtung der Kohlensäure bei einem Druck von ungefähr 60 Atm. statt, und die Flüssigkeit nimmt nahezu ein Drittel des Volumens des Gases ein. Bei dieser Verflüssigung zeigt sich eine bestimmte Trennungsfäche zwischen der noch gasförmigen und der bereits flüssigen Kohlensäure. Bei 45° C. aber behält die Kohlensäure alle Eigenschaften eines Gases bei, d. h. sie entspricht bei jedem Drucke nahezu dem Mariotteschen Gesetz.

Cagniard de la Tour schätzte die kritische Temperatur und den Druck im kritischen Zustande bei

Schwefeläther	auf $187,5^{\circ}$ C. und	37,5 Atm.
Alkohol	„ $258,6^{\circ}$ „ „	119 „
Schwefelkohlenstoff	„ $262,5^{\circ}$ „ „	66,5 „

Bei Wasser war die kritische Temperatur so hoch (412°), daß das Wasser die Glasröhre, in der es enthalten war, aufzulösen begann.

Für Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff sprach schon 1826 Faraday die Vermutung aus, daß die Temperatur von -110° über der jetzt als kritisch bezeichneten Temperatur dieser Gase liege. Colladon hat (1826) zur Verdichtung des Sauerstoffs Versuche angestellt mit Temperaturen von -30° und einem Druck bis zu 400 Atm., ohne ein Resultat zu erzielen. Endlich (im Dezember 1877) sind fast gleichzeitig die jahrelang unabhängig von einander fortgesetzten Bemühungen zweier Forscher, L. Cailletet zu Chatillon sur Seine (Paris) und R. Pictet zu Genf, die Verflüssigung der bisher als permanent bezeichneten Gase auszuführen, erfolgreich gewesen. Nach den Mitteilungen des letzteren über die ihm gelungene Verdichtung des Sauerstoffs sinkt bei einem sich bis auf 560 Atm. steigenden Druck und bei einer Temperatur von -140° C. das Manometer auf 505 Atm., und wenn jetzt durch Öffnung des Hahns der Druck aufgehoben wird, entweicht äußerst heftig ein Strahl flüssigen Sauerstoffs. Leicht angebrannte Kohle, in diesen Strahl hineingebracht, entzündet sich von selbst sehr lebhaft. — Auch die Verflüssigung des Wasserstoffs, des Stickstoffs und der atmosphärischen Luft ist gelungen. Zur Verdichtung des Wasserstoffs steigerte Pictet bei -140° den Druck auf 650 Atm., bevor er denselben als stationär beobachtete. Nach Öffnung des Verschlußhahns strömte nunmehr der flüssige Wasserstoff heftig aus der Öffnung, zeigte eine stahlblaue Farbe und war auf eine Strecke von etwa 12 cm undurchsichtig; der Strahl wurde fast sofort intermittierend, und man fühlte Stöße am Hahn, was sich wohl durch ein teilweises Gefrieren des Wasserstoffs in der Röhre erklären läßt. — Nach S. v. Wroblewski (1883) beträgt die kritische Temperatur des Sauerstoffs -113° und zwar bei einem Druck von 50 Atm., für den Stickstoff bezüglich -146° und 32,5 Atm.

§ 213. Sättigungsmenge. Läßt man reines Wasser an der freien Luft verdunsten, so verwandelt sich dasselbe vollständig in Dampf, ohne

einen Rückstand zu hinterlassen. Bringt man dagegen eine gewisse Wassermenge in einen geschlossenen Raum, z. B. unter eine Glasglocke, so verdunstet nur ein Teil des Wassers, indem dieser Raum bei jeder Temperatur nur eine ganz bestimmte Menge Wasserdampf aufzunehmen vermag, welche die Sättigungsmenge des Raumes für diese Temperatur genannt wird. Die Sättigungsmenge wächst mit der Temperatur. Steigt daher die Temperatur, so kann eine neue Wassermenge verdunsten, sinkt dagegen die Temperatur eines mit Dampf gesättigten Raumes, so muß sich ein Teil des in demselben enthaltenen Dampfes im tropfbarflüssigen Zustande niederschlagen; man bemerkt zunächst an derjenigen Stelle der Gefäßwand, von welcher die Temperaturerniedrigung ausgeht, den Niederschlag in Form eines feinen, aus kleinen Wassertröpfchen gebildeten Taus, die bald zu größeren Tropfen zusammenfließen. Ebenso verdichtet sich der Wasserdampf an einem kalten Körper, welcher in einen warmen, mit feuchter Luft erfüllten Raum gebracht wird, an den kalten Fensterscheiben eines geheizten Zimmers u. s. w., indem die zunächst mit dem kalten Körper in Berührung kommenden Luftteilchen so weit abgekühlt werden, daß sie nicht mehr die ganze in ihnen enthaltene Dampfmenge im luftförmigen Zustande aufzunehmen imstande sind (vergl. § 218,2). Dalton fand (1801) das merkwürdige Gesetz auf, daß die Sättigungskapazität eines Raumes für den Dampf irgend einer Flüssigkeit unabhängig ist von dem Vorhandensein und der Natur eines anderen in dem Raum befindlichen Gases; so daß also z. B. ein Raum von 1 cdm stets dieselbe Menge Wasserdampf aufzunehmen imstande ist, gleichviel ob er luftleer, oder mit atmosphärischer Luft, Sauerstoff, Wasserstoff, oder irgend einem anderen Gas oder Dampf von beliebiger Dichtigkeit erfüllt ist. Nur sättigt sich ein luftleerer Raum in kürzerer Zeit mit Dampf, als wenn er mit Gas gefüllt ist, weil dieses der schnellen Ausbreitung des Dampfes ein Hindernis entgegengesetzt.

§ 214. Spannkraft des gesättigten Dampfes. Der in einem Raum befindliche Dampf übt, wie andere luftförmige Körper, vermöge seiner Elasticität einen Druck auf die Wände des Gefäßes aus, in welchem er enthalten ist. Dieser Druck wächst mit der Temperatur und Dichtigkeit des in dem Raum enthaltenen Dampfes. Jeder Temperatur entspricht eine gewisse Sättigungsmenge, mithin auch ein Maximum der Spannkraft des gesättigten Dampfes. Um diese Spannkraft für verschiedene Temperaturen zu bestimmen, muß man ein verschiedenes Verfahren einschlagen, je nachdem man die Bestimmung für Temperaturen ausführen will, welche unter oder über dem Siedepunkt der Flüssigkeit liegen. Jede Flüssigkeit siedet nämlich bei derjenigen Temperatur, bei welcher die Spannkraft ihres gesättigten Dampfes dem auf der Flüssigkeit lastenden Atmosphärendruck gleichkommt. Ist diese Temperatur erreicht, so vermögen die vom Boden des Gefäßes und aus dem Innern der Flüssigkeit sich entwickelnden Dämpfe durch ihre Expansivkraft den Druck der auf der Oberfläche der Flüssigkeit lastenden Atmosphäre zu überwinden.

§ 215. Zur Bestimmung des Maximums der Spannkraft der Dämpfe bei niederen Temperaturen bedient man sich der Torricellischen Röhre (§ 90). Mehrere 800 mm (30") lange, an einem Ende zugeschmolzene, mit Quecksilber gefüllte und durch Auskochen von Luft befreite Röhren werden, mit dem

offenen Ende in ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß getaucht, neben einander aufgestellt, so daß in jeder derselben ein Torricellisches Vacuum entsteht. Eine der Röhren bleibt luftleer; in jede der anderen Röhren bringt man eine geringe Menge einer der Flüssigkeiten, deren Dampfspannungen bestimmt werden sollen. Diese Flüssigkeiten steigen, vermöge ihres geringeren specifischen Gewichts, bis zum Gipfel der in der Röhre enthaltenen Quecksilbersäule auf, und der über derselben befindliche leere Raum wird mit dem Dampf der Flüssigkeit gesättigt. Die Quecksilbersäule sinkt infolge des von dem gebildeten Dampf auf ihren Gipfel ausgeübten Druckes, und der Höhenunterschied des Quecksilbers in der leeren und in der mit Dampf gesättigten Röhre giebt die Spannkraft des gesättigten Dampfes an, wenn man die geringe, leicht aus dem specifischen Gewicht der Flüssigkeit zu berechnende Depression in Abrechnung bringt, welche von dem Gewicht des über der Quecksilbersäule befindlichen Flüssigkeitstropfens herrührt. Will man die Spannkraft der Dämpfe für verschiedene Temperaturen bestimmen, so braucht man nur den ganzen Apparat mit einem weiteren Gefäß zu umgeben, welches mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt ist, deren Temperatur durch Thermometer genau bestimmt werden kann. Mit wachsender Temperatur sieht man dann durch die vergrößerte

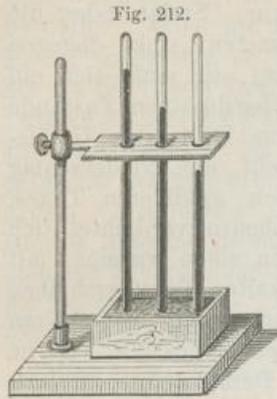


Fig. 212.

Dampfspannung im Innern der Röhren das Quecksilberniveau sich mehr und mehr erniedrigen. Bei der Temperatur des Siedepunkts der in der Röhre enthaltenen Flüssigkeit steht das Niveau innen und außen gleich hoch, die Elasticität des Dampfes hält also gerade dem Druck der äußeren Luft das Gleichgewicht.

§ 216. Zur Bestimmung des Dampfdruckes bei Temperaturen, welche den Siedepunkt überschreiten, kann man sich einer Röhre (Fig. 213) bedienen, die aus einem kurzen und weiten, geschlossenen Schenkel und einem engeren, hinreichend langen und oben offenen Schenkel besteht. Dieselbe ist mit Quecksilber gefüllt, über welchem sich im kürzeren Schenkel bei *A* eine geringe Menge der Flüssigkeit befindet, deren Dampfspannung bestimmt werden soll. Wird dieselbe durch ein das weitere Gefäß umgebendes Wasser- oder Ölbad bis über ihren Siedepunkt erhitzt, so treiben die sich entwickelnden Dämpfe das Quecksilber durch ihren Druck in dem engen, offenen Schenkel in die Höhe, so lange bis der Druck der gehobenen Quecksilbersäule zusammen mit dem Druck der Atmosphäre der Elasticität des Dampfes das Gleichgewicht hält. Beträgt z. B. der Niveauunterschied des Quecksilbers in beiden Schenkeln 760 mm (28"), so ist der Druck des Dampfes 2 Atmosphären, bei einem Niveauunterschied von 1520 mm 3 Atmosphären u. s. f. Dabei muß darauf geachtet werden, daß in dem Gefäß bei *A* immer noch eine kleine Flüssigkeitsmenge im tropfbarflüssigen Aggregatzustand vorhanden sein muß. Wäre bereits

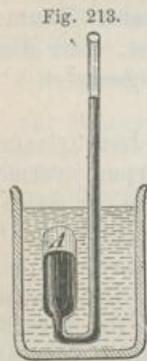


Fig. 213.

alle Flüssigkeit verdampft, und würde die Temperatur noch weiter gesteigert, so enthielte der Raum bei *A* nicht mehr die ganze Dampfmenge, die er bei der stattfindenden Temperatur enthalten kann. Der Dampf heißt in diesem Fall überhitzt.

In der Praxis wendet man zur Bestimmung der Dampfspannung in Dampfkesseln offene oder geschlossene Manometer (§ 93) an.

§ 217. Von den folgenden Tabellen giebt die erste eine Vergleichung der Spannkraft der Dämpfe einiger Flüssigkeiten bei verschiedenen Temperaturen, die zweite die Spannkraft des Wasserdampfes für höhere Temperaturen nach den Resultaten der Versuche von Regnault. Eine dritte Tabelle über die Spannkraft und Sättigungsmenge des Wasserdampfes zwischen -15° und $+30^{\circ}$ C. siehe unter § 221.

A. Dampfspannungen einiger Flüssigkeiten in par.™ und mm.

Temp. C.	Schweflige Säure.		Äther.		Alkohol.		Wasser.	
	par.™	mm	par.™	mm	par.™	mm	par.™	mm
-20°	212;	478	30;	68	1,5;	3,4	0,4;	0,9
-10°	338;	762	50;	113	2,9;	6,5	0,9;	2,0
0°	516;	1164	81;	183	5,7;	12,9	2,0;	4,5
10°	762;	1719	127;	286	10,8;	24,4	4,0;	9,0
20°	1091;	2461	192;	433	19,7;	44,4	7,7;	17,4
30°	1521;	3431	282;	636	34,8;	78,5	14,0;	31,6
40°	2070;	4670	403;	909	59,2;	133,5	24,3;	54,8
50°	2758;	6222	563;	1270	97,5;	214,9	40,8;	92,0
60°	4092;	9231	766;	1728	155,2;	350,1	66,0;	148,9
70°	—	—	1023;	2302	239,9;	541,2	103,3;	233,5
80°	—	—	1341;	3025	360,3;	812,8	157,0;	354,2
90°	—	—	1728;	3898	526,8;	1188,4	232,9;	525,4
100°	—	—	2195;	4952	751,4;	1695,0	336,9;	760,0

B. Dampfspannung des Wassers für höhere Temperaturen in Atmosphären (1 Atm. = 336,9 par.™ oder 760 mm).

Temp.		Temp.	
C.	Atm.	C.	Atm.
100°	1	161,5	6,5
111,7	1,5	165,3	7
120,6	2	168,2	7,5
127,8	2,5	170,8	8
133,9	3	175,8	9
139,2	3,5	180,3	10
144,0	4	213,0	20
148,3	4,5	236,2	30
152,2	5	252,5	40
155,9	5,5	265,9	50
159,2	6		

Man sieht aus diesen Tabellen, daß mit wachsender Temperatur die Spannkraft der Dämpfe in immer schnellerem Verhältnis zunimmt. Die Spannkraft des Wasserdampfes bei verschiedenen Temperaturen wird mit hinreichender Genauigkeit durch die von August angegebene Formel dargestellt:

$$\log p = \frac{A(t - 100)}{B + t}$$

worin bei Anwendung dekadischer Logarithmen $A = 5,057$, $B = 226,37$ zu setzen ist. Man erhält mittelst der Formel den Druck in Atmosphären ausgedrückt. Wählt man irgend eine andere Einheit, so hat man nur zu $\log p$ den Logarithmus einer Atmosphäre, in der gewünschten Einheit ausgedrückt, zu addieren, bevor man den Numerus aufschlägt.

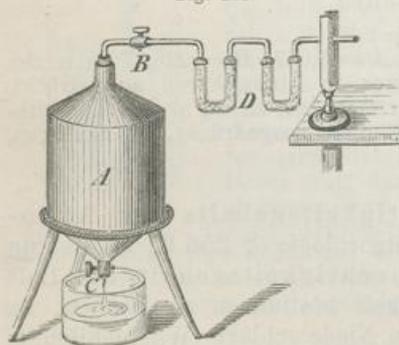
§ 218. Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts der Atmosphäre oder Hygrometrie. Für die Meteorologie (§ 256 ff.) ist es von großer Wichtigkeit, den jedesmaligen Feuchtigkeitsgehalt der Luft mit möglichster Schnelligkeit und Genauigkeit bestimmen zu können, da durch denselben der Eintritt der wässerigen Niederschläge (Wolkenbildung, Regen, Schnee, Tau u. s. w.) wesentlich bedingt ist. Infolge der Verdunstung von der Oberfläche des Meeres, der Binnengewässer, der Vegetation u. s. w. ist die Luft, namentlich in ihren unteren Schichten, stets teilweise mit Wasserdampf gesättigt. Enthält dieselbe fast die ganze zu ihrer Sättigung erforderliche Menge, so heißt sie feucht, enthält sie nur wenig Wasserdampf, so heißt sie trocken. Bei gleichem absoluten Gehalt an Wasserdampf wird eine Luftmenge um so feuchter erscheinen, je niedriger ihre Temperatur ist. Wird die Temperatur mehr und mehr erniedrigt, so

wird bei einem gewissen Temperaturgrade die vorhandene Dampfmenge zur Sättigung des Luftraumes hinreichend sein und bei weiterer Erniedrigung der Temperatur ein Teil derselben sich im flüssigen Zustande niederschlagen beginnen (§ 213). Der Temperaturgrad, bei welchem der Niederschlag eintritt, heisst der Taupunkt. Die zum Eintritt des Niederschlags erforderliche Temperaturerniedrigung wird um so grösser sein, oder der Taupunkt wird um so tiefer unter der Lufttemperatur liegen, je trockener die Luft ist.

Der absolute Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre, d. h. die in der Volumeneinheit der Luft enthaltene Gewichtsmenge Wasserdampf, wächst und fällt im allgemeinen mit der Temperatur, ist daher im Sommer grösser als im Winter, in den Nachmittagsstunden grösser als kurz vor Sonnenaufgang. Den umgekehrten Gang befolgt das mittlere Sättigungsverhältnis oder die relative Feuchtigkeit, d. h. die Zahl, welche angiebt, wieviel Prozent von der zur Sättigung für die stattfindende Temperatur erforderlichen Wasserdampfmenge in der Luft enthalten sind. Die Atmosphäre pflegt ihrem Sättigungspunkt um so näher zu sein, je niedriger die Temperatur ist. (Vergl. auch §§ 254, 256).

Die genaueste Methode zur Bestimmung des Wasserdampfgehalts der Luft ist die Methode der Absorption und direkten Wägung. Dieselbe beruht auf der Eigenschaft gewisser Salze und Flüssigkeiten, den in der Luft enthaltenen Wasserdampf an sich zu ziehen und vollständig zu absorbieren. In besonders hohem Grade besitzen diese Fähigkeit das wasserfreie (geschmolzene) Chlorcalcium und die konzentrierte Schwefelsäure (Schwefelsäurehydrat). Leitet man feuchte Luft durch eine Röhre, welche mit Chlorcalciumstücken oder mit Bimsstein, getränkt mit konzentrierter Schwefelsäure, angefüllt ist, so wird dieselbe vollständig ihres Feuchtigkeitsgehaltes beraubt, und die Gewichtszunahme der Röhre während des Hindurchleitens der Luft giebt genau die in der Luft enthaltene Feuchtigkeitsmenge an. Um ein genau bestimmtes Luftvolumen durch die Röhre zu leiten, bedient man sich eines Aspirators, d. h. eines Gefässes *A* (Fig. 214), von genau

Fig. 214.



bekanntem Inhalt, welches oben und unten, bei *B* und *C*, mit Öffnungen versehen ist, die durch Hähne verschlossen werden können, und welches vor dem Versuche mit Wasser gefüllt wird. Mit der oberen Öffnung können die mit Chlorcalciumstücken gefüllten und vorher genau gewogenen Röhren *D* mittelst eines Kautschukschlauches in Verbindung gesetzt werden. Öffnet man dann die Hähne *B* und *C*, so daß das Wasser bei *C* langsam ausfließt, so wird durch die Röhren *D* ein dem ausgeflossenen Wasservolumen genau gleiches Luftvolumen angesaugt und giebt seinen Feuchtigkeitsgehalt an das Chlorcalcium ab. Die Gewichtszunahme der Röhren *D* nach dem Versuch giebt daher die in dem angesaugten Luftvolumen enthaltene Feuchtigkeitsmenge an. Um zu verhüten, daß Wasserdampf rückwärts aus dem Gefäß *A* nach *D* gelange, kann zwischen *D* und *B* noch ein kleines, mit Chlorcalcium gefülltes Rohr angebracht werden, welches mit dem Aspirator in Verbindung bleibt. — Diese Methode giebt die genauesten Resultate, erfordert aber die größte Zeit und Mühe und ist deshalb zu schneller Bestimmung der Luftfeuchtigkeit für praktische Zwecke nicht geeignet.

§ 219. Die Hygrometer oder Apparate zur schnellen Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts der Luft können in verschiedene Klassen geteilt

werd
schat
der
deru
Kon
keits
mitte
der
perat
trock
stung

Sa u
Delu
und
Erwä
Fetti
Ende
B, u
geger
an w
ange
Span
Aufs
die g
der
einer
größ
damp
ment
mit k
Wän
beide
Hygr
des I
streif
er da

D
hinrei
den I
ihren
sich n
und c
Änder
A
z. B.
mehre
spirali
meiste
pisch.
ner L

Wass

werden, nämlich in 1) solche, welche auf der hygroskopischen Beschaffenheit gewisser organischen Körper beruhen, d. i. auf der Eigenschaft derselben, durch den Einfluß der Luftfeuchtigkeit eine Änderung ihrer Gestalt oder Ausdehnung zu erleiden; 2) die Kondensationshygrometer, bei welchen der Feuchtigkeitsgehalt der Luft durch Bestimmung des Taupunktes ermittelt wird; 3) das Psychrometer, dessen Gebrauch auf der Bestimmung der durch die Verdunstung erzeugten Temperaturenniedrigung beruht, welche um so größer ist, je trockener die Luft ist, und je schneller daher die Verdunstung erfolgt.

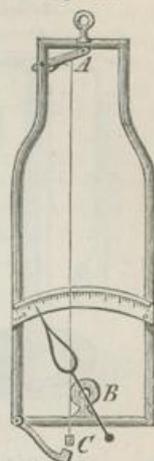
Zur ersten Klasse gehören das Haarhygrometer von Saussure (1783) und das Fischbeinhygrometer von Deluc (1788). Ersterer benutzte ein weiches, nicht krauses und am besten blondes Menschenhaar, welches zuvor durch Erwärmen in einer verdünnten Sodalösung seiner natürlichen Fettigkeit beraubt worden war. Dasselbe wird mit einem Ende, bei *A*, festgeklemmt und mit dem anderen Ende, bei *B*, um eine kleine Rolle geschlungen. Durch einen in entgegengesetzter Richtung um die Rolle geschlungenen Faden, an welchem ein kleines Gewichtchen *C* oder eine Spiralfeder angebracht ist, wird das Haar in schwacher und immer gleichmäßiger Spannung erhalten. Bei feuchter Luft verlängert sich das Haar durch Aufsaugung von Feuchtigkeit, bei trockener Luft verkürzt es sich, und die geringsten Änderungen seiner Länge werden durch einen an der Axe der Rolle *B* befestigten Zeiger sichtbar gemacht, dessen Ende sich auf einer in 100 Grade getheilten Skala bewegt, auf welcher der Nullpunkt der größten Trockenheit, die Zahl 100 der Sättigung der Luft mit Wasserdampf entspricht. Ersterer Punkt wird bestimmt, indem man das Instrument unter eine Glasglocke bringt, welche Chlorcalcium oder eine Schale mit konzentrierter Schwefelsäure enthält, letzterer unter einer Glocke, deren Wände ganz mit Wasser befeuchtet sind. Der Zwischenraum zwischen beiden Stellungen des Zeigers wird in 100 gleiche Grade geteilt. — Das Hygrometer von Deluc ist ganz ähnlich eingerichtet, enthält aber anstelle des Haares einen dünnen, quer über die Fasern geschnittenen Fischbeinstreifen. Deluc bestimmte den Punkt der größten Feuchtigkeit, indem er das ganze Instrument in Wasser tauchte.

Diese Instrumente sind für die Beobachtung sehr bequem, geben aber keine hinreichend zuverlässigen Resultate. Die Grade derselben entsprechen keineswegs den Prozenten des Feuchtigkeitsgehalts der Luft, beide Instrumente stimmen in ihren Angaben nicht überein, zwei Instrumente derselben Gattung unterscheiden sich nicht selten beträchtlich in ihrem Gange, und sogar die Empfindlichkeit eines und desselben Instruments für den Wechsel der Luftfeuchtigkeit ist bedeutenden Änderungen unterworfen.

Andere hygroskopische Körper, welche zu Hygrometern benutzt werden, sind z. B. Darmsaiten (in den sogenannten Wetterhäuschen), die Fruchtgrannen mehrerer Arten der Gattung Geranium, welche sich im trockenen Zustande spiralig zusammenrollen, im feuchten Zustand aufrollen und dergl. mehr. Die meisten pulverförmigen Körper sind in mehr oder minder hohem Grade hygroskopisch. Gedrehte Hanfseile verkürzen sich in feuchter, verlängern sich in trockener Luft.

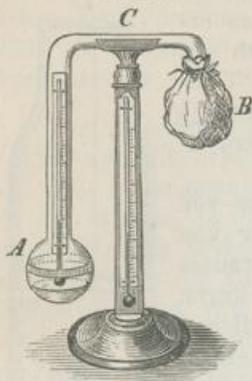
§ 220. Kondensationshygrometer. Bringt man in ein Glas Wasser ein Thermometer und erniedrigt die Temperatur des Wassers all-

Fig. 215.



mählich durch Hinzufügen von Eis oder kaltem Wasser, so wird sich bei einem gewissen Temperaturgrade auf der Außenfläche des Glases ein feiner Tau von Wassertröpfchen zu zeigen beginnen. Die Temperatur, welche

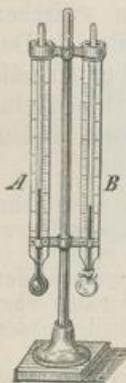
Fig. 216.



das Thermometer in diesem Augenblick anzeigt, ist der Taupunkt (§ 218). Sobald nämlich die mit dem Glase in Berührung kommenden Luftteilchen bis zu dieser Temperatur abgekühlt werden, beginnt sich der in ihnen enthaltene Wasserdampf in flüssigem Aggregatzustand niederzuschlagen. Zur genauen Bestimmung des Taupunktes dient das Daniellsche Ätherhygrometer (1820). Dasselbe besteht aus zwei Glaskugeln A und B (Fig. 216), welche durch ein zweimal knieförmig gebogenes Rohr C mit einander verbunden sind. Die Kugel A ist etwa zur Hälfte mit Äther gefüllt und enthält das Gefäß eines kleinen Thermometers, welches bis unter die Oberfläche des Äthers hinabreicht, während die Skala im längeren Schenkel der Röhre C eingeschlossen ist. Der übrige Teil der Röhre

und der Kugeln ist luftleer und enthält nur Ätherdampf. Die Kugel B ist mit dünnem Zeug umhüllt, auf welches beim Versuch Äther getropft wird. Die durch die Verdunstung des Äthers bewirkte Temperaturerniedrigung hat eine teilweise Kondensation des Ätherdampfes im Innern der Kugel B zur Folge. In der Kugel A bildet sich infolgedessen neuer Ätherdampf und entzieht die zu seiner Bildung erforderliche Wärme dem zurückbleibenden Äther, dem Gefäß und dem Thermometer, welches langsam zu sinken beginnt. Sobald auf der Oberfläche des Gefäßes ein feiner Hauch von Wassertröpfchen sichtbar wird, beobachtet man die Temperatur des Taupunktes, während gleichzeitig ein zweites, an dem Stativ des Instrumentes angebrachtes Thermometer die Lufttemperatur anzeigt.

Fig. 217.



Mit Hilfe der Tabelle A, § 221, ist dann die absolute, in der Luft enthaltene Dampfmenge, sowie der Prozentgehalt im Verhältnis zur Sättigungsmenge leicht zu bestimmen. Ist z. B. die Lufttemperatur 16° C., die des Taupunktes aber 9° C., so enthalten 1000 Liter Luft nur 8,77 g Wasserdampf, während dieselben bei 16° C. 13,56 g aufzunehmen imstande wären; das Sättigungsverhältnis ist daher $\frac{8,77}{13,56}$ oder 64,7 Prozent.

§ 221. Das Psychrometer von August (1828) besteht aus zwei in ihrem Gange sehr genau übereinstimmenden Thermometern A und B (Fig. 217), welche neben einander auf einem Stativ befestigt sind. Dieselben müssen empfindlich genug sein, um Zehntelgrade mit Sicherheit ablesen zu können. Die Kugel des einen Thermometers ist mit dünnem Zeug umwickelt, welches fortwährend feucht erhalten wird. Infolge der Verdunstung steht das feuchte Thermometer immer niedriger als das trockene, und der Temperaturunterschied zwischen beiden oder die psychrometrische Differenz ist um so größer, je schneller die Verdunstung vor sich geht. Sie ist Null in einem mit Feuchtigkeit gesättigten Raum, in welchem keine

Verdunstung
daher
so
die

folgt
 t_1 die
Differenz
ratur
obac
des
Feuch
enthä
zu d
Verd
Temp
Wär
den
Liter
welch
die v

sein,

Bezei
den
entha
zu at
eines
einer

ist b

mithi

ebens

Setzt
mit V

oder,
beträ

Man
Damp
Damp

(Tafel

achte
inzw
verna
dieser
darf.
rektion
unten

Verdunstung stattfindet, und am größten in absolut trockener Luft. Wenn daher die Lufttemperatur und die psychrometrische Differenz bekannt sind, so läßt sich daraus der Grad der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe einer zu diesem Zweck berechneten Tabelle ableiten.

Die der Berechnung dieser Tabelle zu Grunde liegende Formel kann durch folgende Betrachtungen hergeleitet werden. Es sei t die Temperatur des trockenen, t_1 die des feuchten Thermometers, also $t - t_1 = d$ die beobachtete psychrometrische Differenz. Ferner sei m die Sättigungsmenge eines Liters Luft bei der Temperatur t , m_1 die Sättigungsmenge für die Temperatur t_1 , a die zur Zeit der Beobachtung in einem Liter wirklich vorhandene Dampfmenge. Die an der Kugel des feuchten Thermometers vorbeistreichende Luft sättigt sich an derselben mit Feuchtigkeit für die Temperatur t_1 . Da 1 Liter Luft bereits die Dampfmenge a enthält, so wird es noch $m_1 - a$ Gewichtseinheiten Dampf aufzunehmen fähig sein, zu deren Verdunstung $(m_1 - a) \cdot l$ Wärmeeinheiten erforderlich sind, wenn l die Verdampfungswärme der Gewichtseinheit Wasser (§ 211) bezeichnet. Wenn die Temperatur des feuchten Thermometers konstant geworden ist, so muß diese Wärmemenge durch die umgebende Luft geliefert werden, welche sich, indem sie den Dampf aufnimmt, um $t - t_1 = d$ Grade abkühlt. Es sei P das Gewicht eines Liters Luft und c die spezifische Wärme der Luft (§ 230), oder die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um ein Kilogramm Luft um 1° zu erwärmen, so ist Pcd die von der Luft abgegebene Wärmemenge. Es muß also

$$(m_1 - a) \cdot l = Pcd$$

sein, woraus folgt:

$$a = m_1 - \frac{Pc}{l} \cdot d.$$

Bezeichnen ferner e und e_1 die Spannkraften des gesättigten Wasserdampfes bei den Temperaturen t und t_1 , x die gesuchte Spannkraft des in der Luft wirklich enthaltenen Dampfes, $s = 0,622$ die Dichtigkeit des Wasserdampfes im Verhältnis zu atmosphärischer Luft von gleicher Spannung und Temperatur, P_0 das Gewicht eines Liters Luft im Normalzustand (§ 202), d. h. bei 0° und unter dem Druck einer Atmosphäre (336^{mm}), endlich b den Barometerstand in Linien ausgedrückt, so ist bei 0° und dem Barometerstand b das Gewicht eines Liters Luft gleich $P_0 \cdot \frac{b}{336}$, mithin bei der Temperatur t_1

$$P = \frac{P_0}{1 + at_1} \cdot \frac{b}{336}$$

ebenso ergibt sich

$$m_1 = \frac{P_0 s}{1 + at_1} \cdot \frac{e_1}{336} \quad \text{und} \quad a = \frac{P_0 s}{1 + at} \cdot \frac{x}{336}$$

Setzt man diese Werte für P , m_1 und a in obiger Gleichung ein, so erhält man, mit Weglassung der allen Gliedern gemeinschaftlichen Faktoren,

$$\frac{sx}{1 + at} = \frac{se_1}{1 + at_1} - \frac{c}{l} \cdot \frac{b}{1 + at_1} \cdot d,$$

oder, da ohne erheblichen Fehler die Ausdrücke $1 + at$ und $1 + at_1$ als gleich betrachtet werden dürfen,

$$x = e_1 - \frac{cb}{ls} \cdot d = A - B$$

Man findet also die Spannkraft des in der Atmosphäre wirklich vorhandenen Dampfes, indem man von der Spannkraft e_1 des für die Temperatur t_1 gesättigten Dampfes (Tafel A) ein der psychrometrischen Differenz d proportionales Glied (Tafel B) abzieht. Bei Berechnung des Faktors $\frac{cb}{ls}$ ist, genau genommen, zu beachten, daß die Verdampfungswärme l von der Temperatur abhängig ist (§ 210); inzwischen lehrt die Erfahrung, daß man ohne merklichen Fehler diese Änderung vernachlässigen und bei dem mittleren Barometerstand $b_0 = 336^{\text{mm}}$ (760 mm) für diesen Faktor den konstanten Wert 0,256 par.^{mm}, bezüglich 0,5775 mm, annehmen darf. Bei höherem oder tieferem Barometerstand ist dem Abzugsgliede eine Korrektion hinzuzufügen, welche aus einer besonderen Tabelle entnommen oder wie unten angegeben, berechnet werden kann.

Ist die Temperatur t_1 unter 0° , also die Kugel des Feuchthermometers mit Eis bedeckt, so ist das Abzugsglied im Verhältnis von 8 : 7 zu verkleinern.

Um aus der gefundenen Spannkraft x das Sättigungsverhältnis abzuleiten, hat man dieselbe durch die Spannkraft e des gesättigten Dampfes bei der Temperatur t^0 zu dividieren. — Zeigt z. B. das Luftthermometer 18° , das feuchte Thermometer 12° , d. h. ist die psychrometrische Differenz 6° , so ergibt sich $A = 10,46$ mm, $B = 3,46$ mm, folglich ist die Spannkraft des in der Atmosphäre vorhandenen Dampfes $x = 7,00$ und das Sättigungsverhältnis, die relative Feuchtigkeit, $\frac{7,00}{15,36} = 45,6$ Prozent. Als Taupunkt aber ergibt sich die zur Spannung 7,00 gehörige Temperatur 6° C.

A. Spannkraft und Sättigungsmenge des Wasserdampfes für Temperaturen von -15 bis $+30^\circ$ C.

(Die Spannkraften sind in par.™ und mm, die Sättigungsmenge für 1 cbm in Grammen ausgedrückt.)

Temp. C.	Druck		Sättigungsmenge.	Temp. C.	Druck		Sättigungsmenge.	Temp. C.	Druck		Sättigungsmenge.
	par.™	mm			par.™	mm			par.™	mm	
-15°	0,62;	1,40	1,58	0°	2,04;	4,60	4,82	15°	5,63;	12,70	12,75
-14	0,67;	1,52	1,71	1	2,19;	4,94	5,16	16	6,00;	13,54	13,56
-13	0,73;	1,64	1,85	2	2,35;	5,30	5,52	17	6,39;	14,42	14,40
-12	0,79;	1,78	2,00	3	2,52;	5,69	5,92	18	6,81;	15,36	15,29
-11	0,86;	1,93	2,16	4	2,70;	6,10	6,32	19	7,25;	16,37	16,23
-10	0,93;	2,09	2,33	5	2,90;	6,53	6,75	20	7,71;	17,39	17,23
-9	1,01;	2,27	2,52	6	3,10;	7,00	7,22	21	8,20;	18,49	18,25
-8	1,09;	2,46	2,72	7	3,32;	7,49	7,71	22	8,72;	19,66	19,32
-7	1,18;	2,66	2,93	8	3,55;	8,02	8,22	23	9,26;	20,89	20,46
-6	1,27;	2,87	3,15	9	3,80;	8,57	8,77	24	9,83;	22,18	21,67
-5	1,38;	3,11	3,38	10	4,06;	9,16	9,36	25	10,44;	23,55	22,93
-4	1,49;	3,37	3,63	11	4,34;	9,79	9,97	26	11,08;	24,99	24,26
-3	1,62;	3,64	3,89	12	4,64;	10,46	10,61	27	11,75;	26,50	25,63
-2	1,75;	3,94	4,17	13	4,95;	11,16	11,28	28	12,46;	28,10	27,08
-1	1,89;	4,26	4,48	14	5,28;	11,91	11,99	29	13,20;	29,78	28,61
0	2,04;	4,60	4,82	15	5,63;	12,70	12,75	30	13,99;	31,55	30,21

B. Tafel zur Berechnung des Abzugsgliedes.

d	B		d	B	
	par.™	mm		par.™	mm
1	0,26	0,58	11	2,82	6,35
2	0,51	1,55	12	3,07	6,93
3	0,77	1,73	13	3,33	7,51
4	1,02	2,31	14	3,58	8,08
5	1,28	2,89	15	3,84	8,66
6	1,54	3,46	16	4,10	9,24
7	1,79	4,04	17	4,35	9,82
8	2,05	4,62	18	4,61	10,39
9	2,30	5,20	19	4,86	10,97
10	2,56	5,77	20	5,12	11,55

C. Die Barometerkorrektur kann mit hinreichender Genauigkeit $= \frac{bd}{1250}$ angenommen werden und ist vom Abzugsglied B zu subtrahieren, oder zu demselben zu addieren, je nachdem der Barometerstand um b par.™ (mm) niedriger oder höher ist als $28''$ (760 mm).

§ 222. Anwendung des Dampfdruckes als bewegender Kraft; Dampfmaschinen. Schon Hero von Alexandrien (vergl. § 96) beschrieb mehrere Vorrichtungen, um durch die Kraft des ausströmenden Dampfes Bewegungen zu erzeugen, darunter die Äolipile, welche durch die Rückwirkung des ausströmenden Dampfes nach Art der Segnerschen

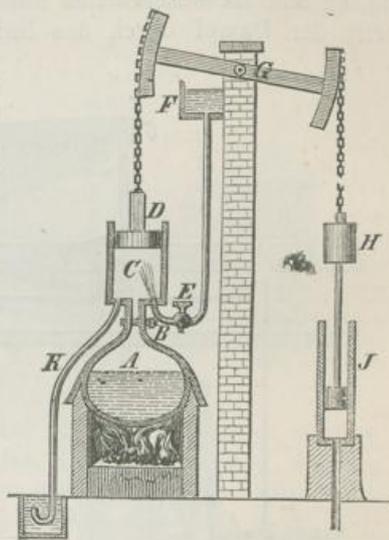
Turbine (§ 87) in Umdrehung versetzt wird. Im Jahre 1615 benutzte Salomon de Caus den Druck des eingeschlossenen Dampfes zum Heben von Wasser, mittelst einer dem Heronsball (§ 96) dem Princip nach vergleichbaren Vorrichtung. Später (1690) erfand Papin die erste Dampfmaschine mit einem in einem Cylinder beweglichen Kolben. Unter dem Kolben sollte durch Verdichtung von Dämpfen ein luftleerer Raum erzeugt und der Kolben durch den Luftdruck niedergedrückt werden. Doch wurde der Vorschlag nicht praktisch ausgeführt. Savery benutzte 1698 zuerst den Dampfdruck praktisch zur Hebung des Wassers aus Kohlenbergwerken. Die späteren Dampfmaschinen können in einfach wirkende oder atmosphärische und in doppelt wirkende unterschieden werden. Erstere wurden namentlich von Newcomen (1705) hergestellt und zum Heben des Grubenwassers in Kohlenbergwerken benutzt; letztere wurden durch James Watt (1736 bis 1819) wesentlich in ihrer gegenwärtigen Gestalt ausgebildet.

Die atmosphärische Maschine von Newcomen zeigt in ihren wesentlichen Teilen folgende Einrichtung. Der im Kessel *A* erzeugte Dampf tritt durch das Rohr *B* in den Cylinder *C* und setzt durch seinen Druck den luftdicht anschließenden, beweglichen Kolben *D* in Bewegung. Diese Bewegung des Kolbens nach oben wird mittelst der Kolbenstange auf einen um *G* drehbaren, zweiarmigen Hebel oder Balancier übertragen, an dessen anderem Ende die Pumpenstange *H* der zur Hebung des Wassers aus dem Bergwerksschacht dienenden Pumpe *J* befestigt ist. Während der Kolben emporsteigt, sinkt die Pumpenstange durch ihr eigenes Gewicht, welches zu diesem Zweck durch eine bei *H* angebrachte schwere Masse vergrößert ist, herab und zieht den Kolben in die Höhe. Der Cylinder *C* ist oben offen, so daß die obere Fläche des Kolbens dem freien Atmosphärendruck ausgesetzt ist, welcher durch den Druck des Dampfes überwunden wird. Wird darauf der Hahn *B* geschlossen und der Hahn *E* geöffnet, so tritt aus dem höher gelegenen Behälter *F* ein Strahl kalten Wassers in den Cylinder, wodurch der Dampf plötzlich verdichtet und unter dem Kolben *D* ein luftleerer Raum erzeugt wird. Infolgedessen wird der Kolben durch den auf seine obere Fläche wirkenden Atmosphärendruck herabgetrieben und die Pumpenstange *H* gehoben. Schließt man darauf den Hahn *E* und öffnet *B*, so wiederholt sich der erste Vorgang u. s. f. Das Rohr *K* dient zum Abfluß des in den Cylinder eingetretenen und durch Verdichtung des Dampfes entstandenen Wassers. Um das Eindringen von Luft in den Cylinder zu verhüten, muß das Rohr mehr als 10,5 m (32') lang sein (§ 90).

Zum abwechselnden Öffnen und Schließen der Hähne *B* und *E* war bei der ursprünglichen Einrichtung der Maschine ein besonderer Arbeiter erforderlich. Mittelst der von Humphry Potter (1713) erfundenen Selbsteuerung wird dieses Geschäft von der Maschine selbst besorgt, indem die Hähne auf geeignete Weise mit dem Balancier in Verbindung gesetzt werden (vergl. unten § 223).

Die Arbeitsleistung findet bei den atmosphärischen Maschinen nur während des Niedergangs des Kolbens durch den Luftdruck statt. Da dieser für jedes Quadratcentimeter der Kolbenfläche mehr als 1 Kilogramm beträgt (§ 90), so kann hierdurch ein beträchtlicher Erfolg erzielt werden. Bei Berechnung des letzteren ist jedoch zu berücksichtigen, daß der Raum unter dem Kolben nie ganz luftleer ist, da der Dampf bei der Temperatur, bis zu welcher der Cylinder durch das Einspritzwasser abgekühlt wird, noch eine beträchtliche Spannung besitzt. Außerdem sind die Reibungswiderstände zu berücksichtigen. Das Einspritzen des Kühl-

Fig. 218.



rück.

Sätti-
gungs-
menge.

12,75

13,56

14,40

15,29

16,23

17,23

18,25

19,32

20,46

21,67

22,93

24,26

25,63

27,08

28,61

30,21

bd

1250

u dem-

bedrigger

Kraft;

(6) be-

menden

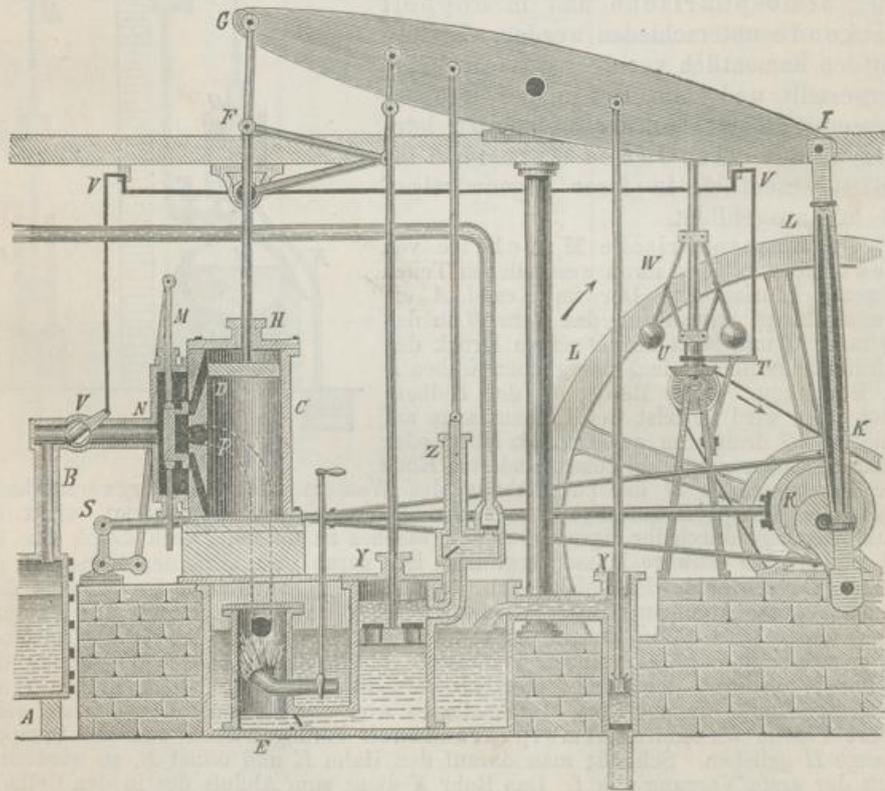
durch

rschen

wassers in den Cylinder selbst hat ferner den Nachteil, daß die Cylinderwände jedesmal beträchtlich abgekühlt werden, und ein großer Teil des einströmenden Dampfes nutzlos verbraucht wird, um dieselben wieder auf 100° zu erwärmen. Diesen Übelstand beseitigte James Watt (1765) durch die Einrichtung eines besonderen vom Cylinder getrennten Kondensators (§ 223).

§ 223. Die doppelwirkenden Dampfmaschinen zerfallen in Maschinen mit und ohne Kondensation, oder Niederdruck- und Hochdruckmaschinen. Die Einrichtung der Niederdruckmaschinen ist in der vervollkommenen Form, welche dieselbe durch James Watt erhalten hat, im wesentlichen folgende: Aus dem Dampfkessel *A* (Fig. 219) tritt der Dampf durch das Rohr *B* abwechselnd in den oberen und un-

Fig. 219.

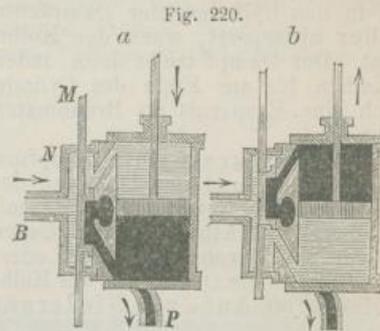


teren Raum des auf beiden Seiten geschlossenen Cylinders *C*, in welchem sich der Kolben *D* auf und ab bewegt. Während der Dampf unter den Kolben tritt, ist der obere Raum des Cylinders mit dem Kondensator *E* in Verbindung gesetzt und umgekehrt. Der Kondensator ist ein luftleeres, von kaltem Wasser umgebenes Gefäß, in welches zur schnellen Verdichtung des Dampfes bei jedem Kolbenhub eine gewisse Menge kalten Wassers eingespritzt wird. Die mit dem Kolben verbundene Kolbenstange *DF* geht dampfdicht durch die Stopfbüchse *H* und überträgt die auf- und niedergehende Bewegung des Kolbens an den Balancier *GI*. Die am anderen Ende des Balanciers befestigte Pleuelstange *IK* versetzt, mittelst der Kurbel *K*, die Welle des großen Schwungrades *LL* in Umdrehung, von welcher die Bewegung an die

ander
getrie
unte
den
dem
ren u
zunäc
abgeb
Raum
nach
kaster
nach
Der K
triebe
Ende
wird
Steuer
der V
daß,
aus de
kasten
der fü
Dampf
Die V
der S
auf de
wird
auf ei
werkst

Da
Kolben
genau
Balanc
Parall
lancier
mittelst
Beharr
und ins
der hin
des Ga
Watts
versetzt
von der
verschie
verschie
Gang d
dem Da
cier sind
die Kor
setzen.
wassers
in dems
Speisepu
zurückzu
Wassers
zu erke

anderen Maschinen übertragen wird, welche durch die Dampfmaschine getrieben werden sollen. Die abwechselnde Verbindung des oberen und unteren Cyllinderraums mit dem Dampfkessel und Kondensator wird durch den Verteilungsschieber *M* (s. auch Fig. 220) bewirkt, der sich in dem Schieberkasten *N* bewegt und den Raum desselben in einen inneren und äußeren teilt. Der Dampf tritt durch das Rohr *B* aus dem Kessel zunächst in den äußeren Schieberraum und gelangt bei der in Fig. 220a abgebildeten Stellung des Verteilungsschiebers von da nach dem oberen Raum des Cyllinders, während der Dampf aus dem unteren Cyllinderraum nach dem inneren Raum des Schieberkastens und von da durch das Rohr *P* nach dem Kondensator *E* strömt. Der Kolben wird also abwärts getrieben. Wenn derselbe am unteren Ende des Cyllinders angelangt ist, wird durch die unten beschriebene Steuerungsvorrichtung der Maschine der Verteilungsschieber verstellt, so daß, wie in Fig. 220b, der Dampf aus dem äußeren Raum des Schieberkastens unter den Kolben tritt, und der über dem Kolben befindliche



Dampf durch den inneren Schieberraum nach dem Kondensator gelangt. Die Verstellung des Schiebers am Ende jedes Kolbenhubes wird mittelst der Steuerungsvorrichtung von der Maschine selbst bewirkt. Durch die auf der Welle des Schwungrades befestigte excentrische Scheibe *R* wird die Schubstange *RS* hin und her bewegt, welche, indem sie bei *S* auf einen Winkelhebel wirkt, die Verstellung des Verteilungsschiebers bewerkstelligt.

Da das Ende des Balanciers sich nur im Kreisbogen bewegen kann, die Kolbenstange hingegen, wenn die Stopfbüchse nicht undicht werden soll, sich genau geradlinig und vertikal auf- und abwärts bewegen muß, so ist dieselbe am Balancier bei *F* nicht unmittelbar, sondern mittelst des sogenannten Watt'schen Parallelogramms befestigt. Bei kleineren Maschinen fällt in der Regel der Balancier weg, und die Kolbenstange wird mit der Kurbel des Schwungrades direkt mittelst einer Lenkstange verbunden. Das Schwungrad *L* dient dazu, durch das Beharrungsvermögen seiner Masse den Gang der Maschine gleichförmig zu machen und insbesondere die Ungleichförmigkeit der Bewegung zu beseitigen, welche aus der hin- und hergehenden Bewegung des Kolbens entspringt. Zur Regulierung des Ganges der Maschine dient außerdem das Centrifugalpendel, oder der Watt'sche Regulator *W*. Derselbe wird durch die Maschine in Umdrehung versetzt. Bei zu schnellem Gang der Maschine entfernen sich die Kugeln desselben von der Umdrehungsaxe (§ 56,5), indem sie dadurch gleichzeitig die auf der Axe verschiebbare Hülse *U* in die Höhe ziehen und die daran befestigte Stange *TV* verschieben, wird durch den Hahn bei *V* der Dampfzutritt abgesperrt und der Gang der Maschine verlangsamt. Umgekehrt wird bei zu langsamer Umdrehung dem Dampf freierer Zutritt gestattet und die Bewegung beschleunigt. — Am Balancier sind ferner die Pumpenstangen befestigt, welche die Kaltwasserpumpe *X*, die Kondensator- oder Luftpumpe *Y* und die Speisepumpe *Z* in Bewegung setzen. Die Kaltwasserpumpe dient zum Einspritzen des kalten Kondensationswassers in den Kondensator. Die Luftpumpe entfernt aus dem Kondensator das in demselben sich ansammelnde warme Wasser und die eingedrungene Luft. Die Speisepumpe dient dazu, einen Teil dieses warmen Wassers in den Dampfkessel zurückzupumpen, um das in demselben verdampfte Wasser zu ersetzen und den Wasserstand im Kessel gleichförmig zu erhalten. Um diesen in jedem Augenblick zu erkennen, ist am Kessel ein Wasserstandzeiger angebracht, ein Glasrohr,

welches oben mit dem Dampfraum, unten mit dem Wasserraum des Kessels in Verbindung steht. Außerdem muß am Dampfkessel ein Manometer zur Messung des Dampfdruckes (§ 93) und ein Sicherheitsventil angebracht sein, welches zur Verhütung von Explosionen dient, indem es bei zu sehr gesteigertem Dampfdruck sich öffnet und dem Dampf einen Ausweg gestattet. In der Regel besteht dasselbe in einem einarmigen Hebel (§ 49), dessen freies Ende mit einem Gewicht von geeigneter Größe beschwert ist, durch welches ein in der Nähe des Unterstützungspunktes angebrachtes, kugelförmiges Metallstück auf eine entsprechende Öffnung der Kesselwand geprefst wird. Bei zu starkem Dampfdruck wird der Hebel gehoben, und der Dampf entweicht durch die Öffnung. Niederdruckmaschinen arbeiten gewöhnlich mit einem Dampfdruck von $1\frac{1}{2}$ –2 Atmosphären. Bei den Expansionsmaschinen tritt der Dampf aus dem Kessel unter höherem Druck in den Cylinder; der Dampfzutritt wird aber durch einen Expansionschieber abgesperrt, wenn der Kolben erst einen Teil seines Weges zurückgelegt hat. Der Dampf treibt dann, indem er sich durch seine Elasticität ausdehnt, den Kolben bis ans Ende des Cylinders. Theorie und Erfahrung lehren, daß dadurch eine Ersparnis an Brennmaterial im Verhältnis zur geleisteten Arbeit erreicht wird.

Die Arbeitskraft einer Dampfmaschine berechnet sich nach der Größe der Kolbenoberfläche und der Differenz des auf beiden Seiten des Kolbens stattfindenden Druckes. Beträgt z. B. der mittlere Dampfdruck auf der vorderen Seite des Kolbens $1\frac{1}{2}$ Atmosph., der Gegendruck im Kondensator $\frac{1}{2}$ Atmosph., so bleibt ein Druck von 1 Atmosph. oder von 103,3 kg pro qdm der Kolbenfläche übrig. Beträgt die Oberfläche des Kolbens 1 qdm, die Hubhöhe 1,5 m, und finden in 1 Minute 60 Auf- und Niedergänge des Kolbens statt, so beträgt die in 1 Minute geleistete Arbeit $103,3 \cdot 1,5 \cdot 120 = 18\,594$ Kilogrammometer (§ 43). Hier von sind die Reibungswiderstände der Maschine, einschließlich der zur Bewegung der Pumpen u. s. w. erforderlichen Arbeit, in Abrechnung zu bringen. Angenommen, diese betragen 30% des Gesamteffekts, so bleibt eine nutzbare Arbeit von 11156,4 kgm pro Minute übrig. Die Leistungsfähigkeit der Dampfmaschinen wird in der Regel nach Pferdekraften (§ 43) berechnet. Da eine Pferdekraft einer Arbeit von $60 \cdot 75 = 4500$ kgm pro Minute entspricht, so würde die als Beispiel gewählte Maschine eine Leistungsfähigkeit von nahezu $2\frac{1}{2}$ Pferdekraften besitzen.

§ 224. Die Hochdruckmaschinen unterscheiden sich von den Niederdruckmaschinen durch den Mangel des Kondensators und durch die höhere Spannung des angewendeten Dampfes, welche in der Regel 5–8 Atmosphären beträgt. Bei so hohem Druck kann man den Kondensator wegfällen und den Dampf ohne Kondensation in die Atmosphäre entweichen lassen, indem der zu überwindende Gegendruck der Atmosphäre nur einen kleinen Bruchteil des Gesamteffekts ausmacht.

Die Hochdruckmaschinen haben den Vorteil größerer Raumersparnis, oder eines im Verhältnis zu den Dimensionen der Maschine größeren Nutzeffekts. Die meisten Hochdruckmaschinen arbeiten mit Expansion (§ 223). Die Lokomotivmaschinen sind stets Hochdruckmaschinen. Der horizontal liegende Kessel *A*, der den größten Teil des Lokomotivkörpers ausmacht, ist zur schnelleren Dampfbildung der ganzen Länge nach mit Siederöhren *BB* durchzogen, durch welche die heißen Verbrennungsgase aus dem Feuerraum *C* nach dem Schornstein *D* gelangen, und welche für die Verdampfung des Wassers eine große Oberfläche darbieten. Aus dem Dampfraum *E* gelangt der Dampf durch das Rohr *F*, welches durch ein Ventil *H* geöffnet oder geschlossen werden kann, nach dem Schieberkasten und dem Cylinder *G*, dessen Kolbenstange auf die Kurbel des Triebrades einwirkt. Auf der Axe des letzteren sind zwei excentrische Scheiben befestigt, durch welche die Schieberstange bewegt wird; durch einen Steuerhebel *J* läßt sich je eine von beiden mit der Schieberstange verbinden und demgemäß das Vorwärts- oder Rückwärts-

gehen
Schor

her,
öffnet

In
kraft
bisher
so ho
büchse
zu der
vergröß
die Ex
von L

Da die
ist der
dieselbe
dern th
können
schienen
erweist
Bei ihr
Verbind
Widers
fast gar
geschalt
ist ohne

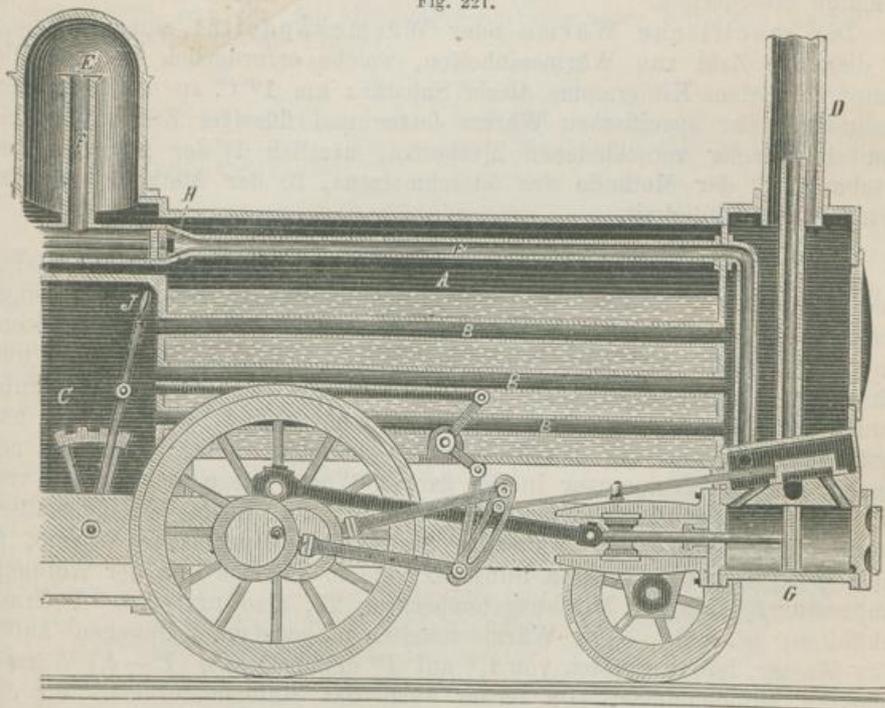
§
schiede

gehen der Maschine bewirken. Der gebrauchte Dampf entweicht durch den Schornstein und dient zur Verstärkung des Luftzuges im Feuerherd (§ 105).

Die Konstruktion der ersten Lokomotive rührt von George Stephenson her; von demselben ist auch 1825 die erste Eisenbahn (Stockton-Darlington) eröffnet worden.

In neuerer Zeit sind mehrfache Versuche gemacht worden, die Expansivkraft des Dampfes durch diejenige erhitzter Luft zu ersetzen, doch sind dieselben bisher an praktischen Schwierigkeiten gescheitert, indem entweder die Temperatur so hoch gesteigert werden mußte, daß ein Dichthalten der Kolben und Stopfbüchsen unmöglich war, oder die Dimensionen der Arbeitscylinder, im Vergleich zu denen der Dampfmaschinen von gleicher Leistungsfähigkeit, unverhältnismäßig vergrößert werden mußten. — Bei der Gasmaschine von Lenoir (1860) wird die Expansivkraft eines durch den elektrischen Funken entzündeten Gemenges von Leuchtgas und atmosphärischer Luft zum Treiben des Arbeitskolbens benutzt.

Fig. 221.



Da die Verbrennung des Gasgemenges im Arbeitscylinder selbst vor sich geht, ist der Wärmeverlust bei diesen Maschinen am geringsten. Außerdem haben dieselben den Vorzug, daß sie keiner besonderen Feuerungsanlage bedürfen, sondern überall leicht und in kleinem Raume angebracht und in Gang gesetzt werden können, wo eine Gasleitung vorhanden ist. Doch haben sich auch diese Maschinen nur in kleineren Dimensionen praktisch bewährt. — Als sehr brauchbar erweist sich die atmosphärische Gasmaschine von Otto und Langen (1865). Bei ihr wird durch die Gasexplosion der Kolben, der während des Hubes von der Verbindung mit den übrigen Maschinenteilen ausgeschaltet ist, ohne großen Widerstand vorangeworfen und, nachdem die Verbrennungsprodukte ihre Wärme fast ganz in Form von Arbeit an den Kolben abgegeben haben, erst wieder eingeschaltet und durch den äußeren Luftdruck zurückgeschoben. Diese Gasmaschine ist ohne Explosionsgefahr und sehr sparsam im Gasverbrauch.

4. Spezifische Wärme, Kalorimetrie.

§ 225. Spezifische Wärme. Um gleiche Gewichtsmengen verschiedener Körper um eine gleiche Anzahl von Graden zu erwärmen, sind

ungleiche Wärmemengen erforderlich. Bei gleicher Wärmeaufnahme steigt die Temperatur des Eisens schneller als die des Quarzsandes, und letzterer wird schneller erwärmt als Wasser. Mischt man 1 kg Wasser von 0° mit 1 kg Wasser von 100° , so beträgt die Mischungstemperatur 50° (§ 205). Schüttet man dagegen 1 kg Eisenfeilspäne von 100° in 1 kg Wasser von 0° , so wird die Temperatur des letzteren nur etwa auf $10,2^{\circ}$ erhöht. Da zu diesem Zweck 10,2 Wärmeeinheiten hinreichen, so folgt, daß 1 kg Eisen 10,2 Wärmeeinheiten abgegeben hat, indem es sich von 100° auf $10,2^{\circ}$ oder um $89,8^{\circ}$ abkühlte. Dieselbe Wärmemenge wird umgekehrt hinreichen, um 1 kg Eisen um $89,8^{\circ}$ zu erwärmen. Um also 1 kg Eisen um 1° zu erwärmen, sind nur $\frac{10,2}{89,8} = 0,114$ Wärmeeinheiten erforderlich.

Die spezifische Wärme oder Wärmekapazität einer Substanz ist diejenige Zahl von Wärmeeinheiten, welche erforderlich ist, um die Temperatur eines Kilogramms dieser Substanz um 1° C. zu erhöhen. Zur Bestimmung der spezifischen Wärme fester und flüssiger Körper bedient man sich dreier verschiedenen Methoden, nämlich 1) der Methode der Mischung, 2) der Methode des Eisschmelzens, 3) der Methode der Erkaltungsgeschwindigkeit.

§ 226. 1. Die Methode der Mischung. Man bedient sich dabei eines Kalorimeters d. h. eines Gefäßes aus dünnem Kupfer- oder Messingblech, welches auf einer Unterlage aus möglichst schlechten Wärmeleitern (Holz, Stroh) ruht und eine Wassermenge von bekanntem Gewicht q und bekannter Temperatur t_1 enthält. Nachdem die zu untersuchende Substanz vom Gewicht p auf eine bekannte Temperatur t_2 erwärmt worden, wird dieselbe schnell in das Kalorimeter getaucht, durch Umrühren mit einem Stabe die Temperatur in der ganzen Wassermasse gleichmäßig verteilt und alsdann die Mischungstemperatur T an einem hineingestellten Thermometer beobachtet. Es sei x die gesuchte spezifische Wärme, so haben p kg der untersuchten Substanz, indem sie sich von der Anfangstemperatur t_2° bis zur Mischungstemperatur T° , also um $t_2 - T$ Grade abkühlten, $p \cdot x (t_2 - T)$ Wärmeeinheiten abgegeben. Dagegen haben q kg Wasser, indem sie sich von t_1° auf T° erwärmten, $q (T - t_1)$ Wärmeeinheiten aufgenommen. Da ferner auch das Kalorimetergefäß an der Temperaturerhöhung teilnimmt, so ist auch die zu seiner Erwärmung erforderliche Wärmemenge in Rechnung zu bringen. Ist r das Gewicht, s die spezifische Wärme der Substanz des Gefäßes, so ist diese Wärmemenge $rs (T - t_1)$. Man erhält also, da die von dem warmen Körper abgegebene Wärmemenge gleich der Summe der von dem Wasser und von dem Kalorimetergefäß aufgenommenen sein muß,

$$px(t_2 - T) = q(T - t_1) + rs(T - t_1),$$

oder:

$$x = \frac{(q + rs)(T - t_1)}{p(t_2 - T)}.$$

Die Größe rs , welche dem Gewicht q des in dem Kalorimeter enthaltenen Wassers hinzugefügt werden muß, um den Einfluß des Gefäßes zu berücksichtigen, heißt der kalorimetrische Wasserwert des Gefäßes. Es ist leicht denselben, auch wenn die spezifische Wärme der Substanz des Gefäßes nicht vorher bekannt ist, durch einen besonderen, vorläufigen Versuch ein für allemal

zu bestimmen, indem man z. B. eine gewogene Quantität warmen Wassers von bekannter Temperatur in das Kalorimeter bringt. Ist diese Quantität w , ihre Temperatur t , so hat man, da die spezifische Wärme des Wassers = 1 ist, die Gleichung:

$$w(t - T) = q(T - t_1) + rs(T - t_1),$$

in welcher nur das gesuchte Produkt rs unbekannt ist.

Werden zwei Gewichtsmengen verschiedener Substanzen gemischt, deren spezifische Wärmen bekannt sind, so ist es nach dem Vorhergehenden leicht, die Mischungstemperatur zu berechnen. Es seien p_1 und p_2 die Gewichtsmengen, t_1 und t_2 die anfänglichen Temperaturen, s_1 und s_2 die spezifischen Wärmen beider Substanzen, T die gesuchte Mischungstemperatur, und es sei z. B. $t_1 > t_2$, so drückt $p_1 s_1 (t_1 - T)$ die von der wärmeren Substanz abgegebene, $p_2 s_2 (T - t_2)$ die von der kälteren Substanz aufgenommene Wärmemenge aus. Es ist mithin $p_1 s_1 (t_1 - T) = p_2 s_2 (T - t_2)$, woraus folgt:

$$T = \frac{p_1 s_1 t_1 + p_2 s_2 t_2}{p_1 s_1 + p_2 s_2}.$$

Ebenso erhält man für die Mischungstemperatur einer beliebigen Anzahl verschiedener Substanzen die Formel:

$$T = \frac{p_1 s_1 t_1 + p_2 s_2 t_2 + p_3 s_3 t_3 + \dots}{p_1 s_1 + p_2 s_2 + p_3 s_3 + \dots}.$$

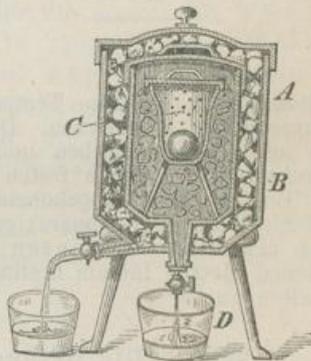
Es ist dies die erweiterte Richmannsche Regel (vergl. § 205). Die Methode der Bestimmung der spezifischen Wärme durch Mischung wurde zuerst von Black (1760) und Irvine angewendet.

§ 227. 2. Die Methode des Eisschmelzens. Es dient dazu am besten das Eiskalorimeter von Lavoisier und Laplace (1780). Dasselbe besteht aus zwei in einander gesetzten Blechgefäßen A und B (Fig. 222), welche mit Deckeln versehen sind und einen Hohlraum zwischen sich lassen. In das innere Gefäß kann noch ein drittes Gefäß oder ein Körbchen aus Drahtgeflecht C gesetzt werden, welches zur Aufnahme des Körpers dient, dessen spezifische Wärme bestimmt werden soll. Das Innere des Gefäßes B sowohl, als der Hohlraum zwischen A und B , wird vor Beginn des Versuches mit gestoßenem Eis gefüllt. Der zu untersuchende Körper von bekanntem Gewicht wird, nachdem er vorher auf eine bekannte Temperatur, z. B. 100° , erwärmt worden, in das Körbchen C gebracht und die Deckel schnell geschlossen und mit Eisstücken bedeckt. Indem der Körper seinen Wärmeüberschuss an das umgebende Eis abgibt, wird ein Teil des letzteren geschmolzen. Die durch Schmelzung des Eises in dem inneren Gefäß B entstandene Wassermenge fließt durch ein Rohr in das Gefäß D ab, in welchem sie gewogen wird. Der mit Eis gefüllte Hohlraum zwischen den Gefäßen A und B hat den Zweck, zu verhindern, daß dem Gefäß B von außen Wärme zugeführt und dadurch ein Teil des in B enthaltenen Eises geschmolzen werde.

Es sei p das Gewicht des untersuchten Körpers, t seine anfängliche Temperatur, x die gesuchte spezifische Wärme, q die durch Schmelzung des Eises erhaltene Wassermenge, so haben p Gewichtseinheiten des Körpers, indem sie sich von t° auf 0° abkühlten, $p \cdot x \cdot t$ Wärmeeinheiten abgegeben. Um q kg Eis zu schmelzen, sind (§ 206) $79,25 \cdot q$ Wärmeeinheiten verbraucht worden. Es ist also

$$p \cdot x \cdot t = 79,25 \cdot q \text{ oder } x = \frac{79,25 \cdot q}{p \cdot t}.$$

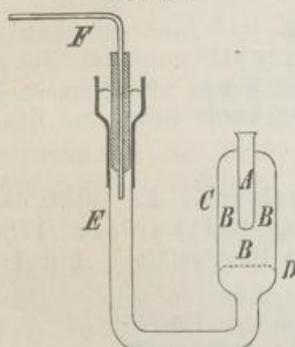
Fig. 222.



§ 227a. Eiskalorimeter von Bunsen (1870). Die durch die Versuche mit dem Eiskalorimeter von Lavoisier und Laplace gewonnenen Resultate sind darum nicht ganz zuverlässig, weil das Wasser sich an das Eis anhängt, statt abzufließen, so daß die genaue Bestimmung, wieviel Eis geschmolzen ist, unmöglich wird. Diese Fehlerquelle wird um so bedenklicher, wenn die Menge des zu untersuchenden Körpers nicht ausreichend groß ist. Sie wird vermieden durch das Eiskalorimeter von Bunsen.

Der Körper, dessen spezifische Wärme zu bestimmen ist, wird in das mit Wasser von der Temperatur 0° gefüllte Reagenzglas *A* gebracht (Fig. 222a), welches in das Kalorimetergefäß *C* eingeschmolzen ist, und auf dessen Boden er hinabsinkt. Das durch ihn hier erwärmte Wasser steigt in *A* nicht empor, weil zwischen 0° und 4° durch die zugeführte Wärme die Dichtigkeit des Wassers zunimmt; die Wärme des Körpers vermag also nur durch die dünne Wand des Reagenzglases sich dem Kalorimeter *C* mitzuteilen. Dieses ist im Raum *B* durch Eis von 0° umgeben, welches durch die vom Körper abgegebene Wärme geschmolzen und infolgedessen im Volumen verringert wird, bis sich der Körper auf 0° abgekühlt hat.

Fig. 222a.



Zur Bestimmung der Menge des in *B* geschmolzenen Eises ist dieser Raum unterhalb, von *D* an, durch Quecksilber abgeschlossen, mit welchem auch der längere Schenkel *E* des Kalorimeters angefüllt ist. In diesen Schenkel *E* ist durch einen luftdicht schließenden Stöpsel ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr geprefst, bis das Quecksilber in dem horizontalen, graduierten Teile *F* desselben bis zu einem bestimmten Teilstrich reicht. Infolge der Eisschmelzung in *B* steigt das Quecksilber bei *D*, weicht also das Niveau desselben in *F* zurück und kann demnach die Volumenverringering in *B*, folglich auch die Menge des hier geschmolzenen Eises genau bestimmt werden.

Um den Raum *B* mit Eis zu füllen, läßt Bunsen einen Strom von Alkohol, der durch eine Kältemischung auf eine Temperatur unter 0° gebracht ist, auf den Boden des Reagenzglases *A* streichen. Das Kalorimeter wird alsdann in einem größeren Gefäß mit Schnee umgeben und vor Beginn des Versuches abgewartet, bis das Quecksilber in *F* einen festen Stand annimmt, was eintritt, wenn das Eis in *B* die Temperatur 0° angenommen hat (bei einem Versuche von Bunsen erst nach 114 Stunden). Der Apparat gestattet nunmehr mehrere kalorimetrische Versuche nach einander, und Bunsen hat durch ihn selbst die spezifische Wärme des seltenen Metalls Indium bestimmt, von welchem überhaupt nur einige Gramm zu erhalten waren.

§ 228. 3. Die Methode des Erkaltes ist besonders von Dulong und Petit zur Bestimmung der spezifischen Wärme einer großen Anzahl von Substanzen benutzt worden. — Werden gleichen Gewichtsmengen zweier verschiedenen Substanzen gleiche Wärmemengen entzogen, so ist die dadurch bewirkte Temperaturerniedrigung beider ihren spezifischen Wärmen umgekehrt proportional. Es wird demnach die Erhaltungsgeschwindigkeit, unter Voraussetzung gleicher Wärmeabgabe, um so größer sein, je geringer die spezifische Wärme ist. Die Zeit, welche gleiche Gewichtsmengen verschiedener Körper brauchen, um sich um eine gleiche Anzahl von Graden abzukühlen, wird demnach unter dieser Voraussetzung im direkten Verhältnis ihrer spezifischen Wärmen stehen, und wenn die Gewichtsmengen ungleich sind, so steht bei gleicher Wärmeabgabe die Erkaltszeit im zusammengesetzten Verhältnis der Gewichtsmengen und der spezifischen Wärmen. Um die Wärmeabgabe für alle Körper genau gleich zu machen, brachten Dulong und Petit die verschiedenen Substanzen nach einander in dasselbe Gefäß von sehr dünnem, poliertem Silberblech *A* (Fig. 223), durch dessen Deckel der Quecksilberbehälter eines Thermometers *B* eingeführt werden konnte. Dieses Gefäß war von einem weiteren Metallgefäß *C* umgeben, dessen Wände, um die von *A* ausgestrahlte Wärme vollständig aufzunehmen, innen mit Kienrufs geschwärzt waren (§ 236) und durch Umgebung

von Eis oder Wasser, welches in dem äußeren Gefäß enthalten war, auf 0° oder einer anderen, unveränderlichen und bekannten Temperatur erhalten wurden. Der Hohlraum zwischen den Wänden der Gefäße A und C konnte luftleer gepumpt werden, um den unregelmäßig abkühlenden Einfluß der Luftströmungen in seinem Innern zu vermeiden, so daß die Wärmeabgabe von A nur durch Ausstrahlung (§ 234) erfolgte. — Man beobachtete nun jedesmal die Zeit, welche erforderlich war, damit die Temperatur des zuvor erwärmten Körpers um eine bestimmte Anzahl von Graden, z. B. von 20° auf 10°, sinke. Sind p und p' die Gewichtsmengen, s und s' die zu vergleichenden, spezifischen Wärmen zweier Körper, t und t' die beobachteten Erkaltungszeiten, so hat man bei gleicher Wärmeabgabe:

$$t : t' = ps : p' s'$$

oder:

$$s : s' = \frac{t}{p} : \frac{t'}{p'}$$

Um den Einfluß der Gefäßwände und der Masse des Thermometers in Rechnung zu bringen, muß jedoch jedem der beiden Produkte ps und $p' s'$ noch ein konstantes Glied k hinzugefügt werden, welches dem kalorimetrischen Wasserwert (§ 226) dieser Teile des Apparates entspricht, die an der Wärmeabgabe teilnehmen, so daß man hat:

$$t : t' = ps + k : p' s' + k,$$

woraus, wenn k und s bekannt sind, s' gefunden werden kann. Wählt man als einen der zu vergleichenden Körper Wasser, so ist $s = 1$. Die Größe k kann, wie der Wasserwert des Kalorimeters bei der Mischungsmethode (§ 226), durch einen besonderen Versuch bestimmt werden. — Die Erkaltungsmethode eignet sich nicht zur Bestimmung der spezifischen Wärme fester Körper von geringer Wärmeleitfähigkeit.

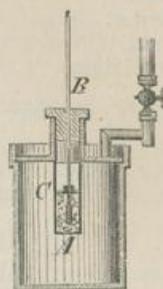
§ 229. Gesetz von Dulong und Petit (1818). Dulong und Petit wurden durch ihre Untersuchungen über die spezifische Wärme zu dem merkwürdigen Gesetz geführt, daß die spezifischen Wärmen der chemischen Grundstoffe im festen Aggregatzustande im umgekehrten Verhältnis ihrer Atomgewichte stehen. Bezeichnen s und s' die spezifischen Wärmen, a und a' die Atomgewichte zweier Grundstoffe, so ist demnach $s : s' = a' : a$ oder $as = a's'$. Es sind also die Produkte aus spezifischer Wärme und Atomgewicht für alle Grundstoffe im festen Aggregatzustand einander gleich. Das Produkt as drückt offenbar die Wärmemenge aus, welche erforderlich ist, um ein Atom eines Grundstoffes um einen Grad zu erwärmen und wird mit dem Namen der Atomwärme bezeichnet. Man kann demnach das obige Gesetz in folgender einfachen Form aussprechen: Alle chemischen Grundstoffe im festen Aggregatzustande haben gleiche Atomwärme.

Durch die Untersuchungen von Neumann und Regnault ist dieses Gesetz bestätigt und auch auf chemische Verbindungen von analoger Zusammensetzung ausgedehnt worden. Nur einige Grundstoffe, namentlich Kohlenstoff, Bor und Silicium, scheinen aus bisher nicht hinreichend aufgeklärten Ursachen von diesem Gesetz abzuweichen (s. unten). Kopp hat gezeigt, daß die Atomwärme einer chemischen Verbindung im festen Aggregatzustand gleich ist der Summe der Atomwärmen ihrer Bestandteile.

Tabelle der spezifischen Wärmen und Atomwärmen einiger festen Grundstoffe nach Regnault.

	spec. W.	Atom- gew.	Atom- wärme		spec. W.	Atom- gew.	Atom- wärme
Kalium	0,1655	39,13	6,48	Zink	0,0955	65,0	6,21
Natrium	0,2934	23,05	6,76	Blei	0,0314	207,0	6,40
Lithium	0,9408	7,03	6,62	Zinn	0,0562	117,6	6,61
Kupfer	0,0952	63,5	6,05	Gold	0,0324	196,7	6,37
Eisen	0,1138	56,05	6,38	Silber	0,0570	107,94	6,16

Fig. 223.



	spec. W.	Atom- gew.	Atom- wärme		spec. W.	Atom- gew.	Atom- wärme
Antimon	0,0508	129	6,55	Jod	0,0541	126,8	6,86
Quecksilber (fest)	0,0317	200,2	6,35	Brom	0,0843	79,97	6,74
Platin	0,0324	197,1	6,39	Phosphor	0,1740	31,0	5,39
Wismut	0,0308	210,0	6,47	Schwefel	0,1776	32,07	5,70
Arsen	0,0814	75,0	6,11	Selen	0,0762	78,8	6,01.
Aluminium	0,2143	27,3	5,85				

Größere Abweichungen vom Dulong-Petitschen Gesetz zeigen:

	spec. Wärme	Atomgew.	Atomwärme
Kohlenstoff	{ Diamant 0,147	12	{ 1,76
	{ Graphit 0,20		{ 2,4
	{ Kohle 0,20—0,26		{ 2,4—3,1
Bor	{ krystallisiert 0,25	11	{ 2,75
	{ amorph 0,37		{ 4,07
Silicium	0,177	28,0	4,96.

Specifische Wärme einiger flüssigen Körper.

Quecksilber	0,028
Schwefelkohlenstoff	0,218
Terpentinöl	0,440
Alkohol	0,602
Wasser	1,000.

Es ist übrigens zu bemerken, daß die specifischen Wärmen bei Temperaturen bestimmt werden müssen, welche hinreichend tief unter dem Schmelzpunkte der betreffenden Elemente liegen. Im besonderen hat sich bei genauerer Untersuchung der specifischen Wärme des Kohlenstoffs ergeben, daß dieselbe mit der Temperatur zunimmt und zwar mehr als bei irgend einer anderen Substanz: die specifische Wärme verdreifacht sich bei der Zunahme der Temperatur von 0° auf 200°. Dürfte man annehmen, daß die specifische Wärme in gleicher Weise noch bis zu einer Temperatur über 500° zunimmt, so würde die specifische Wärme des Diamants bei etwa 525° den Wert 0,52, d. h. den Wert $\frac{6,3}{12}$ haben, welchen das Dulong-Petitsche Gesetz fordert.

§ 230. Specifische Wärme luftförmiger Körper. Zur Bestimmung der specifischen Wärme gasförmiger Körper dient folgendes Verfahren. Man leitet eine bestimmte Gasmenge durch ein spiralförmig gewundenes Rohr, welches von einem warmen Wasserbad von bekannter Temperatur umgeben ist. Nachdem das Gas dadurch die Temperatur dieses Wasserbades angenommen hat, gelangt dasselbe in ein zweites Spiralrohr, welches in einem mit kaltem Wasser gefüllten Kalorimetergefäß enthalten ist. Aus der Erwärmung des Kalorimeters und aus der bekannten Menge und Anfangstemperatur des Gases kann dann auf ähnliche Art wie bei der Mischungsmethode (§ 226) die specifische Wärme des letzteren berechnet werden.

Für die chemisch einfachen Gase (O, N, H, Cl) gilt das Gesetz, daß die specifischen Wärmen im umgekehrten Verhältnis der Dichtigkeiten stehen. Es ist daher stets dieselbe Wärmemenge erforderlich, um gleiche Volumina dieser Gase um gleich viele Grade zu erwärmen. Da ferner gleiche Volumina der einfachen Gase gleich viele Atome enthalten (§ 18), so folgt daraus, daß die chemisch einfachen Gase gleiche Atomwärme haben. Für die zusammengesetzten Gase und Dämpfe gelten ähnliche, aber weniger einfache Gesetze.

Bei der Bestimmung der specifischen Wärme gasförmiger Körper hat man zu unterscheiden, ob die Erwärmung bei konstantem Volumen, oder bei konstan-

Atom-
wärme
6,86
6,74
5,39
5,70
6,01.

tem Druck stattfindet (vergl. § 202). Denkt man sich nämlich eine Gasmasse in einem Gefäß von unveränderlichem Volumen eingeschlossen und in demselben erwärmt, so wird alle dem Gase zugeführte Wärme zur Temperaturerhöhung verwendet. Erwärmt man dagegen ein Gas unter konstant bleibendem Druck, so dehnt sich dasselbe aus und leistet dabei eine Arbeit, indem es den Gegendruck der Atmosphäre überwindet (s. unten § 242). Eine Leistung von Arbeit ist aber, wie schon früher (§ 204) bemerkt, stets mit einem Verbrauch von Wärme verbunden. Wird daher 1 Liter Luft bei konstantem Druck um 1° erwärmt, wobei

es sich um $\frac{1}{273}$ seines Volumens ausdehnt, so ist dazu eine gröfsere Wärmemenge erforderlich, als wenn die Erwärmung bei konstantem Volumen erfolgt wäre. In der That kann man die zur Leistung von Arbeit mehr verbrauchte Wärmemenge wiedergewinnen, indem man die Luft auf ihr ursprüngliches Volumen, also um $\frac{1}{273}$ komprimiert. Jede Kompression eines Gases ist mit einer Erhöhung, jede Expansion mit einer Erniedrigung der Temperatur verbunden indem bei ersterer durch die zur Kompression verwendete Arbeit Wärme erzeugt, bei letzterer zur Überwindung des Gegendruckes, also zur Leistung von Arbeit, Wärme verbraucht und dem Gase entzogen wird.

Die oben angegebene Methode dient zur Bestimmung der specifischen Wärme der Gase bei konstantem Druck, da das erwärmte Gas, indem es bei gleichbleibendem Druck durch das Spiralrohr des Kalorimeters strömt und seinen Wärmeüberschufs an das kalte Wasser abgibt, sich gleichzeitig auf ein der Temperaturerniedrigung entsprechendes, geringeres Volumen zusammenzieht. — Die direkte Bestimmung der specifischen Wärme bei konstantem Volumen ist bisher an praktischen Schwierigkeiten des Versuchs gescheitert. Da jedoch die Kenntnis derselben für die theoretische Wärmelehre (s. unten § 242), sowie für die Theorie der Verbreitung des Schalls (s. § 230a), von besonderem Interesse ist, so hat man sich zu ihrer Bestimmung indirekter Methoden bedient, welche auf der Bestimmung der Temperaturveränderung durch Kompression und Expansion der Gase beruhen.

§ 230 a. Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles. Man kann sich die Bewegung von Longitudinalwellen im Luftraume zurückgeführt denken auf die Wellenbewegung in einer prismatisch abgegrenzten Luftmasse. Die Querschnitte dieses Prismas seien gleich der Einheit und im besonderen seien zwei Querschnitte A und B in der Entfernung x von einander in Betracht gezogen. In irgend einem Zeitmoment t seien in A der Druck auf die Flächeneinheit e , die Geschwindigkeit der schwingenden Luftteilchen v und die Dichtigkeit, d. h. das Verhältnis der Masse zum Volumen, d , und in B seien die entsprechenden Gröfsen zu derselben Zeit t , bezüglich e_1 , v_1 , d_1 . Die Welle schreite von A bis B in der Zeit τ fort mit der Geschwindigkeit c , so hat man die Gleichung

$$1. \quad x = c\tau.$$

Dieses Fortschreiten der Welle hat man sich so vorzustellen, dafs sich die Gröfsen e_1 , v_1 , d_1 , welche sich in B zur Zeit t zeigen, im Querschnitt A vorher, zur Zeit $t - \tau$, ebenfalls gezeigt haben.

Das Volumen zwischen A und B beträgt x , die Masse $x \cdot d$. Wenn man sich nunmehr die Länge x unbeschränkt abnehmend denkt, so würde die Masse, wenn sie starr wäre, durch den Überschufs des Druckes auf A über den auf B , d. i. durch $e - e_1$, in der Richtung von A nach B bewegt werden. Nunmehr ist die Beschleunigung das Verhältnis zwischen der Kraft und der bewegten Masse, also die der Masse zwischen A und B , φ , darzustellen durch $\frac{e - e_1}{x \cdot d}$, wenigstens wenn diese Masse starr wäre; da sie aber als verschwindend klein gedacht ist, so hat sie trotz ihrer Elasticität dieselbe Beschleunigung, man hat also

$$2. \quad \varphi = \frac{e - e_1}{x \cdot d};$$

andererseits ist die Beschleunigung definiert als das Verhältnis der Geschwindigkeitsvermehrung zur zugehörigen Zeit. Es ist

$$3. \quad \varphi = \frac{v - v_1}{\tau},$$

man zu
nstan-

denn $v-v_1$ ist die Geschwindigkeitsänderung während der Zeit τ am Querschnitt A , und da alle Luftteilchen, welche denselben durchschreiten, sich sehr nahe an einander befinden, so erleiden sie gleichzeitig fast kongruente Zustandsänderungen, so daß $v-v_1$ auch die Geschwindigkeitsänderung der in A befindlichen Luftteilchen darstellt.

Während der Zeit τ dringt in den Raum AB das Gasvolumen $v\tau$ ein und aus demselben das Volumen $v_1\tau$ hinaus; also hat das Volumen x in sich das Volumen $(v-v_1)\tau$ aufgenommen, und weil sich dadurch nach der Voraussetzung die Dichtigkeit von d_1 zu d verändert, so ist

$$\frac{d_1}{d} = \frac{x}{x + (v-v_1)\tau} \quad \text{oder:} \quad 4. \quad \frac{d_1}{d-d_1} = \frac{x}{(v_1-v)\tau}$$

Aus diesen Gleichungen 1–4 ergibt sich:

$$\frac{e-e_1}{x \cdot d} = \frac{v-v_1}{\tau} = \frac{x(d-d_1)}{d_1 \cdot \tau^2},$$

wird also:

$$c^2 = \frac{x^2}{\tau^2} = \frac{(e-e_1)d_1}{(d-d_1)d} = \frac{e-e_1}{d-d_1},$$

das letztere, weil für einen sehr kleinen Wert von x sich das Verhältnis $\frac{d_1}{d}$ der Einheit nähert. Aus der letzten Gleichung geht hervor, daß sich eine Schallwelle durch die Luft, oder überhaupt eine Longitudinalwelle durch einen elastischen Körper, nur dann mit konstanter Geschwindigkeit fortpflanzen kann, wenn bei allen vorkommenden Druck- und Dichtigkeitsänderungen der Ausdruck $\frac{e-e_1}{d-d_1}$ einen konstanten Wert behält.

Newton hatte angenommen, daß Druck und Dichtigkeit dem Mariotteschen Gesetze folgen, so daß also:

$$\frac{e}{d} = \frac{e_1}{d_1} = \frac{e-e_1}{d-d_1} \quad \text{ist, d. h.} \quad c = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

In dieser Formel Newtons bedeutet e den Druck auf die Flächeneinheit, gemessen in Kräfteinheiten, und d die Masse der Volumeneinheit; $\frac{e}{d}$ ist also die Beschleunigung der in der Volumeneinheit enthaltenen Masse unter Wirkung des auf der Flächeneinheit ruhenden Druckes. Um sich diese Beschleunigung zu veranschaulichen, denke man sich die Luftmasse in der Volumeneinheit als einen Teil einer überall homogenen Atmosphäre, von solcher Höhe h , daß auch diese den beobachteten Druck hervorbringen könnte. Diese Höhe ist von der Dichtigkeit der Luft so lange unabhängig, als die Temperatur konstant bleibt. Das Gewicht in der Volumeneinheit beträgt $\frac{1}{h}$ von dem Gewicht der auf der Flächeneinheit ruhenden Luftmasse. Die Beschleunigung des ersteren Gewichtes durch das zweite beträgt also hg , wenn $g = 9,808$ m gesetzt wird. Demnach heißt die Newtonsche Formel:

$$c = \sqrt{hg}.$$

Benutzt man die § 105 angegebenen Zahlenwerte, so erhält man für die Schallgeschwindigkeit bei 0° :

$$c = \sqrt{9,808 \cdot 0,76 \cdot 10517} = 279,99 \text{ m.}$$

Dieser Wert stimmt aber mit der Erfahrung nicht überein. Laplace erkannte, daß die durch Schallwellen hervorgebrachten Veränderungen in Druck und Dichtigkeit nicht dem Mariotteschen Gesetze folgen. Jede Verdichtung ist nämlich mit Erwärmung und jede Ausdehnung mit Abkühlung verbunden. Die in den Schallwellen hervorgebrachten Temperaturschwankungen können nicht von außen ausgeglichen werden, da sie zu schnell verlaufen und überdies die Luft die Wärme sehr schlecht leitet. Ein wachsender Druck bringt also eine geringere Verdichtung, ein abnehmender Druck eine geringere Verdünnung hervor, als sie sich nach dem Mariotteschen Gesetz ergeben würden. In beiden Fällen ist also:

$$\frac{e-e_1}{d-d_1} > \frac{e}{d}$$

Die genaue Beziehung zwischen den Druck- und Dichtigkeitsänderungen, wenn Wärmeaustausch nicht vorkommt, findet man auf folgende Weise:

Man denke sich eine Gewichtseinheit Gas erwärmt, zuerst durch die Wärmemenge q um τ^0 bei konstantem Volumen, sodann durch die Wärmemenge q_1 um τ_1^0 , bei konstantem Druck. Die spezifischen Wärmen seien bezüglich c und c_1 , so ergibt sich:

$$q = c \cdot \tau \text{ und } q_1 = c_1 \tau_1.$$

Druck, Dichtigkeit und Temperatur des Gases seien ursprünglich e, d, t ; durch die Wärmemenge q wird das Volumen und also auch die Dichtigkeit nicht geändert, und das Gas komme in den neuen Zustand $e_1, d, t + \tau$; durch die Wärmemenge q_1 wird der Druck e_1 nicht geändert, und das Gas komme in den Zustand $e_1, d_1, t + \tau + \tau_1$. Nach den Gesetzen von Mariotte und Gay-Lussac gelten die Beziehungen

$$\frac{e}{d(1+\alpha t)} = \frac{e_1}{d(1+\alpha t + \alpha \tau)} = \frac{e_1}{d_1(1+\alpha t + \alpha \tau + \alpha \tau_1)} = \frac{e_1 - e}{d \alpha \tau}$$

und also auch:

$$d = d_1 \left(1 + \frac{\alpha \tau_1}{1 + \alpha t + \alpha \tau} \right) \text{ oder } \frac{d - d_1}{d_1} = \frac{\alpha \tau_1}{1 + \alpha t + \alpha \tau}.$$

Durch Division erhält man endlich:

$$\frac{e_1 - e}{d - d_1} \cdot \frac{d_1}{d \alpha \tau} = \frac{e}{d(1 + \alpha t)} \cdot \frac{1 + \alpha t + \alpha \tau}{\alpha \tau_1} = \frac{e_1}{d \alpha \tau_1}.$$

Wenn die Zustandsänderung von e, d, t zu $e_1, d_1, t + \tau + \tau_1$, ohne Aufnahme oder Abgabe von Wärme erfolgt, so ist:

$$q + q_1 = 0 \text{ oder } c \tau + c_1 \tau_1 = 0,$$

also:

$$\tau : \tau_1 = -k,$$

wobei $k = \frac{c_1}{c}$ gesetzt ist, also das Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen bedeutet. Durch Einführung von $-k$ anstelle von $\tau : \tau_1$, wird die vorhergehende Gleichung

$$\frac{e_1 - e}{d_1 - d} = k \cdot \frac{e_1}{d_1}.$$

Ist die Zustandsänderung hinreichend gering, so darf man ohne merklichen Fehler e_1 durch e und d_1 durch d ersetzen. Unter dieser Voraussetzung wird also:

$$\frac{e_1 - e}{d_1 - d} = k \cdot \frac{e}{d}.$$

In der Formel für die Schallgeschwindigkeit bedeuten $e_1 - e$ und $d_1 - d$ Druck- und Dichtigkeitsunterschiede in zwei unbeschränkt sich annähernden Querschnitten. Für solche gilt die letzte Gleichung genau. Man erhält also für die Schallgeschwindigkeit:

$$c = \sqrt{k \cdot \frac{e}{d_1}} = \sqrt{kgh}.$$

§ 230b. Das Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen. Die Bestimmung dieses Verhältnisses k kann rein experimentell nicht geschehen, da die spezifische Wärme bei konstantem Druck sich direkt nicht beobachten läßt. Es bedeutet aber $c_1 - c$ diejenige Wärmemenge, durch welche die mit der Ausdehnung verbundene äußere Arbeit geleistet wird, wenn die Gewichtseinheit Gas sich um 1^0 erwärmt. Diese äußere Arbeit ist $ev_0\alpha$, wenn v_0 das Volumen bei 0^0 , α den Ausdehnungskoeffizienten $\left(\frac{1}{273}\right)$ und e den Druck bezeichnet. Das Wärmeäquivalent ist 424 (§ 241); man erhält also:

$$c_1 - c = \frac{ev_0\alpha}{424}.$$

Es ist $e = 1,033 \cdot 10^4$ kg (auf 1 qm), $v_0 = \frac{773}{10^3}$ (cbm) und demnach:

$$e_1 - e = 0,069.$$

Nach den Versuchen von Regnault ist:

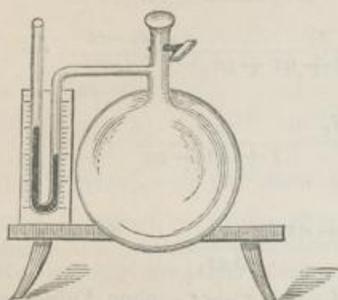
$$e_1 = 0,2375, \text{ folglich } e = 0,1685$$

und endlich:

$$k = 1,41.$$

Eine andere Methode zur Bestimmung von k ist von Clément und Désormes (1819) angewandt worden.

Fig. 224.



Für dieselbe wird die Kenntnis des Wärmeäquivalentes nicht vorausgesetzt. Sie ist wesentlich folgende: Die in einem geräumigen Glasballon (Fig. 224) enthaltene Luft wird anfänglich schwach zusammengedrückt. Nachdem die bei dem Druck eingetretene Temperaturerhöhung durch die Wärmeabgabe an die Umgebung völlig ausgeglichen ist, beobachtet man die Vermehrung des Druckes an dem seitwärts angebrachten Manometer. Dieses besteht aus einer mit dem Ballon kommunizierenden, zweischenkligigen Röhre, welche Öl oder konzentrierte Schwefelsäure enthält. Der Niveauunterschied in beiden Schenkeln der Röhre giebt den Druckzuwachs an. Öffnet man nun den Hahn während sehr kurzer Zeit und schließt denselben sogleich wieder, so setzt sich der Luftdruck im Ballon mit dem der äußeren Luft ins Gleichgewicht. Bei der Expansion ist aber eine Temperaturerniedrigung eingetreten, und indem sich die im Ballon enthaltene Luft durch Wärmeaufnahme von den Wänden des Gefäßes wieder auf die Temperatur der Umgebung erwärmt, sieht man die Flüssigkeitssäule im Manometer aufs neue steigen. Aus der Größe des beobachteten Niveauunterschieds kann die Temperaturerniedrigung bestimmt werden, welche der stattgehabten Expansion entspricht.

Am Anfange des Versuches sei der Druck des Gases innerhalb des Ballons e und die Dichtigkeit d ; nachdem der Hahn geöffnet und dann wieder geschlossen worden, sei der Druck (innen und außen) e_1 und die Dichtigkeit innerhalb d_1 . Endlich bei Schluß des Versuches seien Druck und Dichtigkeit e_2 und d_2 . Die erste Zustandsänderung erfolgt ohne Wärmeaustausch und ist hinreichend klein, so daß man setzen darf:

$$\frac{e_1 - e}{d_1 - d} = k \cdot \frac{e}{d}.$$

Zuletzt hat das Gas wieder seine ursprüngliche Temperatur, und die Dichtigkeit d_2 ist noch dieselbe (d_1) wie unmittelbar nach Schluß des Hahnes, wenn in dem nach dem Ballon führenden Schenkel des Manometers die Höhe der Flüssigkeit konstant erhalten wird. Es ist also:

$$\frac{e}{d} = \frac{e_2}{d_1} = \frac{e_2 - e}{d_1 - d},$$

und aus den beiden Gleichungen folgt:

$$\frac{e_1 - e}{e_2 - e} = k.$$

Bei einem derartigen Versuche war z. B. über den äußeren Druck ein Überschuß:

$$e - e_1 = 16,36 \text{ mm und } e_2 - e_1 = 4,44,$$

also:

$$k = \frac{16,36}{11,92} = 1,38.$$

Masson hat aus 30 solchen Versuchen für die atmosphärische Luft $k = 1,419$ gefunden. Für die Schallgeschwindigkeit in Luft von 0° ergibt sich nun:

$$c_0 = 279,99 \cdot \sqrt{1,41} = 332,47 \text{ m.}$$

Ist die Lufttemperatur t° , so dehnt sich die Luft aus im Verhältnis von $1 : 1 + at$, und in demselben Verhältnis wächst auch die Höhe der oben eingeführten homogenen Atmosphäre, so daß $h = h_0(1 + at)$ zu setzen ist; demnach wird:

$$c = c_0 \cdot \sqrt{1 + at}.$$

Für verschiedene Gase endlich ist auch die Höhe des homogenen Gases verschieden. Dieselbe ist nämlich dem specifischen Gewicht s umgekehrt proportional. Ist also γ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in irgend einem Gase vom specifischen Gewicht s , so ist $\gamma = \frac{c}{\sqrt{s}}$ zu setzen, d. h. die Schallgeschwindigkeit ist der Quadratwurzel aus der Dichtigkeit umgekehrt proportional.

Die Werte der specifischen Wärmen bei konstantem Druck nach den Versuchen von Regnault und die des Verhältnisses k nach Dulong für einige andere Gase sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Namen der Gase	Dichtigkeit	Spec. Wärme	
		c_1	$\frac{c_1}{c}$
Atmosphärische Luft	14,45	0,2377	1,41
Sauerstoff	OO	0,2175	1,415
Stickstoff	NN	0,2438	1,41
Wasserstoff	HH	3,4094	1,411
Kohlenoxyd	CO	0,2450	1,428
Stickstoffoxyd	NO	0,2317	1,343
Kohlensäure	CO ₂	0,2169	1,338
Ölbildendes Gas	C ₂ H ₄	0,4040	1,240
Wasserdampf	H ₂ O	0,4805	(1,31).

5. Verbreitung der Wärme.

§ 231. Die Verbreitung der Wärme geschieht auf doppelte Weise, nämlich: 1) durch Leitung, 2) durch Strahlung. Durch Leitung wird die Wärme im Innern eines wägbaren Körpers oder, bei unmittelbarer Berührung zweier Körper, von jedem Teilchen zum unmittelbar benachbarten fortgepflanzt. Durch Strahlung dagegen erfolgt die Verbreitung der Wärme, nach Art der Fortpflanzung des Lichts, auf beliebig große Entfernungen und auch ohne das Vorhandensein eines die Fortpflanzung vermittelnden, wägbaren Mediums, z. B. von der Sonne zur Erde.

§ 232. Wärmeleitung. Hält man ein Stück Metalldraht mit einem Ende in eine Kerzenflamme, so wird die Erwärmung bald auch am anderen Ende fühlbar, es hat sich also die Wärme durch das Metall von Teilchen zu Teilchen fortgepflanzt. Bei anderen Körpern, z. B. Holz, erfolgt diese Fortleitung der Wärme so langsam, daß an einem brennenden Holzspan die Erwärmung kaum in unmittelbarer Nähe der brennenden Stelle fühlbar ist. Man unterscheidet danach gute und schlechte Wärmeleiter. Zu den ersteren gehören vorzüglich die Metalle, zu den letzteren Holz, Stroh, Pelzwerk, Wolle, Federn u. dergl. Man umgibt mit schlechten Wärmeleitern die Körper, welche gegen Wärmeverlust geschützt werden sollen, benutzt dieselben namentlich zur Bekleidung bei kalter Witterung u. s. w. Die Tiere der Polargegenden besitzen den dichtesten Winterpelz. Marmor und überhaupt die meisten Gesteine haben ein mittleres Wärmeleitungsvermögen. Gute Wärmeleiter sind bei hoher Temperatur heißer, bei niedriger Temperatur kälter anzufühlen als schlechte, weil sie die Wärme im ersten Fall schneller zuführen, im zweiten Fall schneller entziehen.

Um die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Körper, z. B. der Metalle, zu vergleichen, verfertigt man aus denselben Stäbe von gleicher Länge und Dicke, welche an einem Ende auf gleiche Temperatur erhitzt werden, und bestimmt die Temperatur der Stäbe in verschiedenen Entfernungen von der Wärmequelle, entweder durch Thermometer, deren Gefäße in enge, cylindrische Vertiefungen gebracht werden, die seitlich in die Stäbe gebohrt und mit Öl oder Quecksilber gefüllt sind, oder besser durch thermoelektrische Elemente (§ 337), welche durch ihre geringe Masse eine geringere Störung der regelmäßigen Wärmeverteilung in den Stäben hervorbringen. Werden die Stäbe versilbert, so ist die Wärmeabgabe an die äußere Umgebung bei allen gleich, und aus der Geschwindigkeit der Wärmeabnahme mit der Entfernung von der Wärmequelle kann auf ihr verschiedenes Leitungsvermögen geschlossen werden. Aus den Untersuchungen von Wiedemann und Franz (1853) geht eine merkwürdige Übereinstimmung zwischen der Leitfähigkeit der Metalle für Wärme und für Elektrizität (§ 319) hervor. Dieselben fanden z. B. folgende Zahlen:

	Leitfähigkeit für		Leitfähigkeit für	
	Wärme	Elektrizität	Wärme	Elektrizität
Silber	100	100	Eisen	11,9
Kupfer	73,6	77,43	Blei	8,5
Gold	53,2	55,19	Platin	8,4
Zink	28,1	27,39	Wismut	1,8
Zinn	14,5	11,45		

Krystalle haben ein ungleiches Wärmeleitungsvermögen in verschiedenen Richtungen. So fand Pfaff für das Leitungsvermögen des Bergkrystalls in der Richtung seiner krystallographischen Hauptaxe die Zahl 50,3, in der darauf senkrechten Richtung nur 39,1.

Eine eigentümliche Erscheinung zeigt sich, infolge der geringeren Leitfähigkeit von Blei für die Wärme, bei Trevelyans Wackler (1829), einem Metallprisma, welches am stumpfen Winkel mit einer Doppelkante versehen ist. Wird der Wackler stark erhitzt mit dieser Doppelkante an einen Bleiklotz gelehnt, so wird er durch die Ausdehnung dieses Klotzes an der jedesmaligen Berührungsstelle bald auf eine, bald auf die andere Kante gestoßen, gerät dadurch in eine schnelle, schwingende Bewegung und erzeugt nunmehr einen Ton, der um so höher ist, je schneller die Bewegung erfolgt. Durch gesteigerten Druck werden die Schwingungen beschleunigt.

§ 233. Leitfähigkeit der Flüssigkeiten und Gase. Flüssigkeiten sind im allgemeinen sehr schlechte Wärmeleiter. Wird eine Flüssigkeit in einem Gefäße von untenher erwärmt, so geschieht die Verbreitung der Wärme nicht durch Leitung, sondern durch Strömungen der Flüssigkeit, indem die am Boden des Gefäßes erwärmten Flüssigkeitsteilchen, als die leichteren, aufsteigen, und die kälteren, schwereren herabsinken und mit dem Boden in Berührung kommen. Auf diese Weise verbreitet sich die Wärme schnell durch die ganze Flüssigkeit (vgl. § 201). Von oben nach unten dagegen geschieht die Fortpflanzung der Wärme durch Leitung äußerst langsam. Ähnlich verhält es sich bei den gasförmigen Körpern. Nur das Wasserstoffgas ist nach den Versuchen von Magnus vor den anderen Gasen durch größeres Wärmeleitungsvermögen ausgezeichnet.

In einem mit Wasser gefüllten Probierröhrchen läßt sich oberhalb das Wasser zum Kochen bringen, ohne daß ein unten liegendes Eisstückchen schmilzt.

Atmosphärische Luft leitet 20000mal geringer als Kupfer, Wasserstoff 7mal besser als Luft. Nach Untersuchungen von Stefan (1877) ergibt sich, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Silbers, wie oben § 232, gleich 100 gesetzt wird, die Leitfähigkeit für Eis = 0,42, für Glas = 0,12, für Wasser = 0,11, für Wasserstoff = 0,029, für Luft = 0,004. Für Quecksilber (Angström, 1864) = 1,06.

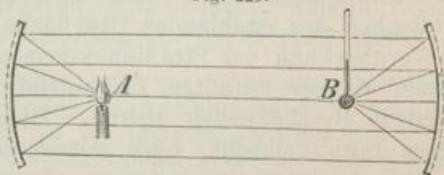
Zur Wasserheizung wird Wasser in einem Kessel zum Sieden erwärmt, von dem aus metallene Röhren nach den verschiedenen Räumen des Hauses und von diesen nach dem Kessel zurückführen. Bei der Luftheizung strömt die in

einer besonderen Heizkammer erwärmte Luft durch gemauerte Züge, welche zu verstellbaren Öffnungen in die Zimmer führen, in diese, während die kalte Luft durch ebenfalls verstellbare Öffnungen am Boden der Wände nach außen hin entweichen kann.

§ 234. Wärmestrahlung. Während die Wärmeleitung in wägbaren Körpern von Molekül zu Molekül fortschreitet, pflanzt sich die Wärmestrahlung durch den leeren Raum, durch die Luft, oder durch zwischenliegende, für Wärmestrahlen durchgängliche Körper nach Art des Lichtes fort. Auf diese Weise gelangt die Wärme von der Sonne zur Erde durch den leeren Weltraum, und ebenso verbreitet sich die Wärmestrahlung eines Ofens, oder eines Kaminfeuers. Die vollständige Übereinstimmung in den Gesetzen der Fortpflanzung der strahlenden Wärme und des Lichtes macht es wahrscheinlich, daß beide durch wellenförmig fortschreitende Schwingungen desselben elastischen, alle Körper durchdringenden Äthers (§ 176) fortgepflanzt werden. Ein warmer Körper veranlaßt demnach fortschreitende Wellen in dem ihn umgebenden Äther, oder sendet Wärmestrahlen aus, wie ein leuchtender Körper Lichtstrahlen. Diese Strahlen können auf ihrem Wege, wie die Lichtstrahlen, reflektiert oder gebrochen werden, bis sie auf einen Körper treffen, von welchem sie, wie die Lichtstrahlen von einem schwarzen Körper, verschluckt oder absorbiert werden, und zwar unter Erwärmung des Körpers. Die Ätherwellen, welche von der Sonne zur Erde gelangen, leuchten nicht nur, sondern erzeugen auch Wärme. Durch Hohlspiegel und Sammellinsen kann ihre Wärmewirkung auf einen Punkt vereinigt und dadurch bis zur Entzündung leicht brennbarer Stoffe gesteigert werden; daher die zum Teil auch in der Optik gebräuchlichen Namen: Brennspiegel, Brennglas, Brennpunkt.

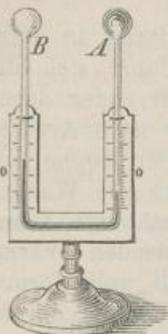
Die Ätherwellen sind an sich nicht warm, sondern erzeugen erst Wärme, wenn sie von einem wägbaren Körper absorbiert werden. Die Temperatur des Weltraumes, durch welchen die Wärmestrahlen zu uns gelangen, ist eine sehr niedrige (§ 202a). Die durch eine Eislinse gesammelten Wärmestrahlen der Sonne vermögen brennbare Körper zu entzünden. — Um die Reflexion der von terrestrischen (der Erde angehörigen) Wärmequellen ausgesendeten Wärmestrahlen nachzuweisen, stellte Pictet zwei Hohlspiegel von poliertem Metall einander gegenüber, so daß die von dem Brennpunkte *A* (Fig. 225) eines der beiden Hohlspiegel ausgehenden Strahlen von diesem in paralleler Richtung nach dem zweiten Spiegel zurückgeworfen und in dessen Brennpunkt *B* gesammelt wurden (§ 137). Brachte man in den Brennpunkt *A* eine Kerzenflamme, eine glühende Metallkugel oder einen anderen erhitzten Körper, in den Brennpunkt *B* ein Thermometer, dessen Kugel zur besseren Aufnahme der Wärmestrahlen geschwärzt war (§ 236), so beobachtete man ein Steigen des Thermometers in *B*, während ein zwischen *A* und *B*, oder seitwärts von *B* aufgestelltes Thermometer keine merkliche Erwärmung erfuhr. Wurde in den Brennpunkt *A* anstatt des erhitzten Körpers ein Stück Eis gebracht, so sank das Thermometer in *B* unter die Temperatur der Umgebung. Dieses Resultat erklärt sich dadurch, daß jeder Körper fortwährend Wärme ausstrahlt und zwar um so mehr, je höher seine Temperatur ist. Besitzen alle in einem Raum befindlichen Körper gleiche Temperatur, so empfängt jeder Körper von seiner Umgebung genau ebensoviel Wärme, wie er ausstrahlt, das Temperaturgleichgewicht bleibt deshalb bestehen. Besitzen die Körper dagegen ungleiche Temperatur, so strahlen die wärmeren Körper mehr Wärme

Fig. 225.



aus als sie empfangen, die kälteren dagegen empfangen mehr als sie ausstrahlen, so lange bis das Temperaturgleichgewicht hergestellt ist. Im obigen Fall strahlt das Thermometer *B* mehr Wärme nach dem in *A* befindlichen Eisstück aus, als es von diesem zurückempfängt; seine Temperatur muß daher sinken.

Fig. 226.



Anstelle des Quecksilberthermometers bedient man sich bei diesen Versuchen zweckmäßig des Differentialthermometers von Leslie (1804), welches den Vorzug größerer Empfindlichkeit hat. Dasselbe besteht aus zwei mit Luft gefüllten Hohlkugeln von Glas *A*, *B* (Fig. 226), welche durch eine enge, zweimal rechtwinklig gebogene Glasröhre verbunden sind. Diese ist zum Teil mit gefärbtem Weingeist gefüllt, dessen Stand an einer am Gestell des Instruments angebrachten Teilung abgelesen werden kann. Die Kugel *A* ist zur besseren Aufnahme der Wärmestrahlen geschwärzt. Eine Erwärmung der Kugel *A* hat die Ausdehnung der in ihr enthaltenen Luft, also ein Sinken der Weingeistsäule auf der Seite der Kugel *A* und ein Steigen im anderen Schenkel der Röhre zur Folge.

§ 235. Thermomultiplikator. Das empfindlichste und wichtigste Instrument zur Untersuchung der Gesetze der Wärmestrahlung ist der Thermomultiplikator von Nobili und Melloni (1834). Derselbe besteht aus einer würfelförmigen, thermoelektrischen Säule (vgl. § 338) und einem Galvanometer (§ 317), dessen Drahtenden mit den Polen der Säule verbunden sind. Zwei Gegenflächen der thermoelektrischen Säule, welche die Lötstellen enthalten, sind zur vollständigen Aufnahme der Wärmestrahlen mit Kienrufs geschwärzt. Ein Blechtrichter, welcher auf die Fassung der Säule gesteckt werden kann, dient zum Sammeln der Wärmestrahlen. Haben beide Seiten der Säule gleiche Temperatur, so zeigt die Nadel des Galvanometers auf Null. Die geringste Temperaturdifferenz giebt sich durch den Ausschlag des Galvanometers kund. Die Empfindlichkeit des Instruments ist so groß, daß die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers in der Entfernung von einigen Metern durch den Ausschlag der Nadel sichtbar gemacht wird.

§ 236. Ausstrahlung und Absorption der Wärmestrahlen. Nicht alle Körper strahlen bei gleicher Temperatur gleich viel Wärme aus; das Strahlungsvermögen wird vielmehr in hohem Grade durch die Beschaffenheit der strahlenden Oberfläche beeinflusst. Leslie wendete (1804) zur Vergleichung des Strahlungsvermögens verschiedener Körper einen mit heißem Wasser gefüllten Hohlwürfel von Blech an, dessen Flächen verschiedene Beschaffenheit hatten. Eine derselben war blank poliert, eine andere rauh gemacht, oder mit verschiedenen Überzügen von Bleiweiß, Kienrufs, Lack, u. s. w. versehen. Je nachdem nun, bei gleicher Temperatur und Entfernung, dem Differentialthermometer oder der thermoelektrischen Säule verschiedene Flächen des Würfels zugewendet wurden, beobachtete man verschiedene Grade der Erwärmung. Im allgemeinen strahlen dunkle und rauhe Körper bei gleicher Temperatur mehr Wärme aus, als helle und glatte Körper. So fand Leslie die Ausstrahlung der blank polierten Metallfläche des Würfels am kleinsten, die der mit Kienrufs geschwärzten Fläche am größten. Gewalzte und gehämmerte Metallflächen strahlen weniger Wärme aus als gegossene. Durch Ritzen der Metallflächen wird das Strahlungsvermögen erhöht.

sitzen
nimmt
strahl
schm
schwa

eines
wie se
per d
welc
Kirch
Versu
dall
bestät

strahl
Durch
Wärm
sitzen
Metall
Licht

wie
strahl
hindu
schie
Grad
sein f
Glas
gut d
Strahl
Wass
vollstä
Wärm
gegen
eine A
strahle

Zu
von W
dem e
der V
jedesm
verschi
Aus d
schiede
glühend
schloß
Wärm
ebenso
schiede
Glas, s
Gattung
durch
vollstän

Joel

Diejenigen Körper, welche am leichtesten die Wärme ausstrahlen, besitzen umgekehrt auch das größte Absorptionsvermögen. Kienrufs nimmt alle Arten von Wärmestrahlen am leichtesten auf. Durch Sonnenstrahlen werden dunkle Kleidungsstücke stärker erwärmt als helle. Schnee schmilzt durch die Sonnenstrahlen schnell unter einer Bedeckung von schwarzen, langsamer unter hellen Tüchern.

Kirchhoff hat den Satz aufgestellt, daß das Absorptionsvermögen eines Körpers für verschiedene Arten von Strahlen in demselben Verhältnis steht, wie sein Emissionsvermögen für dieselben Strahlen, oder daß jeder Körper diejenigen Wärme- oder Lichtstrahlen am leichtesten absorbiert, welche er selbst am leichtesten ausstrahlt (vergl. § 150). Dieser von Kirchhoff aus theoretischen Gründen abgeleitete und für Lichtstrahlen durch Versuche nachgewiesene Satz ist besonders durch die Untersuchungen von Tyndall für die verschiedenen Gattungen von Wärmestrahlen (s. § 237) experimentell bestätigt worden.

§ 237. Diathermanität, verschiedene Gattungen von Wärmestrahlen. Wie die verschiedenen Körper einen verschiedenen Grad der Durchsichtigkeit für Lichtstrahlen besitzen, so sind dieselben auch für Wärmestrahlen nicht in gleichem Grade durchgänglich, oder dieselben besitzen einen verschiedenen Grad von Diathermanität. So sind z. B. die Metalle für Wärmestrahlen ebenso undurchgänglich, wie undurchsichtig für Lichtstrahlen, dagegen verhält sich Steinsalz gegen Wärmestrahlen ebenso wie ein vollkommen farblos und durchsichtiger Körper gegen Lichtstrahlen, indem es alle Gattungen von Strahlen mit gleicher Leichtigkeit hindurchgehen läßt. Ein und derselbe Körper kann für die von verschiedenen Wärmequellen ausgesendeten Strahlen in verschiedenem Grade diatherman sein. Ein undurchsichtiger Körper kann diatherman sein für gewisse Arten von Wärmestrahlen und umgekehrt. Farbloses Glas läßt z. B. die Sonnenwärme ziemlich leicht hindurchgehen, weniger gut die von einer Flamme oder von einem glühenden Körper ausgesendeten Strahlen (Mariotte, 1681), noch weniger die eines Leslieschen Würfels. Wasser läßt die Sonnenwärme teilweise hindurchgehen, absorbiert aber vollständig die von einem Leslieschen Würfel ausgesendeten, dunklen Wärmestrahlen. Alaun ist farblos und durchsichtig für Lichtstrahlen, dagegen fast ganz undurchgänglich für dunkle Wärmestrahlen. Umgekehrt ist eine Auflösung von Jod in Schwefelkohlenstoff völlig undurchsichtig für Lichtstrahlen, läßt aber die dunklen Wärmestrahlen mit Leichtigkeit hindurch.

Zur Untersuchung der Diathermanität der Körper für verschiedene Gattungen von Wärmestrahlen bediente sich Melloni des Thermomultiplikators (§ 235), indem er zuerst bei einer gewissen Entfernung der thermoelektrischen Säule von der Wärmequelle den Ausschlag der Multiplikatornadel beobachtete und dann jedesmal bestimmte, in welchem Verhältnis die Strahlung durch Zwischenstellen verschiedener Körper, z. B. Glas-, Alaun-, Steinsalz-Platten, geschwächt wurde. Aus der verschiedenen Diathermanität desselben Körpers für die Strahlen verschiedener Wärmequellen (z. B. der Sonne, einer Öl- oder Weingeistlampe, einer glühenden Spirale von Platindraht, eines erhitzten, geschwärzten Metallblechs u. s. w.) schloß Melloni, daß es verschiedene Arten von Wärmestrahlen oder Wärmefarben gebe, gegen welche sich die verschiedenen diathermanen Körper ebenso verschieden verhalten, wie farbige, durchsichtige Körper gegen die verschiedenen Gattungen von Lichtstrahlen. Geht weißes Licht durch ein rotes Glas, so läßt dieses nur die roten Strahlen hindurch und absorbiert alle anderen Gattungen von Strahlen. Diese roten Strahlen gehen jetzt fast ungeschwächt durch ein zweites, gleichgefärbtes Glas, werden hingegen von einem blauen Glase vollständig absorbiert u. s. w. Ähnlich verhält es sich mit den Wärmestrahlen.

Der vollständige Nachweis der Analogie der verschiedenen Gattungen von Wärmestrahlen mit den verschiedenfarbigen Lichtstrahlen wird durch die prismatische Zerlegung der Wärmestrahlen geliefert (§ 238).

§ 238. Prismatische Zerlegung der Wärmestrahlen, Identität von Licht- und Wärmestrahlen. Zwischen den Gesetzen der Fortpflanzung des Lichts und der strahlenden Wärme findet vollständige Übereinstimmung statt. Beide verbreiten sich in gerader Linie. Die Intensität der Wärmestrahlen nimmt, wie Melloni durch Versuche am Thermomultiplikator nachwies, wie die der Lichtstrahlen, im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernung von der Wärmequelle ab. Die Wärmestrahlen können wie die Lichtstrahlen reflektiert und gebrochen werden; die verschiedenen Arten von Wärmestrahlen unterscheiden sich, wie die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen, durch den verschiedenen Grad ihrer Brechbarkeit. Zur prismatischen Untersuchung der Wärmestrahlen muß man sich eines Steinsalzprismas bedienen, da dieses für alle Arten von Wärmestrahlen in gleichem Grade diatherman ist, während Glasprismen einen Teil derselben (die sogenannten dunklen Wärmestrahlen) absorbieren. Erzeugt man ein Sonnenspektrum mit Hilfe eines Steinsalzprismas und bringt eine thermoelektrische Säule, oder ein empfindliches Thermometer mit geschwärzter Kugel nach einander in die verschiedenen Teile dieses Spektrums, so findet man, daß die blauen, violetten und ultravioletten Strahlen fast gar keine wärmende Wirkung ausüben, daß dieselbe im gelben Teil des Spektrums (der für das Auge am hellsten erscheint) gering, in den roten Strahlen dagegen am größten ist. Bringt man die thermoelektrische Säule in den dunklen Raum jenseits des roten Endes des Spektrums, so beobachtet man auch dort noch eine Wärmewirkung, die sich weit über das sichtbare Spektrum hinaus erstreckt. Das Maximum der Wärmewirkung liegt sogar noch jenseits des Endes des sichtbaren Spektrums. Es giebt also nicht nur unsichtbare Strahlen jenseits des violetten Endes des Spektrums (§ 152), sondern auch jenseits des roten Endes existieren Strahlen von geringerer Brechbarkeit und größerer Wellenlänge (§ 178) als die roten Strahlen, welche für unser Auge unsichtbar sind, entweder weil unser Sehnerv für Strahlen von dieser Wellenlänge unempfindlich ist, oder weil die lichtbrechenden Medien unseres Auges für dieselben undurchsichtig sind und dieselben absorbieren, bevor sie zur Netzhaut gelangen. Wie die ultravioletten Strahlen durch ihre fluorescenzregenden und chemischen Wirkungen (§§ 152 und 153), so sind die diesseits des Rot liegenden, dunklen Strahlen des Sonnenspektrums durch ihre Wärmewirkungen erkennbar. — Untersucht man auf gleiche Weise die Strahlen verschiedener anderen Wärmequellen durch Zerlegung mittelst des Steinsalzprismas, so findet man, daß im allgemeinen jede Wärmequelle um so mannigfaltigere und besonders um so mehr von den brechbareren und sichtbaren Strahlen des Spektrums aussendet, je höher ihre Temperatur ist. So senden Körper von niedriger Temperatur nur diesseits des roten Endes des Spektrums liegende, dunkle Strahlen aus. Bei der Temperatur des Rotglühens beginnen die am wenigsten brechbaren, sichtbaren Strahlen aufzutreten; bei gesteigerter Temperatur kommen mehr und mehr Strahlen von größerer Brechbarkeit hinzu, bis bei voller Weißglühhitze alle Gattungen sichtbarer Strahlen vertreten sind, während zu-

gleich
genom
seits.
fast
kohle
der
Körp
strah

V
persio
risat
Licht
versch
Mit
ist a
von
die s
in ei
mit
wenn
ström
schw
von d
erze
Beweg
Körpe

D
Appar
und s
gewor
Wirk
leeren
bar u
miniu
demse
Seite
ausge
Gesch
rückw
bei K
kung
Licht
platte
haben
wird,
Durch
mehr

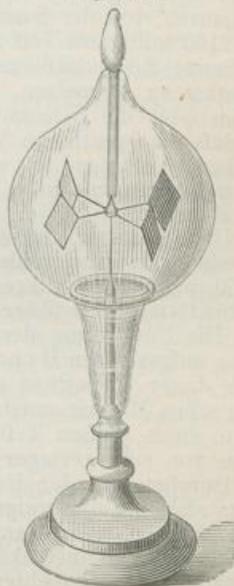
lichst
die S
Erdol
ersche
welch
sich
ders
liches

gleich die dunklen Strahlen in entsprechendem Grade an Intensität zugenommen haben. — Wasser und Alaun absorbieren alle dunklen, jenseits des Rot liegenden Wärmestrahlen, während sie die sichtbaren Strahlen fast ungeschwächt hindurchlassen; bei einer Auflösung von Jod in Schwefelkohlenstoff findet das Umgekehrte statt. Es erklärt sich also, wie trotz der Identität von Licht und strahlender Wärme ein undurchsichtiger Körper diatherman und ein durchsichtiger Körper für gewisse Wärmestrahlen adiatherman erscheinen kann.

Wie in den Erscheinungen der Fortpflanzung, Reflexion, Brechung und Dispersion, so zeigt sich auch in den Erscheinungen der Interferenz und Polarisation (§§ 179, 182 u. ff.) eine so vollkommene Übereinstimmung zwischen Licht- und Wärmestrahlen, daß unzweifelhaft Licht und Wärme nur als zwei verschiedene Wirkungen derselben Ätherschwingungen betrachtet werden müssen. Mit dem Nachweis der Identität von Licht und strahlender Wärme ist aber zugleich der Beweis geführt, daß die ältere Vorstellung von der Existenz eines Wärmestoffes verworfen werden muß und die sogenannte mechanische Theorie der Wärme, wonach dieselbe in einem Bewegungszustand der Körperteilchen besteht, die allein mit den Erscheinungen der Wärmestrahlung vereinbar ist. Denn wenn die von der Sonne zur Erde gelangenden Wärmestrahlen nicht in der Ausströmung eines materiellen Stoffes, sondern wie die Lichtstrahlen in Ätherschwingungen bestehen, so ist es nicht denkbar, daß ein Wärmestoff in dem von den Strahlen getroffenen Körper durch dieselben in unbegrenzter Quantität erzeugt werden kann, was dem Begriff des Stoffes widersprechen würde. Eine Bewegung kann keinen Stoff, wohl aber wieder einen Bewegungszustand der Körperteilchen erzeugen.

Durch einen 1874 von Crookes hergestellten Apparat, der von ihm als Radiometer bezeichnet und seitdem unter dem Namen Lichtmühle bekannt geworden ist, wird eine eigentümliche mechanische Wirkung der Wärme dargestellt. In einem luftleeren Glasballon (Fig. 226a) befindet sich, leicht drehbar um eine vertikale Axe, auf Kreuzarmen aus Aluminium ein Kranz von vier leichten Blättchen von demselben Metall, die in gleicher Folge auf der einen Seite mit Ruß geschwärzt sind. Den Sonnenstrahlen ausgesetzt, bewegt sich die Lichtmühle mit großer Geschwindigkeit, so daß die schwarzen Flächen zurückweichen, langsamer bei mittlerem Tageslicht, oder bei Kerzenbeleuchtung. Daß die Bewegung eine Wirkung der Wärme ist, ergibt sich daraus, daß durch Lichtstrahlen, welche vorher durch eine klare Alaunplatte gegangen und dadurch ihre Wärme verloren haben (§ 237), die Lichtmühle nicht mehr bewegt wird, wohl aber, wenn die Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch dunkle Jodlösung keine Leuchtkraft mehr besitzen.

Fig. 226a.



6. Quellen der Wärme.

§ 239. Sonnenwärme. Eine der vorzüglichsten Wärmequellen für die Erdoberfläche ist die Strahlung der Sonne, durch welche das organische Leben auf der Erdoberfläche allein möglich wird, und durch welche alle Witterungserscheinungen in erster Linie veranlaßt werden. Um die Wärmemenge, welche alljährlich von der Sonne zur Erde gelangt, zu bestimmen, bediente sich Pouillet des Pyrheliometers. Ein Gefäß, in Form eines Cylinders von geringer Höhe, ist mit Wasser gefüllt und enthält ein empfindliches Thermometer. Eine Grundfläche des Gefäßes, welches mit Kienruß

geschwärzt ist, wird den Sonnenstrahlen ausgesetzt, so daß sie von denselben senkrecht getroffen wird. Bestimmt man nun die Temperaturerhöhung, welche das Gefäß und das darin enthaltene Wasser während einer gewissen Zahl von Minuten erfährt, so kann man aus der bekannten Wassermenge und dem kalorimetrischen Wasserwert des Gefäßes (§ 226) die während einer Minute absorbierte Wärmemenge berechnen. Kennt man ferner die Größe der Grundfläche des Gefäßes, so läßt sich daraus die in jeder Minute auf die Fläche eines Quadratcentimeters gestrahlte Wärmemenge, oder endlich die Strahlung auf eine Kreisfläche berechnen, deren Durchmesser gleich dem der Erde ist. Eine leichte Überlegung lehrt (§ 366), daß diese Wärmemenge derjenigen gleich ist, welche die Erde während jeder Minute von der Sonne empfängt, wobei nur noch die Absorption in der Erdatmosphäre zu berücksichtigen ist.

Aus Beobachtungen über die Wärmestrahlung bei verschiedener Höhe der Sonne über dem Horizont schloß Pouillet, daß durch Absorption in der Atmosphäre bei heiterem Himmel im Durchschnitt etwa 40% der Sonnenwärme verloren gehen oder nur 60% zur Erdoberfläche gelangen. Die in 1 Min. auf 1 qcm der Erdoberfläche gestrahlte Wärmemenge vermag, im Mittel aus den Versuchen von Pouillet und von O. Hagen, bei senkrechter Incidenz 1 Gramm Wasser um etwa 1,76° C. zu erwärmen. Es folgt daraus, daß die jährlich von der Sonne zur Erdoberfläche gelangende Wärmemenge eine die ganze Erdoberfläche gleichmäßig bedeckende Eisschicht von 30 m Dicke oder eine Eismasse von mehr als 15 Trillionen kg zu schmelzen vermöchte, wozu 1200 Trillionen Wärmeinheiten (§ 205) erforderlich sind. Um eine gleiche Wärmemenge zu erzeugen, würde man täglich 9 Billionen Centner Kohlenstoff verbrennen müssen. Da von der ganzen, von der Sonne nach dem Weltraum ausgestrahlten Wärmemenge nur der 2160 millionste Teil zur Erde gelangt, so beträgt der jährliche Wärmeverlust der Sonne 2,6 Quintillionen Wärmeinheiten, welche hinreichen würden, um eine Eismasse zu schmelzen, welche an Volumen den Erdkörper 30000 mal übertreffen oder die Sonnenoberfläche 5700 km hoch bedecken würde. Nimmt man an, daß die spezifische Wärme der Sonne gleich sei der einer Wassermasse von gleichem Volumen, so würde die Sonnenmasse, wenn kein Ersatz für diesen Wärmeverlust stattfindet, durch denselben eine jährliche Temperaturenniedrigung von 2° erfahren.

Die Quantität und die Beschaffenheit (§§ 237, 238) der von der Sonne ausgesendeten Wärmestrahlen, sowie die optischen Untersuchungen von Kirchhoff (§ 150) machen es wahrscheinlich, daß die Sonne ein feuerflüssiger und von einer dichten Dampfatmosphäre umgebener Körper von außerordentlich hoher Temperatur sei. Die Entstehung der Sonnenwärme erklärt sich aus der von Kant und Laplace aufgestellten Hypothese über die Bildung unseres Sonnensystems. Nach dieser Hypothese sind die Sonne und die Planeten durch Verdichtung der kosmischen Materie entstanden, welche ursprünglich mit annähernd gleichförmiger Dichte einen großen Teil des Weltraums anfüllte und eine in Rotation begriffene Masse von sehr geringer Dichtigkeit bildete, deren Durchmesser größer war, als der Durchmesser der Bahn des äußersten Planeten. Die Planeten entstanden, indem sich von der rotierenden Masse an der Außenfläche nach einander einzelne Teile ablösten, welche anfangs ringförmig, wie der Saturnring, sich später zu den kugelförmigen Planetenkörpern zusammenballten. Aus der übriggebliebenen, sich mehr und mehr verdichtenden Centralmasse ging endlich die Sonne hervor. Es erklärt sich aus dieser Hypothese die allen Planeten gemeinsame Richtung des Umlaufs und der Axendrehung (vergl. § 386). Aus der mit der Verdichtung verbundenen Wärmeentwicklung erklärt sich ferner die hohe Temperatur der Sonnenmasse und der Planeten, welche sich höchst wahrscheinlich, wie die Erde, zur Zeit ihrer Bildung im feuerflüssigen Zustand befanden, und deren innere Masse die ursprüngliche, hohe Temperatur, je nach dem Größenverhältnis in mehr oder minder hohem Grade, bewahren mußte. Helmholtz hat berechnet, daß die durch Verdichtung der Sonnenmasse entwickelte Wärmemenge zur Erzeugung einer Temperatur von 28 Millionen Graden hinreichte. Wiewohl der gegenwärtig noch vorhandene Wärmeverrat der Sonne noch für eine Reihe von vielen Millionen Jahren ausreichen mag, so muß doch erwartet werden, daß derselbe sich endlich

ersch
Leber
Plane
Neb
stärk
Entw
unser

der S
des I
stalt
lich
befan
nisch
name
Islan
quell
schac
regel
Mitte
bei g
1 ge
Meile
Geste
schei
in fe
welch
Rinde

D
bei Pa
des 67
Minder
der ob
parat
Punkt
Temp
Boden
bei Sc
und z
Temp

D
darauf
verlust
der ha
kühlun
der Er
dicke
trägt,
würde
gleich
oberflä
abnah
der W
Gleich
D
Kiesel

erschöpfen und mit dem Sonnenlicht und der Sonnenwärme die Möglichkeit des Lebens organischer Naturkörper auf der Oberfläche der Erde und der übrigen Planeten aufhören werde (vergl. § 371). Aus Beobachtungen an den sogenannten Nebelsternen (vergl. §§ 150, 405) und an Fixsternen von veränderlicher Lichtstärke kann man schließen, daß andere Fixsterne eine ähnliche Reihe von Entwicklungsphasen durchmachen, wie wir dieselben bei dem Centalkörper unseres Planetensystems voraussetzen Veranlassung haben.

§ 240. Erdwärme. In weit geringerem Grade als die Strahlung der Sonne kommt als Wärmequelle für die Erdoberfläche die innere Wärme des Erdkörpers selbst in Betracht. Abgesehen von der sphäroidischen Gestalt der Erde (§ 56) und von geologischen Gründen, welche es wahrscheinlich machen, daß sich einst die ganze Erdmasse in feuerflüssigem Zustand befand, macht sich die innere Erdwärme noch jetzt besonders in den vulkanischen Ausbrüchen bemerkbar. Die hohe Temperatur vieler Mineralquellen, namentlich z. B. des siedend heißen Karlsbader Sprudels und des Geysirs auf Island, erklärt sich daraus, daß diese Gewässer aus sehr großer Tiefe emporquellen. Beim Eindringen in das Innere der Erde, z. B. in Bergwerkschächten, den Bohrlöchern artesischer Brunnen (§ 86), bemerkt man eine regelmäßige Zunahme der Temperatur mit wachsender Tiefe, welche im Mittel etwa 1° C. für je 37 m beträgt. Man kann daraus schließen, daß bei gleichmäßig fortschreitender Temperaturzunahme in der Tiefe von 1 geogr. Meile die Temperatur mehr als 200° betragen und daß in 10 Meilen Tiefe sich die meisten, die oberen Erdschichten zusammensetzenden Gesteine in geschmolzenem Zustand befinden würden. Es ist daher wahrscheinlich, daß der bei weitem größte Teil der Erdmasse sich jetzt noch in feuerflüssigem Zustand befindet, und daß die festen Gesteinsmassen, welche die Erdoberfläche zusammensetzen, als eine verhältnismäßig dünne Rinde den flüssigen Kern umschließen.

Das aus dem 548 m tiefen Bohrloch des artesischen Brunnens zu Grenelle bei Paris hervorquellende Wasser zeigt eine Temperatur von $27\frac{3}{4}^{\circ}$ C. Im Grunde des 673 m tiefen Bohrlochs des Salinabrunnens zu Neusalzwerk (Rehme) bei Minden fand man eine Temperatur von $32,8^{\circ}$ C. Da die mittlere Temperatur der oberflächlichen Erdschichten daselbst $9,6^{\circ}$ C. beträgt, so ergibt dies eine Temperaturzunahme von 1° auf je 29 m. Im Mont-Cenis-Tunnel hat sich für einen Punkt im Innern, über dem eine Felsenmasse von etwa 1550 m gelagert ist, eine Temperaturdifferenz von etwa 31° C. von der auf -2° berechneten, mittleren Bodentemperatur ergeben, also eine Zunahme von 1° C. auf 50 m. Das Bohrloch bei Schladebach, in der Nähe von Halle a. d. Saale, hat eine Tiefe von 1716 m und zeigt von 1593 m Tiefe ab von 30 zu 30 m die allmählich zunehmenden Temperaturen:

54,50°; 55,00°; 55,50°; 56,50°; 56,63° C.

Da die Temperatur der Erdschichten von innen nach außen abnimmt, so folgt daraus, daß ein fortwährender Wärmestrom von innen nach außen oder ein Wärmeverlust des Erdinneren stattfinden muß. Infolge des geringen Leitungsvermögens der hauptsächlich die Erdkruste bildenden Gesteinsmassen geht aber dieser Abkühlungsprozeß nur äußerst langsam vor sich. Fourier berechnete, daß die von der Erde in 100 Jahren abgegebene Wärmemenge hinreichen würde, um eine 3 m dicke Eisschicht zu schmelzen, daß dieselbe also nur 0,001 von der Wärme beträgt, welche die Erde in gleicher Zeit von der Sonne empfängt (§ 239). Demnach würde sich die Erde, ihre spezifische Wärme gleich der einer Wassermasse von gleichem Volumen gesetzt, in einer Million Jahren um etwa 1° abkühlen. Die Erdoberfläche hat innerhalb der historischen Zeiten keine nachweisbare Temperaturabnahme erlitten, indem der Wärmegewinn durch die Strahlung der Sonne und der Wärmeverlust durch Ausstrahlung nach dem Weltraum sich merklich das Gleichgewicht halten.

Der große Geysir auf Island entspringt auf einem flachen Kegel von Kieselstein, der gegen 10 m hoch ist und einen Durchmesser von etwa 70 m hat.

Auf dem Gipfel befindet sich ein rundes Bassin von 2 m Tiefe und 13–15 m Durchmesser, in dessen Grunde sich eine 3 m weite, schachtartige Röhre gegen 23–24 m in die Tiefe senkt. Wenn das Becken voll und ruhig ist, so hat das krystallklare seegrüne Wasser an der Oberfläche eine Temperatur von 76–89° C., während es in den erreichbaren Tiefen der Röhre eine Temperatur von 122–127° C. zeigt. — Die Thermen in Burscheid haben die Temperatur 78°, in Karlsbad 74°, in Wiesbaden 70°, in Baden 67°, in Aachen 57°, in Ems 56° u. s. w.

§ 241. Mechanische und chemische Wärmequellen. Außer den in den beiden vorhergehenden Paragraphen behandelten Wärmequellen, welche als kosmische bezeichnet werden können, stehen uns zur Erzeugung von Wärme mehrfache Hilfsmittel zu Gebote, welche im wesentlichen in mechanische und chemische unterschieden werden können. Zu den mechanischen Wärmequellen gehört die Erzeugung von Wärme durch Reibung und Druck; unter den chemischen Prozessen, welche zur Wärmeerzeugung dienen können, sind die Verbrennungsprozesse die wichtigsten.

Die Wärmeerzeugung durch Druck und Reibung kommt bei vielfachen Erscheinungen des täglichen Lebens in Betracht. So erhitzen sich Maschinenteile, die Axen und Naben der Wagenräder, u. s. w. durch gegenseitige Reibung, bei Mangel an hinreichenden Schmiermitteln. Metallstücke werden durch den Druck unter dem Prägestempel der Münzpresse sehr heiß. Ein eiserner Nagel kann durch Hämmern auf dem Amboss bis zum Glühen erhitzt werden; eine um einen hölzernen Stab geschlungene Schnur erhitzt sich und den Stab durch schnelles Hin- und Herziehen bis zum Versengen. Bei manchen im Naturzustande lebenden Völkerstämmen ist noch gegenwärtig die Methode des Feueranzündens durch Reibung zweier Holzstücke gebräuchlich. Der Stahl erhitzt sich durch Reibung am Feuerstein so stark, daß die losgelösten, verbrennenden Stahlteilchen dazu dienen können, Zunder, Feuerschwamm oder Schießpulver zu entzünden. Der an den Streichhölzern befindliche Phosphor erhitzt sich durch Reibung an einer rauhen Fläche bis zur Temperatur seiner Entzündung. Bei den schwedischen Zündhölzern ist auf der Reibfläche sogenannter roter Phosphor, der weniger giftig ist, angebracht (§ 19 d).

Die starke Wärmeentwicklung beim Bohren von Kanonenrohren veranlaßte den Grafen Rumford (1798) den Ursprung der Reibungswärme näher zu untersuchen. Derselbe fand, daß trotz der beträchtlichen Wärmeentwicklung, durch welche eine große, das Kanonenrohr umgebende Wassermasse bald bis zum Sieden erhitzt wurde, weder das Kanonenmetall, noch die abgelösten Bohrspäne, eine verminderte Wärmekapazität zeigten. Da die entwickelte Wärme auch nicht aus der äußeren Umgebung stammen konnte, so schloß Rumford, daß durch die Reibung eine der aufgewendeten Arbeit entsprechende Wärmemenge erzeugt worden sei, daß sonach die Wärme kein Stoff sein könnte, sondern in einer Bewegung der Körperteilchen bestehe. Dasselbe geht aus einem Versuch von Davy hervor, bei welchem zwei Eisstücke durch Reibung im luftleeren Raum und in einer unter 0° abgekühlten Umgebung geschmolzen wurden, obgleich das durch Schmelzen entstandene Wasser eine größere Wärmekapazität besitzt als das Eis. J. R. Mayer (1842) und J. P. Joule (1850) zeigten, daß zwischen der erzeugten Wärmemenge und der zu ihrer Erzeugung verwendeten Arbeit ein bestimmtes und unabänderliches Verhältnis bestehe. Aus den Versuchen von Joule über die Reibung von Gufseisen mit Wasser oder Quecksilber, welches in einem Kalorimetergefäß enthalten war, geht hervor, daß eine Arbeit von 423,55 Kilogramm Metern (§ 43) erforderlich ist, um 1 kg Wasser um 1° C. zu erwärmen. — Benutzt man umgekehrt, wie es bei der Dampfmaschine der Fall ist, die Wärme zur Erzeugung mechanischer Arbeit, so würde, wenn alle durch Verbrennung der Kohlen erzeugte Wärme ohne Verlust verwertet werden könnte, durch Verbrauch einer Wärmeinheit ein Gewicht von 423,55 kg 1 m hoch gehoben werden können. Diese Zahl, welche das unabänderliche Um-

setzungen
des n
daß z
zwei
änd
Aqui
Erwei
Arbei
gleich
darin
wie b
kleins
mecha
und u
in ein
Teils
V
oder
oder
sprec
Wär
wicht
Verw
ist di
— D
der 1

Wird
drisc
ratur
angev
zu er
durch
chen

J
anden
mit V
mitte
in Ve
sam
den l
hierb
ernied
sonde
des C
I
Exp
Aquiv
Luft
 $c_1 =$
Cazi
vergl.
Die D
des ä
gleich
anzug
Gefäß
dem

setzungsverhältnis von Wärme und Arbeit angeht, wird deshalb mit dem Namen des mechanischen Äquivalents der Wärmeeinheit bezeichnet. Der Satz, daß zwischen der verwendeten Arbeit und der erzeugten Wärme, sowie umgekehrt, zwischen der verbrauchten Wärme und der geleisteten Arbeit, ein solches unveränderliches Umsetzungsverhältnis besteht, ist unter dem Namen des Prinzips der Äquivalenz der Arbeit und Wärme bekannt. — Dieses Prinzip enthält eine Erweiterung des in der Mechanik (§ 43) erläuterten Prinzips der Erhaltung der Arbeit, wonach bei mechanischen Vorgängen die geleistete Arbeit der verbrauchten gleich ist, sei es, daß der Arbeitsverbrauch in der Hebung einer Last, oder darin besteht, daß einer Masse eine gewisse Geschwindigkeit erteilt wird. Da, wie bereits oben (§ 238) gezeigt, die Wärme als ein Bewegungszustand der kleinsten Körperteilchen betrachtet werden muß, so wird eine gewisse Quantität mechanischer Arbeit erforderlich sein, um diesen Bewegungszustand hervorzurufen, und umgekehrt wird ein warmer Körper, d. h. ein solcher, dessen Teilchen sich in einem intensiven Bewegungszustand befinden, fähig sein, durch Abgabe eines Teils dieser Bewegung eine gewisse Menge mechanischer Arbeit zu leisten.

Wo in der Mechanik ein Arbeitsverbrauch ohne entsprechenden Gewinn oder ein Verlust lebendiger Kraft vorkommt, wie z. B. beim Zusammendrücken, oder beim Stoß unelastischer Körper (§ 68), da wird eine diesem Verbrauch entsprechende Wärmemenge erzeugt. Umgekehrt wird durch den Verbrauch von Wärme Arbeit geleistet, sei es nun, daß dieselbe in der Hebung eines Gewichts, oder in Überwindung der Kohäsion (§§ 43 und 204), oder der chemischen Verwandtschaftskräfte (§ 243) bestehe. Die Arbeitsquelle der Dampfmaschine ist die durch Verbrennung der Kohlen auf dem Feuerherd erzeugte Wärmemenge. — Die in einem Körper enthaltene Wärmemenge ist demnach als die Quantität der lebendigen Kraft der Molekularbewegung seiner Teile aufzufassen.

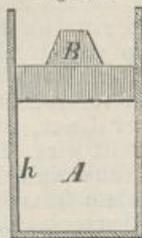
§ 242. Wärmeerzeugung durch Kompression der Gase. Wird eine Gasmasse durch Niederdrücken eines Stempels in einem cylindrischen Gefäß komprimiert, so erfährt sie dabei eine beträchtliche Temperaturerhöhung, welche in dem sogenannten pneumatischen Feuerzeug angewendet worden ist, um Feuerschwamm oder leicht brennbaren Zunder zu entzünden. Umgekehrt erfolgt, wenn ein Gas sich ausdehnt und dabei durch Überwindung eines Gegendruckes eine Arbeit leistet, eine entsprechende Temperaturerniedrigung (Kalt-Luftmaschine).

Joule stellte zwei gleich große Behälter, von denen der eine luftleer, der andere mit zusammengedrückter Luft gefüllt war, neben einander in ein größeres mit Wasser gefülltes Gefäß, das als Kalorimeter diente. Beide Behälter konnten mittelst eines bei Anfang des Versuchs durch einen Hahn verschlossenen Rohres in Verbindung gesetzt werden. Öffnete man den Hahn, so dehnte sich die zusammengedrückte Luft auf ihr doppeltes Volumen aus, ohne beim Einströmen in den luftleeren Raum eine Arbeit zu leisten. Das Wasser des Kalorimeters erfuhr hierbei keine Temperaturveränderung, dagegen zeigte sich sofort eine Temperaturerniedrigung, wenn man die komprimierte Luft nicht in das luftleere Gefäß, sondern in die Atmosphäre ausströmen ließ, da in diesem Falle zur Überwindung des Gegendruckes der Atmosphäre eine Arbeitsleistung erforderlich war.

Die Erhöhung und Erniedrigung der Temperatur durch Kompression und Expansion der Gase gestattet eine merkwürdige Bestätigung des Prinzips der Äquivalenz der Arbeit und Wärme. Die spezifische Wärme der atmosphärischen Luft bei konstantem Druck ist nach den Versuchen von Regnault (§ 230) $c_1 = 0,2377$. Da sich aus der Theorie des Schalls, sowie aus den Versuchen von Cazin, das Verhältnis der spezifischen Wärmen $k = \frac{c_1}{c} = 1,41$ ergeben hat (vergl. § 230b), so folgt die spezifische Wärme bei konstantem Volumen $c = 0,1686$. Die Differenz $c_1 - c = 0,0691$ stellt die Wärmemenge vor, welche zur Überwindung des äußeren Druckes verbraucht wird, wenn man 1 kg atmosphärischer Luft bei gleichbleibendem Druck um 1° erwärmt. Die Größe dieser Arbeit ist aber leicht anzugeben. Zu diesem Zweck denke man sich 1 kg Luft in einem cylindrischen Gefäß A von 1 qdm Grundfläche enthalten. Da 1 kg Luft bei 0° und unter dem Druck einer Atmosphäre ein Volumen von 773,4 Liter einnimmt, so wird

die Höhe h der cylindrischen Luftsäule 7734 cm betragen. Den Druck der Atmosphäre denke man sich durch das Gewicht P eines beweglichen, das Gefäß verschließenden Stempels B ersetzt. Dieses Gewicht beträgt (§ 90)

Fig. 227.



$P = 103,3$ kg. Wird die Luft in A bei gleichbleibendem Druck um 1° C. erwärmt, so dehnt sich dieselbe im Verhältnis von $1:1 + \alpha$ aus, oder ihre Höhe beträgt nach der Erwärmung $h(1 + \alpha) = h + h\alpha$ Meter. Das Gewicht P wird also bei der Erwärmung um αh m gehoben, mithin wird durch $c_1 - c$ Wärmeinheiten eine Arbeit von $P\alpha h$ kgm oder durch $0,0691$ Wärmeinheiten eine Arbeit von $103,3 \cdot 0,003665 \cdot 77,34$ Kilogramm Metern geleistet. Demnach ergibt sich das Arbeitsäquivalent der Wärmeinheit $A = 423,7$ kgm, übereinstimmend mit dem Resultat, welches Joule bei seinen Versuchen über die Reibung von Gußeisen und Quecksilber erhalten hat (§ 241).

§ 243. Wärmeezeugung durch chemische Prozesse, Verbrennung. Jeder chemische Prozess, bei welchem eine Vereinigung zweier Grundstoffe oder Verbindungen stattfindet (§ 15), ist mit einer mehr oder minder beträchtlichen Wärmeentwicklung verbunden, so namentlich die Vereinigung der Grundstoffe mit Sauerstoff oder Oxydation, die Verbindung der Metalle mit Chlor, Jod, Brom, Schwefel, u. s. w., die Vereinigung der Säuren mit Alkalien zu Salzen u. s. w., die Vereinigung des gebrannten Kalks oder der Kalkerde mit Wasser zu Kalkerdehydrat, welche beim sogenannten Löschen des gebrannten Kalkes stattfindet, die Vereinigung der wasserfreien Schwefelsäure mit Wasser zu Schwefelsäurehydrat (§ 19). Auch bei der Vermischung des Schwefelsäurehydrats (der konzentrierten, englischen Schwefelsäure) mit Wasser findet noch eine beträchtliche Wärmeentwicklung statt. Insbesondere findet bei der schnellen Vereinigung vieler Grundstoffe mit Sauerstoff, oder auch mit Chlor, eine so starke Wärmeentwicklung statt, daß dieselben dadurch bis zum Glühen erhitzt werden. Solche lebhaftere Vereinigung zweier Stoffe wird mit dem Namen Verbrennung bezeichnet. In der Regel ist zur Einleitung des Verbrennungsprozesses eine erhöhte Entzündungstemperatur erforderlich. Ist derselbe einmal eingeleitet, so dient die durch die Verbindung erzeugte Wärme, um die Verbrennung zu unterhalten. Manche Stoffe entzünden sich schon bei gewöhnlicher Temperatur durch bloße Berührung, z. B. Antimonfeilspäne in Chlorgas, Phosphorwasserstoffgas in Berührung mit Sauerstoff oder atmosphärischer Luft (§ 22); Phosphor ist selbstentzündlich in fein verteiltem Zustand, anderenfalls genügt eine geringe Reibung zu seiner Entzündung. Chlor und Wasserstoff vereinigen sich unter Explosion durch Einwirkung des Sonnenlichts (§ 152). Ist der in atmosphärischer Luft oder Sauerstoff verbrennende Körper entweder schon bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig (Wasserstoffgas, Leuchtgas), oder geht derselbe bei erhöhter Temperatur in den gasförmigen Zustand über (Schwefel, Phosphor), oder werden endlich durch erhöhte Temperatur aus demselben brennbare Gase entwickelt (Öl, Wachs, Stearinsäure, Holz), so erfolgt die Verbrennung mit Flamme.

Um die bei der Verbrennung verschiedener Körper entwickelte Wärmemenge zu bestimmen, bediente sich Rumford eines Kalorimeters A (Fig. 223), welches eine Verbrennungskammer B enthält. Die erhitzten Verbrennungsgase entweichen durch das von dem kalten Wasser des Kalorimeters umgebene Schlangenrohr C und geben ihren Wärmeüberschuß an das Wasser ab. Der bei Verbrennung des Wasserstoffgases oder wasserstoffhaltiger Verbindungen erzeugte Wasserdampf verdichtet sich in den Windungen des Schlangenrohrs zu flüssigem Wasser.

Aus der verbrannten Gewichtsmenge der verschiedenen Substanzen und der entsprechenden Temperaturerhöhung des Kalorimeters kann dann die Verbrennungswärme gefunden werden. So hat sich ergeben, daß durch Verbrennung eines Kilogramms Wasserstoff 34601, durch Verbrennung eines kg Kohlenstoff 7295 Wärmeinheiten erzeugt werden.

Man pflegt die durch Verbrennung verschiedener Heizmaterialien (Holz-, Torf-, Braunkohlen- oder Steinkohlensorten) erzeugte Wärmemenge oder ihren Heizwert zu vergleichen, indem man ermittelt, wieviel kg Wasser durch Verbrennung einer bestimmten Gewichtsmenge in Dampf verwandelt werden. Nach obigem Resultat würde ein kg reinen Kohlenstoffs hinreichen, um mehr als 13 kg Wasser (§ 211) zu verdampfen. In der Praxis geben aber die besten Steinkohlensorten bei zweckmäßigster Feuerungsanlage nur einen Heizeffekt von 8–9 kg.

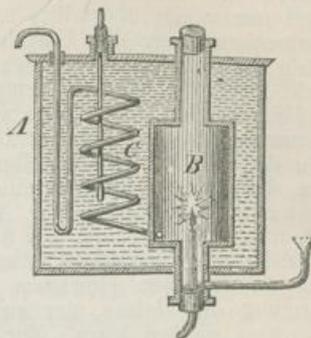
Der Grund der Wärmeentwicklung bei chemischen Verbindungsprozessen ist in der bei der Vereinigung der verwandten Stoffe durch chemische Anziehung gewonnenen Arbeit zu suchen, welche in Form von Wärme sichtbar wird. Umgekehrt wird zur Trennung der chemischen Bestandteile einer Verbindung eine gleiche Arbeits- oder Wärmemenge verbraucht. Explosive Verbindungen oder Gemenge, wie Schießpulver, Schießbaumwolle, Chlorstickstoff, welche bei ihrer Explosion gleichzeitig Arbeit und Wärme entwickeln, enthalten gleichsam einen Arbeitsvorrat in sich aufgespeichert, einer gespannten Feder vergleichbar. Über die Quelle des Arbeitsvorrats der vegetabilischen Brennstoffe s. § 244.

Nach Untersuchungen von Rossetti (1877) über die Temperaturen von Flammen hat man z. B. in der Flamme des Bunsenschen Brenners zu unterscheiden die äußere Hülle (1350°), aus einer dünnen Schicht von blauer Farbe bestehend, eine zweite, dickere, violette Schicht (1250°), dann eine feine Hülle von schöner, himmelblauer Farbe (nicht ganz 1200°) und den dunklen, konischen Kern (200–650°). Leuchtflammen zeigen geringere Temperatur.

§ 244. Animalische und vegetabilische Wärme. Der Körper des Menschen und der sogenannten warmblütigen Tiere, nämlich der Säugetiere und Vögel, welche Lungenatmung und einen vollständigen, doppelten Blutkreislauf besitzen, zeigt eine bestimmte, von Klima und Jahreszeiten unabhängige, erhöhte Temperatur. Die Blutwärme des Menschen beträgt etwa 37° C. Ungefähr dieselbe Temperatur besitzt der Körper der meisten Säugetiere, während die meisten Vögel eine noch größere Blutwärme (40–41° C.) besitzen. Die Quelle dieser Wärmeentwicklung ist der Atmungsprozess, indem gewisse kohlenstoff- und wasserstoffhaltige Blutbestandteile durch den in den Lungen von den Blutzellen aufgenommenen, atmosphärischen Sauerstoff eine Oxydation erfahren; die durch den Oxydationsprozess entstandene Kohlensäure wird in den Lungen wieder ausgeschieden und durch neuen Sauerstoff ersetzt. Zur gleichmäßigen Erhaltung der Blutwärme ist im Winter und in kälteren Zonen eine größere Menge von Nahrungsmitteln, namentlich von sogenannten Respirationsmitteln, d. i. fett- und stärkemehlhaltigen Nahrungsstoffen erforderlich, als in wärmerer Umgebung.

Eine Ausnahme erleidet die gleichmäßige Höhe der Bluttemperatur nur bei Krankheiten, so daß das Thermometer für den Arzt unentbehrlich ist; ferner beim sogenannten Winterschlaf mancher Säugetiere, einem Erstarrungszustand, bei welchem der Prozess der Atmung und des Blutkreislaufes in hohem Grade verlangsamt ist, und die Blutwärme deshalb auf die Temperatur der Umgebung herabsinkt. Beim Erwachen des Ziesel aus dem Winterschlaf ist in dem Zeit-

Fig. 223.



raum von $2\frac{1}{2}$ Stunden eine Temperatursteigerung von $8,4^{\circ}$ C. auf 32° C. beobachtet worden. Auch die kiemenatmenden Tiere und die tracheenatmenden Insekten besitzen eine gewisse Blutwärme. Indes ist dieselbe nicht bestimmt, sondern von der Temperatur der Umgebung abhängig, welche dieselbe in der Regel nur wenig übertrifft, teils weil die Respiration zu langsam, teils weil die Wärmeabgabe an die Umgebung wegen der geringen Körpermasse verhältnismäßig zu groß ist. Wo Insekten in großer Zahl zusammenleben, wie im Bienenstock, kann die erhöhte Temperatur, namentlich bei lebhafter Bewegung, sehr merklich werden, desgleichen während des lebhaften Flügelschlages bei den großen Dämmerungsfaltern aus der Gattung Sphinx u. s. w. — Der Vegetationsprozess der Pflanzen ist im allgemeinen nicht mit einer Oxydation verbunden, sondern die grünen Pflanzenteile vermögen im Gegenteil, unter Einfluss des Sonnenlichts, die in der Atmosphäre enthaltene Kohlensäure zu zerlegen und, unter Abscheidung von Sauerstoff, kohlenwasserstoffhaltige Verbindungen, wie Zellstoff, Stärkemehl, Zucker, Öle, und dergl. zu bilden. Auf diese Weise sammeln dieselben gleichsam einen Vorrat von Arbeit an, welche durch Verbrennung des Holzes, der aus demselben entstandenen Kohlen u. s. w. wiedergewonnen werden kann. Zur Blütezeit dagegen findet ebenfalls ein Oxydationsprozess statt, welcher bei größeren Blüten und Blütenständen, wie z. B. im Blütenkolben der Aroideen, im Blütenstand der Gattung Cycas, in der Blüte der Victoria regia, mit einer merklichen Temperaturerhöhung verbunden ist.

7. Anhang zur Wärmelehre.

Anwendung der Wärmelehre auf die hauptsächlichsten Vorgänge in der Atmosphäre der Erde. Grundbegriffe der Meteorologie.

§ 245. Klimatische Verschiedenheiten und Jahreszeiten. Die vorzüglichste Ursache der klimatischen Verschiedenheiten auf der Erdoberfläche ist die ungleiche Erwärmung ihrer verschiedenen Teile durch die Sonnenstrahlen. Je niedriger der Stand der Sonne über dem Horizont, unter desto schieferem Winkel treffen ihre Strahlen die Erdoberfläche, desto geringer ist also ihre erwärmende Wirkung (§ 366), die überdies in um so höherem Grade durch Absorption in der Erdatmosphäre geschwächt wird. Die im Sommer nördliche, im Winter südliche Deklination der Sonne (Abweichung vom Himmelsäquator [§ 354]), bedingt den Wechsel der Jahreszeiten, indem im Sommer sowohl die Mittagshöhe der Sonne, als die Dauer ihres Verweilens über dem Horizont oder die Tageslänge größer ist als im Winter. Die nördliche und südliche Halbkugel der Erde haben stets entgegengesetzte Jahreszeiten.

In der zwischen den Wendekreisen ($23\frac{1}{2}^{\circ}$ nördlich und südlich vom Äquator) eingeschlossenen, heißen Zone ist das Verhältnis insofern ein anderes, als an jedem Punkt derselben die Sonne im Laufe eines Jahres zweimal im Zenith (dem senkrecht über dem Scheitel des Beobachters befindlichen Punkte der Himmelskugel) steht und dieselbe bald nördlich, bald südlich vom Zenith kulminiert (den höchsten Punkt ihrer täglichen Bahn erreicht). Die Verschiedenheit der Jahreszeiten wird daher hier weniger durch den Wechsel der direkten, erwärmenden Wirkung der Sonne, als durch die von ihrem Stande abhängigen, regelmäßigen Luftströmungen und die damit verbundenen Feuchtigkeitsverhältnisse der Atmosphäre bedingt, wonach das Jahr im allgemeinen in eine trockene Jahreszeit und eine Regenzeit zerfällt (vergl. § 253). In den von den Polarkreisen eingeschlossenen, kalten Zonen erhebt sich die Sonne während eines mehr oder minder großen Teils des Winters (am Pol 6 Monate hindurch) nie über den Horizont, während sie in einem gleich großen Zeitraum im Sommer nie unter den Horizont hinabsinkt, aber immer nur eine geringe Mittagshöhe erreicht.

ther
eine
das
Tages
Temp
versch
Beob
temp
um s
Jahre
Um
Weis
einer
welch
Versc
besch
Paral
müfs
die
gleich
Verla
höher
d. h.
wärm
pole
mehr
Kält

thern
die M
Orte
Breit
N. B
graph

Rens
Booth
Jakut
Tobo
Kasar
Mosk
St. P
König
Berli
Brüss
Paris
Green
Dubli
Rom
New-
Pekin
Cincin
Funct

§ 246. Tägliche und jährliche Mitteltemperaturen. Isothermen. Indem man aus den an einem Ort der Erdoberfläche während eines Tages von Stunde zu Stunde beobachteten Temperaturen der Luft das arithmetische Mittel nimmt, erhält man die Mitteltemperatur dieses Tages. Auf gleiche Weise können aus den Tagesmitteln die mittleren Temperaturen der Monate, der Jahreszeiten und des ganzen Jahres für verschiedene Orte der Erdoberfläche abgeleitet werden. Erstreckt sich die Beobachtungsreihe über eine grössere Zahl von Jahren, so kann die Mitteltemperatur des ganzen Jahres, der einzelnen Monate und Jahreszeiten mit um so größerer Sicherheit und unabhängig von zufälligen, während eines Jahres vorkommenden Unregelmäßigkeiten der Witterung abgeleitet werden. Um die Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche auf anschauliche Weise darzustellen, verbindet man, nach A. v. Humboldt (1817), auf einer Erdkarte die Orte gleicher, mittlerer Jahrestemperatur durch Linien, welche Isothermen genannt werden. Fände auf der Erdoberfläche keinerlei Verschiedenheit in der Verteilung von Land und Wasser, der Bodenbeschaffenheit, Vegetation u. s. w. statt, so würden alle Punkte desselben Parallelkreises gleiche mittlere Jahrestemperatur besitzen; die Isothermen müßten also mit den Parallelkreisen zusammenfallen, am Äquator müßte die höchste Temperatur stattfinden, und die Pole der Erdaxe müßten gleichzeitig Kältepole sein. Dies ist jedoch keineswegs der Fall. Der Verlauf der Isothermen ist vielmehr ein sehr unregelmäßiger, und in noch höherem Grade ist dies der Fall bei den Isothermen und Isochimenen, d. h. bei den Linien, welche die Punkte gleicher Sommer- und Winterwärme verbinden, sowie bei den Monatsisothermen. Auch fallen die Kältepole nicht mit den astronomischen Polen zusammen, es finden sich vielmehr auf der nördlichen Halbkugel der Erde im Winter zwei getrennte Kältepole, den Kontinenten von Asien und Amerika entsprechend.

Auf den Karten Taf. I, II und III sind die Jahresisothermen und die Isothermen der Monate Januar und Juli dargestellt. Die folgende Tabelle enthält die Mitteltemperaturen des Jahres und die der Monate Januar und Juli für einige Orte der Erdoberfläche. Die Orte sind im allgemeinen nach der geographischen Breite geordnet, wovon nur bei einer Reihe von Orten, die zwischen 50 und 60° N. Br. liegen, abgewichen worden, indem dieselben aus einem im nächsten Paragraphen ersichtlichen Grunde nach der geogr. Länge geordnet sind.

Ort	Geogr. Br.	Geogr. Länge östl. von Greenw.	Mitteltemperatur des			Diff.
			Jahres	Januar	Juli	
Rensselaer Hafen (Grönl.)	78° 37'	— 70° 40'	— 19,5	— 34,4	3,5	37,9
Boothia Felix	69° 59'	— 92° 1'	— 15,7	— 33,7	5,1	38,8
Jakutsk	62° 2'	129° 14'	— 11,4	— 42,1	16,7	58,8
Tobolsk	56° 12'	68° 16'	0,2	— 19,7	20,0	39,7
Kasan	55° 47'	49° 7'	3,7	— 13,6	19,4	33,0
Moskau	55° 45'	37° 34'	4,2	— 11,6	19,5	31,1
St. Petersburg	59° 56'	30° 18'	3,7	— 9,1	17,0	26,1
Königsberg	54° 43'	20° 29'	6,2	— 4,2	17,0	21,2
Berlin	52° 30'	13° 24'	9,0	— 2,4	18,7	21,1
Brüssel	50° 51'	4° 22'	10,4	1,9	18,0	16,1
Paris	48° 50'	2° 20'	10,7	1,9	18,7	16,8
Greenwich	51° 29'	0° 0'	9,4	1,9	15,4	13,5
Dublin	53° 21'	— 6° 11'	9,5	3,6	16,0	12,4
Rom	41° 54'	12° 25'	15,9	7,2	24,4	17,2
New-York	40° 44'	— 74° 1'	10,9	— 1,0	23,7	24,7
Peking	39° 54'	116° 26'	12,6	— 3,7	27,5	31,2
Cincinnati	39° 6'	— 84° 29'	12,0	0,9	24,6	23,7
Funchal (Madeira)	32° 38'	— 16° 56'	19,7	17,5	22,5	5,0

Ort	Geogr. Br.	Geogr. Länge östl. von Greenw.	Mitteltemperatur des			Diff.
			Jahres	Januar	Juli	
Kalkutta	22° 38'	88° 20'	28,0	20,7	29,9	9,2
Pondichery	11° 56'	79° 52'	31,0	23,5	34,4	7,9
Lima	-12° 3'	- 77° 8'	23,0	25,6	20,2	5,4
St. Helena	-15° 55'	- 5° 43'	16,4	17,7	14,5	3,2
Rio Janeiro	-22° 54'	- 43° 16'	24,2	26,7	19,5	7,2
Kapstadt	-33° 55'	18° 23'	19,1	23,5	14,2	9,3
Falklandsinseln	-52°	- 61°	8,5	13,4	3,0	10,4

§ 247. Kontinentales und Seeklima. Zwei Punkte der Erdoberfläche, welche gleiche, mittlere Jahrestemperatur besitzen, können, wie aus obiger Tabelle hervorgeht, dennoch sehr verschiedene, klimatische Verhältnisse zeigen, indem die jährlichen Schwankungen der Temperatur von sehr verschiedener Größe sind. Namentlich spricht sich dies in dem Gegensatz des kontinentalen und Seeklimas aus. Das Festland erwärmt sich durch die Sonnenstrahlen viel leichter, als die Oberfläche des Meeres, strahlt aber auch die erhaltene Wärme schneller wieder nach dem Weltraum aus. Daher sind die täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen im allgemeinen um so größer, je weiter man sich von der Meeresküste entfernt. Es geht dies aus der vorstehenden Tabelle deutlich hervor, wenn man z. B. die Ortschaften vergleicht, welche unter annähernd gleichen Parallelkreisen, zwischen 50 und 60° N. Br., aber unter verschiedenen Längengraden liegen. Während England ein ausgeprägtes Seeklima besitzt, wird die Differenz der Temperaturen des wärmsten und kältesten Monats um so größer, je weiter man ostwärts in das Innere des großen asiatisch-europäischen Kontinents eindringt. Im Sommer besitzen die Kontinente, im Winter die Meere die relativ höchste Temperatur.

Einen beträchtlichen Einfluss auf die Ausgleichung der klimatischen Verschiedenheiten der Küstenländer üben die Meeresströmungen aus. So verdanken die Nordwestküsten Europas ihr mildes Winterklima großenteils dem Einfluss des Golfstromes, welcher ihnen die im mexikanischen Golf erwärmten Wassermassen zuführt. — Als Ursache dieser Meeresströmungen sind zunächst herrschende Winde zu bezeichnen, welche die sogenannten Driftströmungen, die freilich nicht tief gehen, hervorrufen, dann die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung. In den tropischen Meeren beträgt der jährliche Niederschlag nach Humboldt etwa zwei Meter, die Verdunstung fünf Meter, so daß daselbst im Jahre im ganzen ein Verlust von ungefähr 900 Kub.-Meilen Wasser, also täglich von 2,5 Kub.-Meilen eintritt. In den tropischen Meeren ferner vermehrt sich der Salzgehalt der oberen Schichten durch die Verdunstung, in den arktischen Meeren durch die Abscheidung salzfreier Eismassen, in beiden Fällen sinkt darum das schwerer gewordene Wasser und bringt so zugleich die dem organischen Leben in der Meerestiefe unentbehrliche Luft im aufgelösten Zustande nach unten. — Der Golfstrom führt beständig so viel Wärme vom tropischen Amerika nach Osten, daß man damit einen Eisenstrom von der Breite und Tiefe des Mississippi in beständigem Fluß erhalten könnte.

§ 248. Tägliche Temperaturperiode. Während bei Tage die Oberfläche der Erde von den Sonnenstrahlen erwärmt wird und ihre höhere Temperatur den auf ihr ruhenden Luftschichten mitteilt, kühlt sich dieselbe bei Nacht durch Strahlung gegen den Weltraum ab. Sowohl die Einstrahlung, als die Ausstrahlung und infolgedessen die tägliche Temperaturschwankung, ist bei heiterem Himmel größer als bei bewölktem Himmel. Das tägliche Maximum der Temperatur pflegt in den ersten Nachmittags-

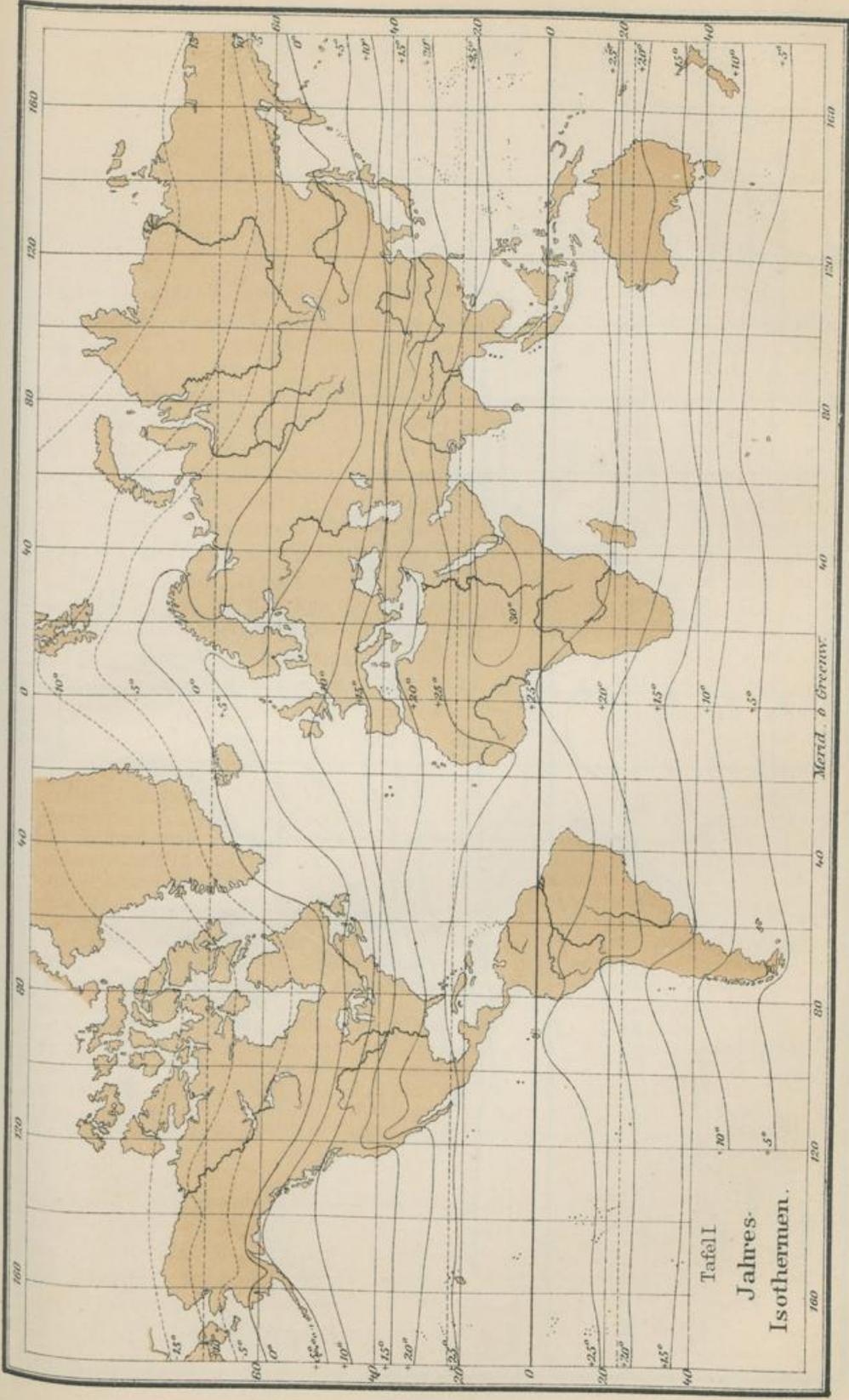


- Diff.
- 9,2
- 7,9
- 5,4
- 3,2
- 7,2
- 9,3
- 10,4

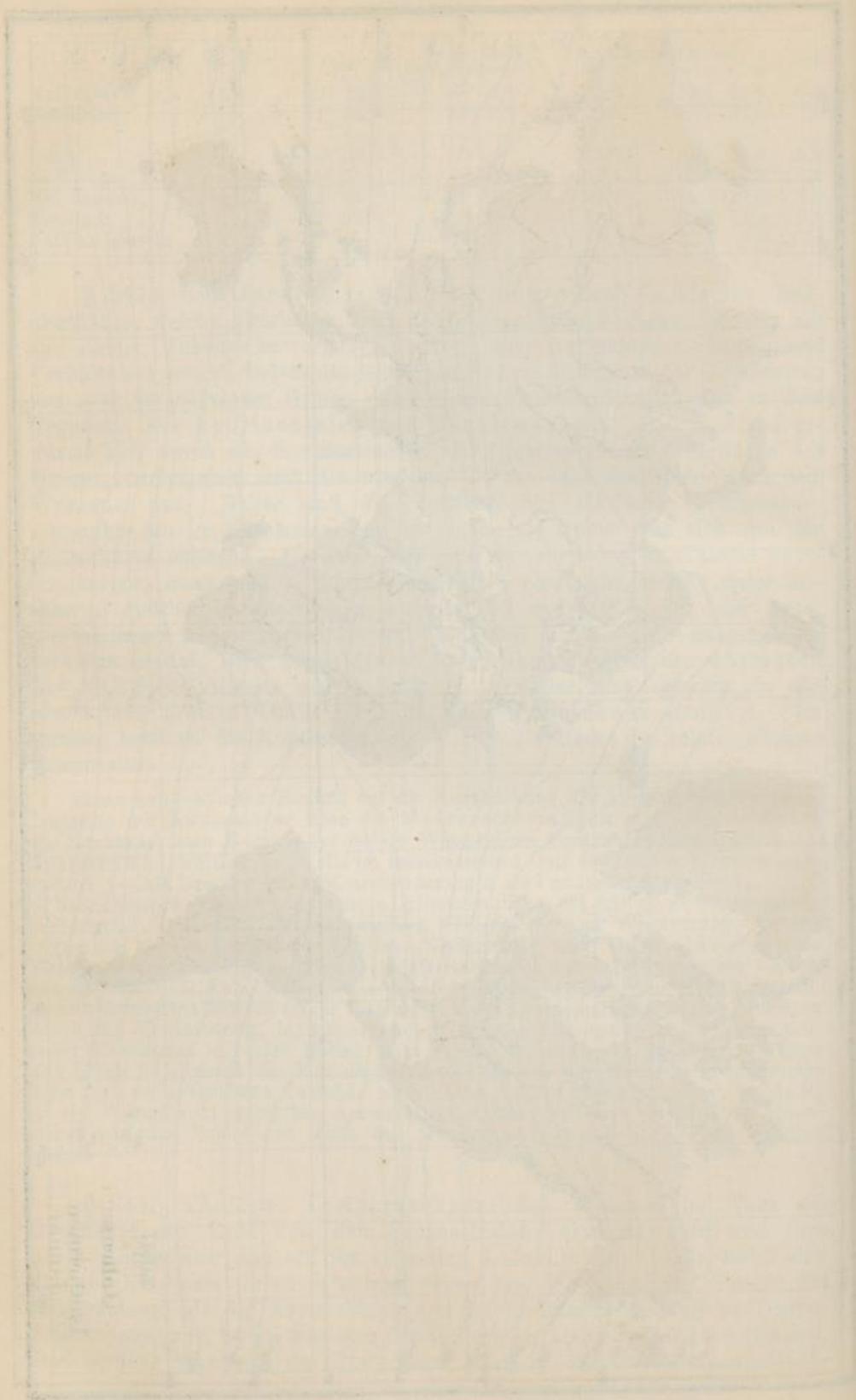
Erd-
 , wie
 ische
 ratur
 dem
 l er-
 e des
 dem
 atur-
 der
 deut-
 an-
 unter
 ägtes
 sten
 das
 Im
 chste

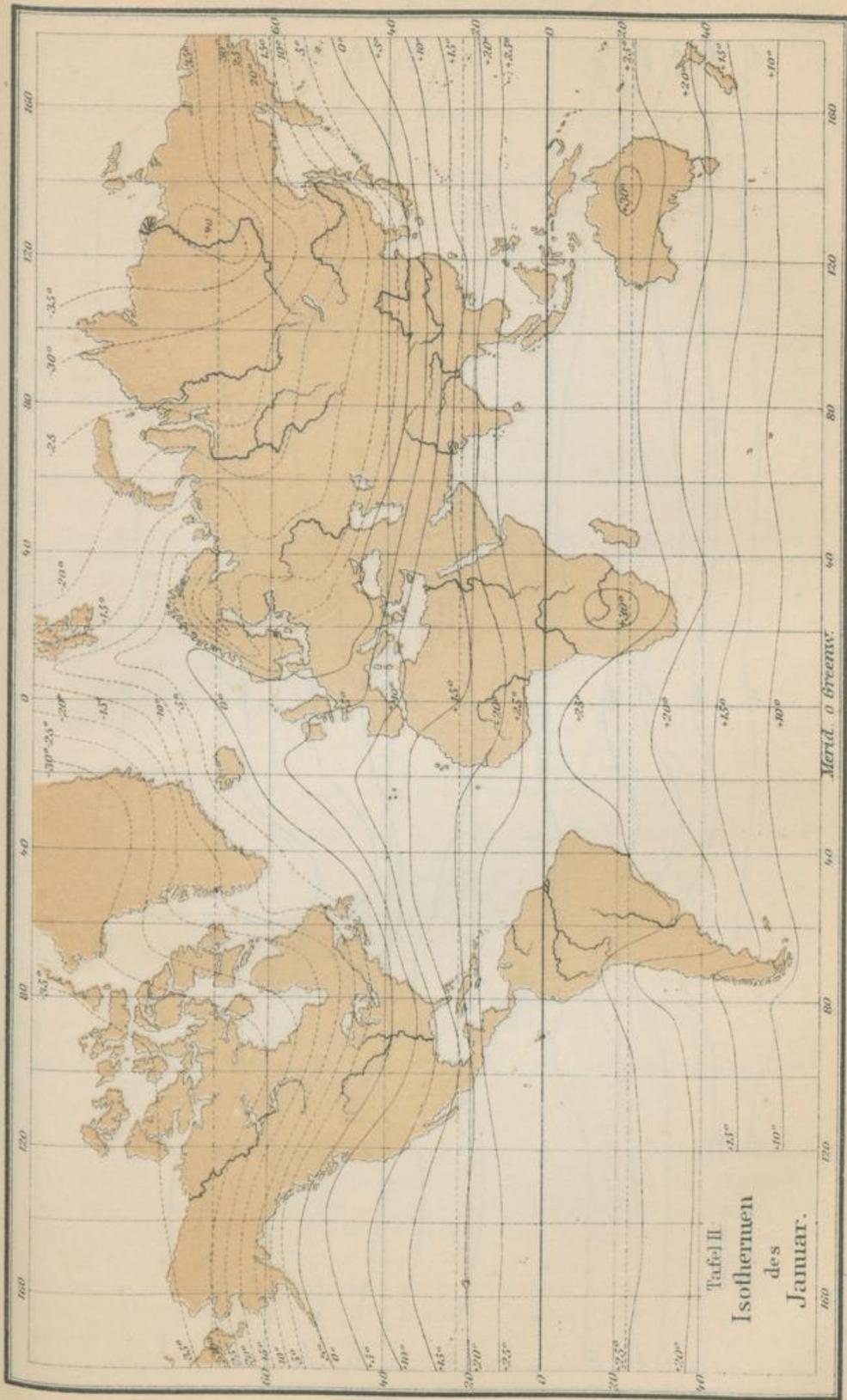
schie-
 anken
 s des
 assen
 Vnde
 rehen,
 n den
 zwei
 erlust
 ntritt.
 chten
 salz-
 Wasser
 tbehr-
 ändig
 Eisen-
 halten

e die
 ihre
 t sich
 l die
 empe-
 mmel.
 ttags-



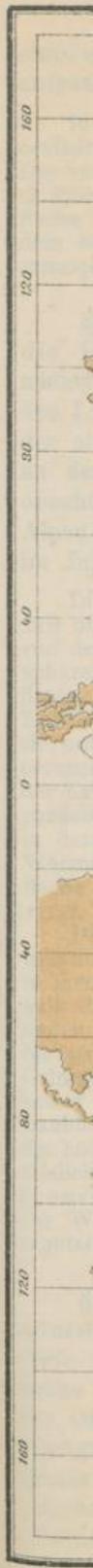
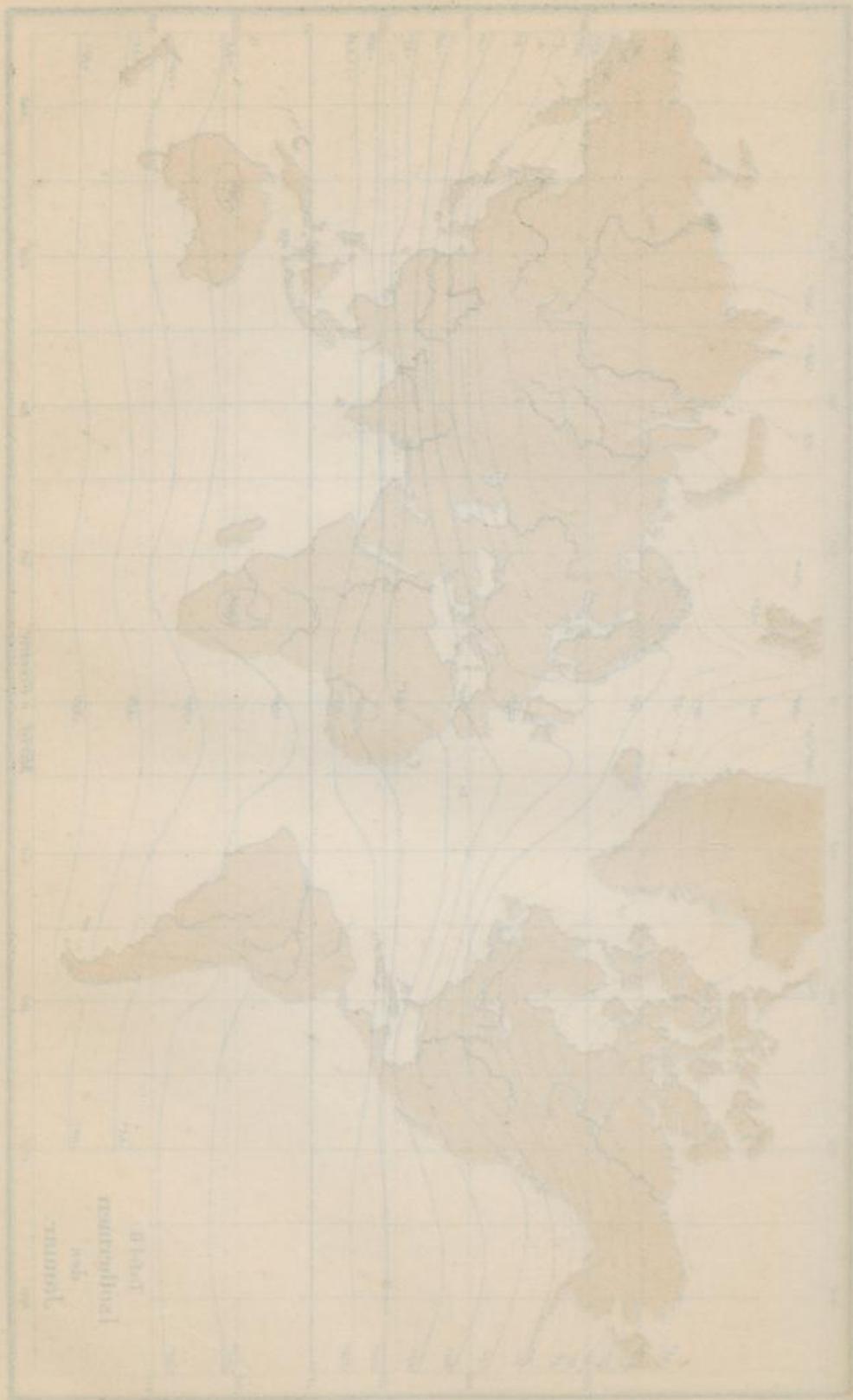
Tafel I
 Jahres-
 Isothermen.

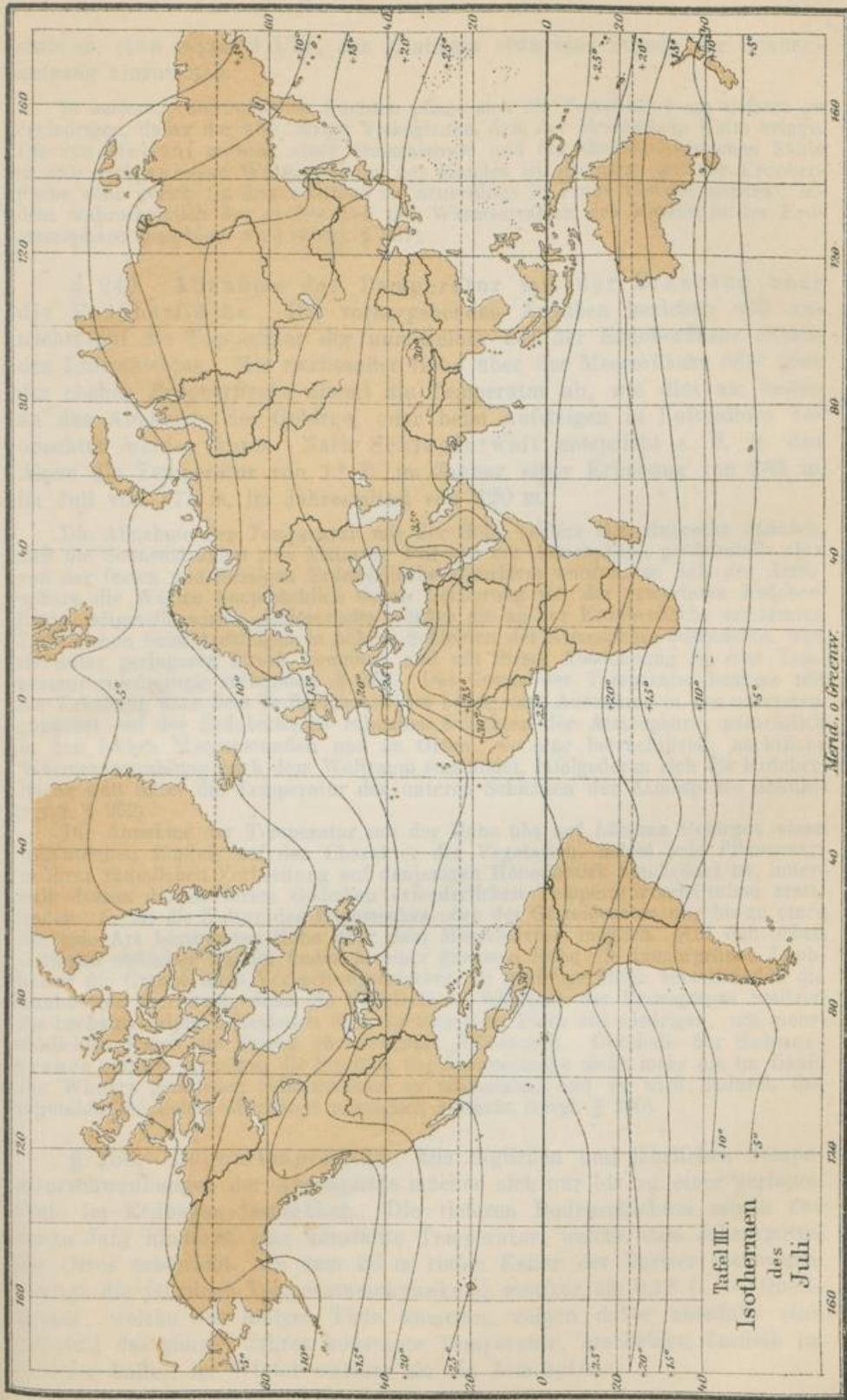


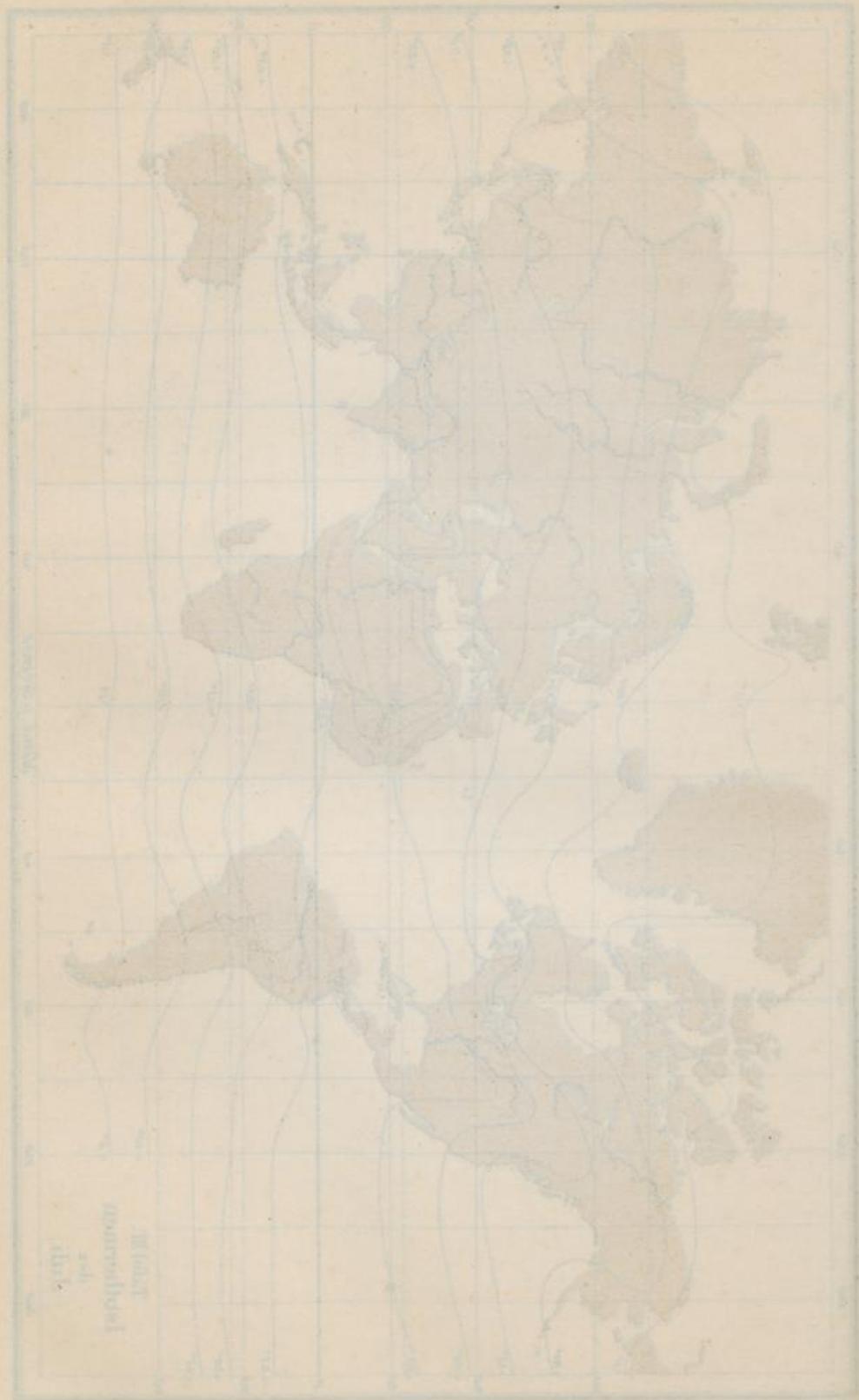


Tafel II
Isothermen
des
Januar.

Merid. 0 Greenw.







stunden,
aufgang

In k
erniedrig
Die von
(§ 235) m
fläche se
dem wah
atmosphä

§
die Er
nächst a
den Luf
der ebe
an den
obachte
Alpen ö
im Juli

Die
dafs die
von der
sphäre o
fläche m
Luftteile
sie unter
perature
der Erbe
zunächst
in den
Wärmea
fläche w
(vergl. §

Die
wesentlic
in ihrer
halb des
finden.
für jede
Gebirgen
hölzer d
Laubböl
die höch
ähnliche
grenze
des Win
vegetabi

§
ratursch
Tiefe in
ganze J
des Ort
beträgt
wässer,
während
Sommer

stunden, etwa gegen 2 Uhr, das Minimum etwa eine Stunde vor Sonnenaufgang einzutreten.

In heiteren, sternhellen Nächten pflegt sich die Temperatur am tiefsten zu erniedrigen, daher der alte, irrige Volksglaube, daß der Mondschein Kälte bringe. Die von Melloni mittelst einer Steinsalzlinsse und der thermoelektrischen Säule (§ 235) nachgewiesene Wärmewirkung des Mondes ist allerdings auf der Erdoberfläche sehr gering (ja ihre Existenz ist neuerdings in Frage gestellt worden), indem wahrscheinlich der größte Teil der Wärmestrahlen des Mondes in der Erdatmosphäre absorbiert wird (vergl. § 237).

§ 249. Abnahme der Temperatur mit der Erhebung über die Erdoberfläche. Die vorhergehenden Angaben beziehen sich zunächst auf die Temperatur der unmittelbar auf der Erdoberfläche ruhenden Luftschichten. Mit wachsender Höhe über der Meeresfläche oder über der ebenen Erdoberfläche nimmt die Temperatur ab, wie dies am besten an den Abhängen der Gebirge, oder beim Aufsteigen in Luftballons beobachtet werden kann. Nach Schlagintweit entspricht z. B. in den Alpen die Temperatur von 1° R. im Januar einer Erhebung von 285 m, im Juli von 175 m, im Jahresmittel von 220 m.

Die Abnahme der Temperatur mit der Höhe erklärt sich einerseits dadurch, daß die Sonnenstrahlen zum kleinsten Teil von der Atmosphäre, größtenteils aber von der festen und flüssigen Erdoberfläche absorbiert werden, so daß der Atmosphäre die Wärme hauptsächlich durch Berührung mit der erwärmten Erdoberfläche mitgeteilt wird. Andererseits werden die an der Erdoberfläche erwärmten Luftteilchen beim Aufsteigen in höhere Schichten der Atmosphäre ausgedehnt, weil sie unter geringeren Druck kommen, und mit dieser Ausdehnung ist eine Temperaturerniedrigung verbunden (§ 242). Das Gesetz der Temperaturabnahme mit der Erhebung über dem Erdboden erleidet häufig eine Ausnahme in den untersten, zunächst auf der Erdoberfläche ruhenden Schichten der Atmosphäre, namentlich in den frühen Morgenstunden und an Orten, wo eine beträchtliche, nächtliche Wärmeausstrahlung nach dem Weltraum stattfindet, infolgedessen sich die Erdoberfläche weit unter die Temperatur der unteren Schichten der Atmosphäre abkühlt (vergl. § 262).

Die Abnahme der Temperatur mit der Höhe übt auf höheren Gebirgen einen wesentlichen Einfluß auf den Charakter der Vegetation, indem jede Pflanzenart in ihrer räumlichen Verbreitung auf denjenigen Höhenbezirk beschränkt ist, innerhalb dessen die zu ihrem Gedeihen erforderlichen Temperaturverhältnisse stattfinden. So ist die Kultur des Weinstockes oder der Getreidearten nur bis zu einer für jede Art bestimmten Höhe über dem Meeresniveau möglich. Auf den hohen Gebirgen südlicher Länder finden in einer gewissen Höhe die immergrünen Laubbölzer die Grenze ihres Verbreitungsbezirkes, in größerer Höhe verschwinden die Laubbölzer überhaupt, dann die Nadelbölzer. Oberhalb der Baumgrenze besitzen die höchsten, alpinen Regionen ihre eigentümliche Flora aus niedrigen, mit moosähnlichem Rasen die Felsen überziehenden Pflänzchen. Oberhalb der Schneegrenze endlich vermögen die Strahlen der Sommersonne nicht mehr die im Laufe des Winters gefallenen Schneemassen zu schmelzen, und es wird dadurch das vegetabilische Leben überhaupt unmöglich gemacht (vergl. § 260).

§ 250. Bodentemperatur. Die täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen der Atmosphäre machen sich nur bis zu einer geringen Tiefe im Erdboden bemerkbar. Die tieferen Bodenschichten zeigen das ganze Jahr hindurch eine konstante Temperatur, welche dem Jahresmittel des Ortes entspricht. In dem 26 m tiefen Keller der Pariser Sternwarte beträgt die jährliche Temperaturschwankung weniger als $0,1^{\circ}$ C. — Quellwässer, welche aus einiger Tiefe kommen, zeigen daher ebenfalls eine während des ganzen Jahres konstante Temperatur, erscheinen deshalb im Sommer kälter, im Winter wärmer als die Atmosphäre.

Die konstante Bodentemperatur erklärt sich aus der geringen Wärmeleitfähigkeit der Erdschichten. Das jährliche Maximum und Minimum der Temperatur tritt um so später ein, und beide sind um so weniger verschieden, je tiefer man in die Erde eindringt, indem sich die Temperaturschwankungen der Atmosphäre gleichsam als sehr langsam fortschreitende und dabei sich mehr und mehr verflachende Wellen ins Innere des Erdbodens fortpflanzen. (Über die Temperatur der tieferen Erdschichten vergl. § 240.) — Aus Tiefen-Temperaturen im Atlantischen Ocean machte Thomson den Schluss, daß die Sonnenwärme sich nur bis zu einer Tiefe von etwa 40 m geltend macht und die Erwärmung durch den Golfstrom etwa bis zur Tiefe von 1200 m; von da an bis zur Tiefe von 3000 m findet für jede 400 m Tiefe eine Temperaturabnahme von 1° C. statt, von 3000 m bis 4000 m Tiefe fällt die Temperatur von $2,6^{\circ}$ auf 2° und endlich bis zur Tiefe von 6000 m auf $1,9^{\circ}$ C. In großen Tiefen hat der Meeresboden eine sich gleichbleibende Temperatur von 0° bis 2° C. Die niedrigste Bodentemperatur in Meerestiefen, welche bei einer Expedition von 1869 gefunden wurde, war $-1,3^{\circ}$ C.

§ 251. Luftströmungen der Atmosphäre. In einem ungleich erwärmten Luftraum, z. B. in einem durch einen warmen Ofen geheizten Zimmer, steigen an den wärmeren Stellen die Luftteilchen vermöge ihrer geringeren Dichtigkeit (§ 202) auf, während an den von der Wärmequelle entfernteren Stellen die kalten Luftteile herabsinken. Längs des Bodens findet daher eine Strömung von den kälteren zu den wärmeren Stellen, im oberen Teil in entgegengesetzter Richtung statt. Kommunizieren zwei ungleich erwärmte Zimmer durch einen schmalen Thürspalt, so wird eine Lichtflamme im oberen Teil des Spaltes nach dem kälteren, in der Nähe des Bodens dagegen nach dem wärmeren Zimmer hingeweht. Der Luftzug im Feuerherd unserer Öfen und Kamine wird durch das Aufsteigen der im Schornstein enthaltenen, warmen Luftsäule erzeugt. Ähnliche Strömungen werden in der Atmosphäre der Erde durch ungleiche Erwärmung der verschiedenen Teile der Erdoberfläche hervorgerufen. Diese Strömungen sind zum Teil lokaler Natur, wie die sogenannten Land- und Seewinde, welche sich in Küstengegenden bemerkbar machen. Da bei Tage das Festland sich stärker erwärmt, bei Nacht aber sich stärker abkühlt als die Oberfläche des Meeres (vergl. § 247), so strömt in den wärmsten Tagesstunden die kühle Seeluft längs der Erdoberfläche vom Meer zum Lande und wird als Seebrise bemerkbar, während bei Nacht der Landwind in entgegengesetzter Richtung weht. Beim Wechsel beider Luftströmungen tritt in der Regel einige Stunden lang Windstille ein.

In viel größerem Maßstabe werden die Bewegungen der Atmosphäre durch die ungleiche Erwärmung der Äquatorial- und Polarregionen der Erde beeinflusst. In der Äquatorialzone steigen die erwärmten Luftteile auf, während in den höheren Breitenzonen ein Niedersinken der kalten Luft stattfindet. Es entstehen infolgedessen auf jeder Erdhalbkugel zwei große Hauptströmungen, von denen die eine, welche die kalte Luft längs der Erdoberfläche vom Pol zum Äquator führt, der Polarstrom, die andere in den höheren Schichten der Atmosphäre vom Äquator zum Pol gerichtete, der Äquatorialstrom genannt wird. Gelangt der letztere aus den weiten Äquatorialgegenden in die wegen der Kugelgestalt der Erde räumlich sich mehr und mehr verengenden Regionen höherer Breite, so findet er bald nicht mehr Raum genug, um in gleichmäßigem Flusse zu den Polen zu gelangen, vielmehr senkt er sich, und zwar wie die Beobachtungen gezeigt haben, zumeist in der Breite von ungefähr 30° , herab und fließt alsdann zum Äquator zurück (vergl. Fig. 229). In den höheren Breitengraden ist, besonders in den oberen Schichten, die Atmosphäre meist

in der Richtung nach den Polen hin in Bewegung, während die Luftströmungen der unteren Schichten vorzugsweise durch die Temperaturunterschiede über Kontinent und Meer und die dadurch hervorgerufenen Differenzen im Luftdruck bedingt werden (§ 254).

§ 252. Einfluss der Axendrehung der Erde. Passatwinde. Fände auf der Erdoberfläche keinerlei Unregelmäßigkeit in der Verteilung von Land und Meer und in der Erhebung von Gebirgsketten statt, und würden die beiden großen Hauptströmungen der Atmosphäre nicht durch die Axendrehung der Erde beeinflusst, so müßten dieselben genau von N. nach S., beziehungsweise von S. nach N. gerichtet sein. Die tägliche Axendrehung der Erde in der Richtung von W. nach O. bewirkt jedoch eine Ablenkung der Strömungen von ihrer ursprünglichen Richtung. Da nämlich die Luftteilchen am Äquator an der Axendrehung der Erde teilnehmen, also mit einer Geschwindigkeit von etwa 460 m in der Sekunde von W. nach O. bewegt werden, so werden dieselben, wenn sie als Äquatorialstrom nach höheren Breitengraden gelangen, wo die Umdrehungsgeschwindigkeit eine geringere ist, der Drehung der Erde in der Richtung von W. nach O. voraneilen. Es wird also auf der nördlichen Halbkugel der Erde der ursprünglich südliche Äquatorialstrom eine Ablenkung nach SW. erfahren. Umgekehrt werden die Teilchen des Polarstromes, welche von Punkten geringerer zu Punkten größerer Umdrehungsgeschwindigkeit gelangen, gegen die Drehung der Erde zurückbleiben oder sich relativ gegen die Erdoberfläche von O. nach W. zu bewegen scheinen. Der längs der Erdoberfläche wehende, ursprünglich von N. nach S. gerichtete Polarstrom wird also eine Ablenkung nach NO. erleiden. — Auf ähnliche Weise werden die beiden Strömungen auf der südlichen Halbkugel der Erde durch die Axendrehung beeinflusst, so daß dieselben beziehungsweise eine nordwestliche und südöstliche Richtung erhalten.

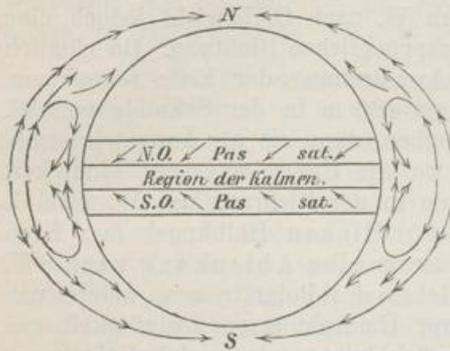
In größter Regelmäßigkeit zeigen sich diese Luftströmungen in den nördlich und südlich vom Äquator gelegenen Regionen der großen Ozeane, wo längs der Meeresoberfläche die Polarströme das ganze Jahr hindurch wehen und die den Seefahrern wohlbekanntesten Passatwinde bilden, deren Entstehung auf obige Weise zuerst von Hadley (1735) richtig erklärt wurde. Nördlich vom Äquator weht, etwa zwischen dem 10. und 30. Grad N. Breite, beständig der NO.-Passat, südlich vom Äquator, unter den entsprechenden Breitengraden, der SO.-Passat, während in den höheren Regionen der Atmosphäre der auf der nördlichen Hemisphäre südwestlich, auf der südlichen Hemisphäre nordwestlich gerichtete Gegenpassat die am Äquator aufgestiegene erwärmte Luft nach den Polen führt!

Daß diese entgegengesetzte Strömung in den oberen Schichten der Atmosphäre wirklich stattfindet, kann man einestheils an den Gipfeln hoher Berge, z. B. des Pikes von Teneriffa, beobachten, welche sich bis in die Region des Gegenpassats erheben, andererseits wird es durch mehrfache Beobachtungen der Thatsache bestätigt, daß die bis in große Höhe emporgeschleuderte Asche vulkanischer Ausbrüche in einer dem unten wehenden Passat gerade entgegengesetzten Richtung mehr als 100 geographische Meilen weit fortgeführt wurde. Dasselbe geht aus gewissen Meteorstaubfällen hervor. Die auf dem Mittelmeer segelnden Schiffe werden nicht selten, während der sogenannte Scirocco weht, mit einem rötlichen Staub bedeckt. Noch häufiger zeigt sich derselbe an der afrikanischen Westküste. Bei mikroskopischer Untersuchung desselben fand Ehrenberg, daß dieser Staub zahlreiche Überreste von mikroskopischen Organismen enthält, welche in den tropischen Gegenden Südamerikas leben, also nur durch eine starke südwestliche Luftströmung von ihrem Ursprungsort nach den afrikanischen Küsten geführt und dort niedergefallen sein können.

Der vulkanische Ausbruch auf der Insel Krakatau vom 26.—31. Aug. 1883 hat durch die emporgetriebenen, vergasteten und zerstückten, mit Verbrennungsprodukten vermischten Wassermassen optische Störungen in der Erdatmosphäre veranlaßt, welche sich unter anderem in auffallenden Dämmerungserscheinungen zeigten und länger als drei Jahre wahrgenommen wurden.

§ 253. Kalmengürtel; jährliche Verschiebung der Passatgrenzen; Jahreszeiten der Tropenländer. Die beiden Passatregionen (siehe Fig. 229) sind durch einen äquatorialen Gürtel der Windstillen oder Kalmen getrennt, welcher den Stellen der größten Erwärmung entspricht, und in welchem vorzugsweise das Aufsteigen der erwärmten Luft in vertikaler Richtung stattfindet.

Fig. 229.



Während in der Passatregion, infolge des Zuströmens aus kälteren Zonen kommender und daher wenig Wasserdampf enthaltender Luft, fortwährend trockenes, heiteres Wetter herrscht, ist die Kalmengürtelzone zugleich die Zone fortwährender Regengüsse und Gewitter. Die an der Oberfläche der tropischen Gewässer mit Feuchtigkeit gesättigte Luft wird beim Aufsteigen durch die damit verbundene Ausdehnung abgekühlt (§ 242). Dabei wird der größte Teil des in derselben enthaltenen Wasserdampfes in flüssiger Form niedergeschlagen und stürzt in Form heftiger Regengüsse, die mit Gewittererscheinungen (§ 288) verbunden zu sein pflegen, nieder. Mit dem nördlichen und südlichen Stand der Sonne verschieben sich im Lauf der Jahreszeiten auch die Grenzen des Kalmengürtels und der Passatregionen, so daß dieselben zur Zeit unseres Sommers mehr nach Norden vorrücken, zur Zeit unseres Winters nach Süden zurückweichen. Aus dieser Verschiebung entspringt der Wechsel der trockenen Jahreszeit und der Regenzeit tropischer Regionen, indem jeder Ort der Tropengegenden seine trockene Jahreszeit hat, solange er sich in der Passatzone, seine Regenzeit hingegen, wenn er sich in der Region der Kalmen befindet (vergl. §§ 254, 256). Die Größe der jährlichen Verschiebung der Passatgrenzen wird durch die Verteilung der Meere und Kontinente beeinflusst und ist deshalb unter verschiedenen Längengraden verschieden. Manche Orte (Cayenne) bleiben fast das ganze Jahr hindurch in der Region der Windstillen, haben also immer Regen, während andere (Sahara) sehr selten Regen haben.

Am stärksten ist die jährliche Verschiebung der Passatgrenzen im indischen Ocean, indem zur Zeit des Sommers, infolge der starken Erwärmung des großen, nördlich vom Äquator gelegenen, asiatischen Kontinents der SO.-Passat der südlichen Halbkugel weit über den Äquator hinaus nach der nördlichen Halbkugel übergreift, wobei seine Richtung in eine südwestliche übergeht. Umgekehrt greift während unseres Winters der Nordostpassat auf die südliche Halbkugel über und ändert daher seine Richtung in eine nordwestliche. Es wehen daher in den indischen Meeren, nach den Jahreszeiten regelmäßig abwechselnd, nördlich vom Äquator nordöstliche und südwestliche, südlich vom Äquator südöstliche und nordwestliche Winde, welche von dem Seefahrer Monsune genannt werden.

§ 254. Region der veränderlichen Winde; Isobaren; Gradienten. Diese völlige Regelmäßigkeit der Luftströmungen und der da-

mit verbundenen Witterungserscheinungen findet nur innerhalb der zu beiden Seiten des Äquators, bis etwa zum 30ten Breitengrade gelegenen Zone statt (§ 251). Jenseits der äußeren Grenze der Passatregion beginnt die Region der veränderlichen Winde. Jenseits der Wendekreise beginnt nämlich der obere Gegenpassat sich allmählich herabzusinken, so daß unter höheren Breiten der Polar- und Äquatorialstrom nicht mehr über, sondern neben einander fließen und einander zeitweise gegenseitig verdrängen. So unregelmäßig sich auch dieser Wechsel und die damit verbundenen Witterungserscheinungen auf den ersten Blick darstellen, so lassen sich doch ebenfalls bestimmte Gesetze darin erkennen. Die warmen Winde kommen aus Gegenden, wo eine höhere Temperatur herrscht: in Westeuropa aus SW., d. h. aus den Meeresgebieten, wo durch den Golfstrom die Wärme sich erhöht; in Rußland und Sibirien aus S., weil hier die Ländermassen von der Sonne am meisten durchwärmt sind; auf der Ostseite aber von Asien, wo die Isothermen Ausbiegungen nach SO. zeigen, die Wärme also nach SO. am meisten zunimmt, aus einer Richtung zwischen SO. und S. Die kalten Winde dagegen kommen fast genau entgegengesetzt, in Westeuropa aus ONO., in Rußland aus NO., in Westsibirien aus N., in Ostasien aus NW., sämtlich Richtungen, welche vom nordasiatischen Kältepol (§ 246) herkommen. Ähnlich sind die Beziehungen der kälteren Winde in Nordamerika zum dortigen Kältepol.

Durch Beobachtungen hat sich ferner ergeben, daß auf der Westseite der Kontinente, innerhalb der gemäßigten Zone, im Winter die nordöstlichen Winde den höchsten Luftdruck, die südwestlichen den niedrigsten mit sich führen, während auf der Ostseite der Festländer westliche bis nordwestliche Winde den Barometerstand erhöhen, südliche bis südöstliche denselben erniedrigen. Um nun den Zusammenhang zwischen Windrichtung und Luftdruck genauer festzustellen, verbindet man Orte, welche dieselbe auf den Meeresspiegel zurückgeführte Barometerhöhe zeigen, durch Linien, welche Isobaren heißen. Zwischen zwei Punkten derselben Isobare findet dann ein Unterschied im Luftdruck nicht statt; dagegen liegen in normaler Richtung zu einer jeden Isobare immer diejenigen Punkte, in denen zunächst die größte Barometerdifferenz hervortritt. Die Richtung von einem Punkte mit höherem nach dem zunächst benachbarten mit niederem Luftdruck bezeichnet man als einen barometrischen Gradienten. Demnach ist in jedem Punkt der Gradient normal zu der zugehörigen Isobare. Die Größe des Gradienten wird ausgedrückt durch die Anzahl von Millimetern, um welche der Luftdruck bei einer in der Richtung des Gradienten gemessenen Entfernung von einer geographischen Meile abnimmt.

Sind die Isobaren konzentrische Kreise, so fällt die Richtung der Gradienten mit der der Radien zusammen und zwar nach außen oder nach innen, je nachdem der gemeinschaftliche Mittelpunkt der Isobaren ein barometrisches Maximum oder Minimum ist. Sind die Isobaren parallele gerade Linien, so sind auch die Gradienten einander parallel. Je dichter die Isobaren an einander rücken, um so stärker werden die Gradienten.

Bezieht man die Richtung der Windpfeile auf Tafel IVa und b auf den Lauf der Isobaren, so bestätigt sich das 1857 von Buys-Ballot gefundene Gesetz, daß die Richtung des Windes vorzugsweise von der verschiedenen Verteilung des Luftdruckes abhängt. Diesem

Gesetz entsprechend zeigt sich (auf der Nordhälfte der Erde), daß, wenn man dem Winde den Rücken zuwendet, das Minimum des Luftdruckes nach links, ein wenig nach vornhin liegt, daß also der Wind in einer

Fig. 230.

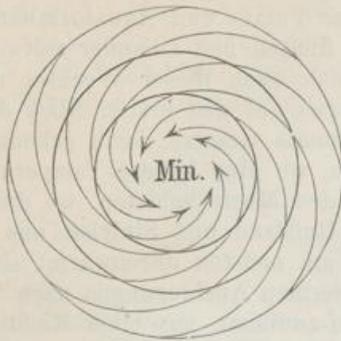
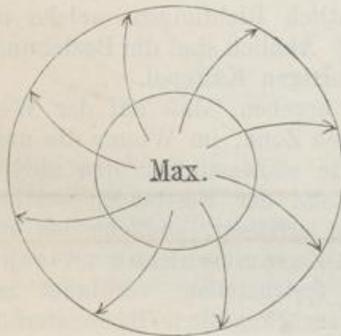


Fig. 231.



Richtung weht, welche zwischen Gradient und Isobare liegt, der letzteren etwas zugeneigt (Fig. 230). Die Bewegung des Windes erfolgt demnach im ganzen in einem spiralförmigen Wirbel, der die Luft in einem Sinne, entgegen dem Drehungssinne der Zeiger einer Uhr, also „der Sonne entgegen“, dem barometrischen Minimum, als dem Centrum dieser Bewegung, zuführt. Umgekehrt erfolgt die Bewegung der Luft aus einem barometrischen Maximum hinaus (Fig. 231) mit einer Abbiegung nach rechts, in einer spiralförmigen Bahn und in einer Richtung, welche der Drehung der Uhrzeiger entspricht, d. h. „mit der Sonne“. Entgegengesetzte Richtung zeigen die Windwirbel auf der Südhalbkugel der Erde.

Zur Erklärung dieser Abweichung der Windrichtung von der der Gradienten dient auch hier (vergl. § 252) die Einwirkung der Axenumdrehung der Erde, durch welche auf der nördlichen Erdhälfte eine Ablenkung nach rechts, auf der südlichen nach links hin bedingt wird. Diese

ablenkende Wirkung ist proportional dem Sinus der geographischen Breite; sie beträgt in der Breite 30° für die Stunde $7^\circ 30'$. Von geringerem Einfluß auf die Ablenkung ist die Centrifugalkraft der bewegten Luft.

Man ersieht hieraus, inwiefern das Barometer als Wetteranzeiger dienen kann. Ein schnelles, starkes Sinken des Barometers verkündet in der Regel stürmisches Wetter. Ein auffallend hoher Barometerstand kann dagegen durch gegenseitiges Anstauen des Äquatorial- und des Polarstromes erzeugt werden, welches wegen der Vermischung der warmen und kalten Luft häufig mit dichtem Nebel und wässerigen Niederschlägen verbunden ist.

Im allgemeinen sind auf der nördlichen Halbkugel, wie aus dem obigen hervorgeht, die SW.- und NO.-Winde vorherrschend. Lokalverhältnisse können jedoch Abweichungen bedingen. So erzeugt die starke Erwärmung des asiatischen Continents und die dadurch bewirkte Auflockerung der über demselben ruhenden Luft während unseres Sommers in Europa häufige Nordwestwinde.

§ 254a. Verlauf eines barometrischen Minimums.*) Die Tafeln IVa und b gewähren eine Übersicht über Luftdruck, Wind, Bewölkung und Niederschlag in Europa an zwei auf einander folgenden Tagen (den 7. und 8. Februar 1868 vormittags). Der Barometerstand ist durch die Isobaren veranschaulicht, die Luftströmungen durch Pfeile, welche mit dem Winde fliegen, und die Stärke des Windes durch die verschiedene Anzahl der Federn an diesen Pfeilen (eine

*) Vergl. H. Mohn, Grundzüge der Meteorologie. Berlin 1875.

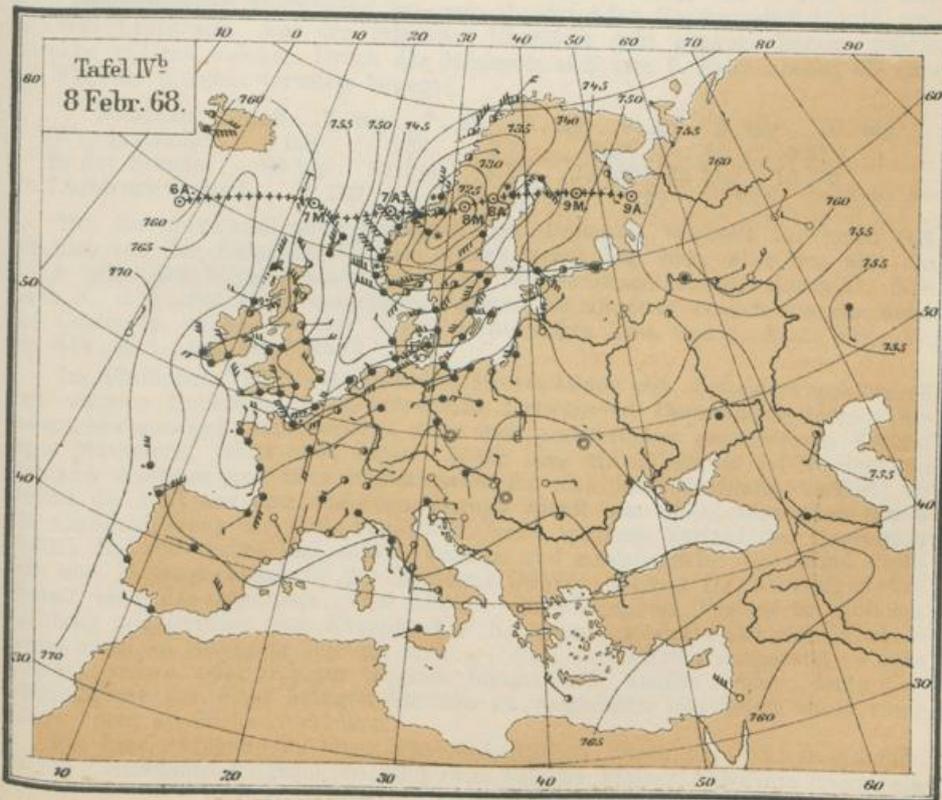
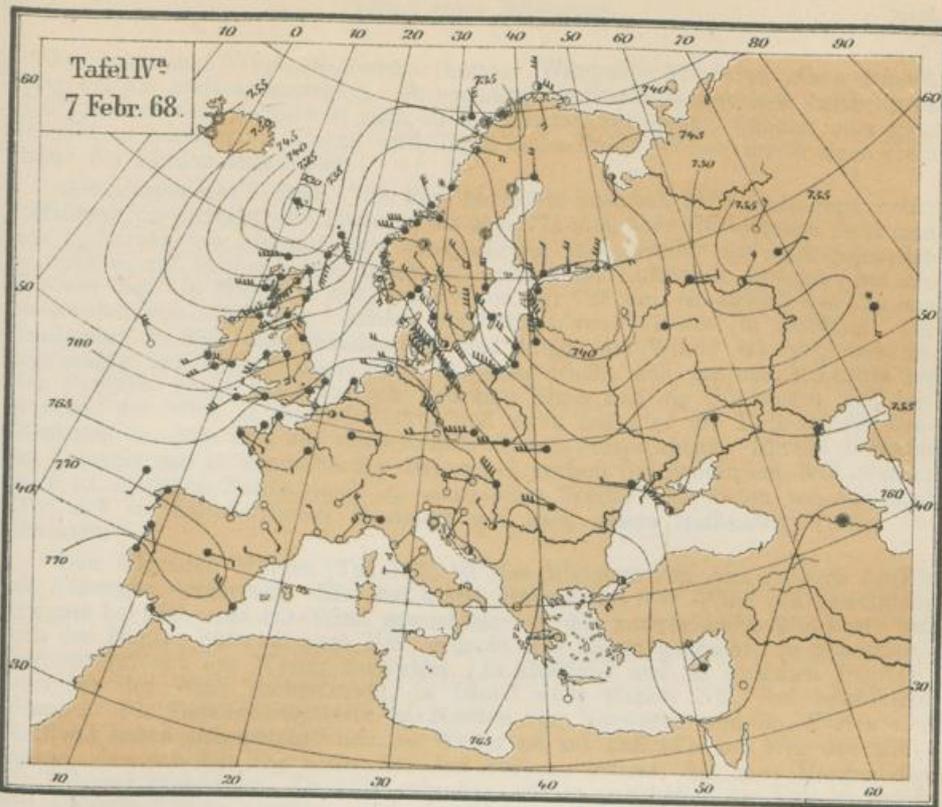
wenn
 ruckes
 einer
 Gra-
 zteren
 e Be-
 ch im
 el. der
 n dem
 Uhr,
 baro-
 ntrum
 kehrt
 t aus
 inaus
 nach
 Bahn
 e der
 , d. h.
 setzte
 l auf

wei-
 n der
 hier
 g der
 welche
 e Ab-
 lichen
 Diese
 Breite;
 gerem
 uft.

dienen
 Regel
 durch
 werden,
 ichtem

en her-
 jedoch
 n Kon-
 henden

eln IVa
 Nieder-
 ebruar
 aulicht,
 Stärke
 n (eine





Feder
Ring
oder g
bewö
nebe

A
Luftd
den L
erstre
Faröe
im No
Gradi
regelm
den F
stärke
Minim
im Ka
auch i
läßt s
obacht

D
bis No
Himm
sich d
dagege
land H
Himme
Rufsla
mums
10. Fe
Osten
sten H
gender
Streck
10. Fe

We
in c
Luf

Be
nördlic
linke S
nach N
des Ce
bis NV

Im
den w
selben
eines M
Englan
strömt
die Ax
südlich
sich al
Nimmt
Richtun
Deutsch
fast sti
schwind
Stunde

Die
ist von

Feder schwacher Wind, 6 Federn Orkan). Windstille ist durch einen runden Ring um die Station bezeichnet. Je nachdem die Stationskreise leer, halbschwarz oder ganz schwarz dargestellt sind, ist der Himmel als heiter, halbklar oder ganz bewölkt zu bezeichnen. Regen wird durch einen Punkt, Schnee durch einen Stern neben der Station angedeutet.

Am Morgen des 7. Febr. (Taf. IVa) herrschte demnach über Südeuropa hoher Luftdruck, in Spanien und Portugal bis über 771 mm, über Mitteleuropa sieht man den Luftdruck von 760 mm sich zungenförmig nach Norden bis nach Schweden erstrecken; auf beiden Seiten dieser Isobare ist der Luftdruck geringer, bei den Faröern liegt ein Minimum des Druckes von nur 727 mm, ein zweites von 732 mm im Norden von Norwegen, endlich ein drittes von 737 mm in Rußland. Die Gradienten in Süd- und Mitteleuropa sind klein, die Winde schwach und unregelmäßig, der Himmel meist klar. Dagegen erhöht sich um das Minimum bei den Faröern, wo die Isobaren dicht gedrängt liegen und die Gradienten sich verstärken, der Wind zu Sturmesstärke, und zwar treibt er die Luft spiralig dem Minimum zu, dem in § 254 dargestellten Gesetz entsprechend. Ebenso herrscht im Kattegat und in der südlichen Ostsee bei großen Gradienten ein NW.-Sturm; auch im östlichen Deutschland ist stürmisches Wetter. Im Osten von Rußland läßt sich ein barometrisches Maximum mit nach außen treibenden Winden beobachten.

Den folgenden Morgen (Taf. IVb) ist das Minimum von den Faröern östlich bis Norwegen vorgerückt. Hier hat klarer Himmel bei NW.-Wind mit bewölktem Himmel bei SW.- und SO.-Wind gewechselt; an der norwegischen Westküste hat sich der frühere Südwind nach NW. gedreht und Regen gebracht, in Schottland dagegen hat sich das Wetter aufgeklärt. In Rußland und im östlichen Deutschland hat der Wind nachgelassen, in Island weht starker NO., bei bewölktem Himmel. Die Depressionsgebiete im Norden von Norwegen und im Westen von Rußland haben sich ausgeglichen. — Weiter ist auf Taf. IVb der Weg des Minimums, das sich den Tag vorher bei den Faröern befand, bis zum Morgen des 10. Februar angedeutet. Dasselbe schreitet, wie es gewöhnlich der Fall ist, nach Osten vor und zwar, sobald es über das feste Land kommt, weil es hier die meisten Hindernisse zu überwinden hat, mit abnehmender Geschwindigkeit und steigendem Luftdruck. Aus der folgenden Übersicht geht genauer hervor, welche Strecke und mit welchem Druck das Minimum sich vom 6. Febr. abends bis zum 10. Februar morgens vorwärts bewegt:

	6. ab...7. mg...	7. ab...8. mg...	8. ab...9. mg...	9. mg...10. mg.		
Weg in Graden:	6,8°	6,3°	3,7°	3,6°	3,4°	3,5°
in der Stunde:	63 km	59 km	34 km	33 km	32 km	16 km
Luftdruck in mm.:	727	725	723	733	737	742.

Bei der fortschreitenden Bewegung des Minimums wechselt für einen Ort nördlich von der Bahn des Wirbelcentrums (vergl. Fig. 230), über den also die linke Seite des Wirbels hinweggeht, die Windrichtung von SO. durch O., NO. nach N., d. i. „der Sonne entgegen“, dagegen für die Orte südlich von der Bahn des Centrums, welche also der Wirbel rechts liegen läßt, von S. durch SW., W. bis NW., d. i. „mit der Sonne“.

Im nördlichen Teil des Atlantischen Meeres bilden sich, besonders wohl durch den warmen Golfstrom (§ 247) veranlaßt, fortwährend Depressionsgebiete. Dieselben bewegen sich, entsprechend dem oben ausführlicher geschilderten Verlauf eines Minimums, meist nach Osten. Wenn also ein Minimum im Norden von England erscheint und über Skandinavien hin sich nach Rußland verliert, so strömt die Luft aus dem südlichen Europa zuerst aus OSO., wird aber durch die Axenumdrehung der Erde südöstlich, beim späteren Verlauf der Depression südlich und südwestlich und endlich westlich und nordwestlich. Der Wind dreht sich also in Deutschland in der Richtung OSWN. (Doves Drehungsgesetz). Nimmt aber das Minimum, was seltener eintritt, seinen Verlauf in südlicher Richtung und westlich vom Europäischen Kontinent, so dreht sich der Wind in Deutschland im entgegengesetzten Sinne. — Man hat Minima beobachtet, welche fast still stehen, oder sich nur langsam fortschieben, andere wieder, deren Geschwindigkeit der eines heftigen Sturmes zu vergleichen ist, indem sie in einer Stunde mehr als 90 km vorrücken.

Die erste Anregung zu einer wissenschaftlichen Pflege der Witterungskunde ist von Deutschland ausgegangen, und zwar hat die Pfälzer Akademie zuerst ein

eigentliches Beobachtungsnetz begründet. Alex. v. Humboldt (Kosmos 1845—1858) entwarf in großen Zügen den Plan einer physikalischen Geographie, und Dove zeigte dann in mustergültiger Weise, wie die aus den Beobachtungen gewonnenen Zahlen zu gruppieren sind und zu allgemeinen Resultaten führen. Die Physik und Meteorologie der Meere verdankt vor allem dem Amerikaner Maury († 1873) ihre rasche Entwicklung. Im Jahre 1875 endlich ist auch die deutsche Admiralität dem System der Sturmwarnungen durch Vereinigung und regelmäßige Veröffentlichung telegraphischer Berichte über den Barometerstand, die Windrichtung und die Witterung aus einem ausgedehnten Beobachtungsgebiet auf Seewarten beigetreten.

§ 255. Wirbelstürme. Die heftigsten Luftbewegungen finden in den Wirbelstürmen der Tropengegenden statt, welche in den westindischen Gewässern unter dem Namen Hurrikans, in den ostindischen und chinesischen Meeren als Teifuns bekannt und gefürchtet sind. Eine Luftmasse von vielen Meilen Durchmesser wird dabei in heftig wirbelnde Bewegung versetzt. Die Rotationsrichtung ist auf der nördlichen Halbkugel entgegengesetzt der eines Uhrzeigers (SONWS) (§ 254), auf der südlichen Halbkugel die umgekehrte. Dabei schreitet das Centrum des Wirbelsturmes allmählich fort, auf der nördlichen Halbkugel, solange er sich in der Passatregion befindet, von SO. nach NW.; an der Grenze der Passatregion angelangt, wird die Richtung des Fortrückens allmählich nach N. und NO. abgelenkt, indem gleichzeitig der Durchmesser des Wirbelsturmes sich erweitert und seine Intensität abnimmt. Am furchtbarsten und häufigsten sind die Hurrikans in der Gegend der Antillen. Im Centrum des Wirbelsturmes herrscht völlige Windstille und infolge der durch die Rotation bewirkten Luftverdünnung ein sehr niedriger Barometerstand. Ein Ort, über den das Centrum des Wirbels fortschreitet, wird daher nach einander von zwei in entgegengesetzter Richtung wehenden Stürmen getroffen, welche durch eine kurze Windstille getrennt sind.

Wirbelbewegungen in kleinerem Maßstabe, welche wie die Wirbelstürme in der Regel von elektrischen Erscheinungen begleitet werden, sind die Wind- und Wasserhosen oder Tromben. — Nach Reye (1872) sind die Wirbelstürme als durch Wärme erzeugte, vertikale Luftströme zu erklären: diese Luftströme veranlassen das Herzströmen der Luft zum Fusse, die Abnahme des Luftdruckes und die rasche Bildung von Regen- und Gewitterwolken. Um das windstille Centrum steigen so lange neue Luftströme auf, als genügende Mengen Wasserdampf mitgerissen werden, um bei ihrer Verdichtung durch die dabei freiwerdende Wärme die Luft zu erwärmen und so emporzuheben.

§ 256. Wolken, Nebel. Durch Abkühlung einer Luftmasse bis unter den Sättigungspunkt des in ihr enthaltenen Wasserdampfes (§§ 213, 218) wird ein Teil des letzteren in tropfbar flüssigem Aggregatzustand in Form von Wolken oder Nebeln niedergeschlagen. Diese bestehen aus sehr feinen Wassertröpfchen, welche vermöge ihrer Leichtigkeit längere Zeit in der Luft schweben können. Die Abkühlung und daraus entspringende Wolkenbildung erfolgt namentlich beim Aufsteigen der erwärmten, feuchten Luft in höhere Regionen, wie es besonders in der Regenregion der Kalmen stattfindet (§ 253), sodann bei Fortführung der Luft nach höheren Breitengraden im Äquatorialstrom (§§ 251, 254), oder endlich bei Vermischung wärmerer mit kälteren Luftmassen, z. B. beim Eindringen des Polarstromes in den Äquatorialstrom.

Am Abend beobachtet man die Bildung von Nebeln über Gewässern und feuchten Wiesen, wenn die Temperatur der auf denselben ruhenden Luftschicht

bis unter den Taupunkt zu sinken beginnt. In den Gebirgen heften sich die Wolken an die kalten Berggipfel, indem die Luftteilchen, sobald sie in die Nähe des Berges gelangen, bis unter den Taupunkt abgekühlt werden, und der Wasserdampf sich niederschlägt, in größerer Entfernung von demselben aber sich wieder auflöst. Deshalb scheint die Wolke, vom Thale aus gesehen, ruhig am Berge zu haften, obgleich in der That die Luftmasse in steter Bewegung ist und die Wolke von immer neuen Wasserteilchen gebildet wird, wie der durch einen ruhenden Stein in fließendem Wasser erregte Wirbel seinen Ort unveränderlich bewahrt. Ein ähnlicher Prozeß fortwährender Neubildung und Wiederauflösung findet wahrscheinlich in den meisten Wolken statt. — Wolken und Nebel sind nicht wesentlich verschieden. Nebel sind auf dem Erdboden ruhende Wolken. Die auf dem Berge lagernde Wolke erscheint dem darin Befindlichen als Nebel. Die Verdichtung des Wasserdampfes geschieht in Form kleiner Tröpfchen oder Kugeln, welche nach Coulier (1875) und Aitken (1880) immer fester oder flüssiger Ansatzkerne bedürfen, und diese werden ihnen durch den in der Atmosphäre stets vorhandenen, wenn auch unsichtbaren, Staub geliefert. (Nebelglüh-Apparat von J. Kießling in Hamburg, 1884). Nach Meißner ist der Ozongehalt der Atmosphäre von wesentlichem Einfluß auf die Wolkenbildung.

§ 257. Wolkenformen. Unter den mannigfaltigen Gestalten der Wolkenbildung unterscheidet man nach Howard folgende vier Hauptformen: die Federwolke (cirrus), die Haufenwolke (cumulus), die Schichtwolke (stratus) und die Regenwolke (nimbus).

Die feinsten und am höchsten schwebenden Wolken sind die Federwolken, wahrscheinlich nicht aus flüssigen Wasserteilchen, sondern aus Eiskristallen gebildet. Sie zeigen häufig, namentlich wenn sie in die geschichtete Federwolke (cirro-stratus) übergehen, den Eintritt des Äquatorialstromes in den oberen Luftschichten an, weshalb man bei gleichzeitigem, allmählichem Sinken des Barometers auf Regenwetter schließen kann. Als die mittlere Höhe der Federwolken im Sommer zu Upsala ist (1887) von Ekholm und Hagström 8878 m (4970 bis 14976 m) gemessen worden. — Die abgerundeten Haufenwolken, oft von halbkugeliger Gestalt mit horizontaler Basis, treten bei uns in der Regel im Sommer bei andauernd schönem Wetter auf. Eine Zwischenform bildet die gehäufte Federwolke (cirro-cumulus) — die sogenannten „Schäfchen“. Schichtwolken sind die langen, horizontalen Wolkenstreifen, welche sich häufig in weiter Ausdehnung über dem Horizont lagern. Die Regenwolke, in der Regel aus der geschichteten Haufenwolke (cumulo-stratus), oder der geschichteten Federwolke (cirro-stratus) entstehend, überzieht entweder den ganzen Himmel, oder einen großen Teil desselben mit einem gleichförmig grauen, undurchsichtigen Schleier.

§ 258. Regen. Wird der Niederschlag des Wasserdampfes (§ 256) so reichlich, daß die Wasserteilchen nicht mehr in der Luft schwebend erhalten werden können, sondern zu größeren Tröpfchen und Tropfen zusammenfließen, so fällt das Wasser als Regen herab. Anfangs lösen sich die Tropfen beim Herabfallen durch trockene Luftschichten zum Teil wieder auf, bis sich auch die unteren Schichten mit Feuchtigkeit gesättigt haben. Dann findet in der Regel das Umgekehrte statt, daß nämlich die Tropfen sich im Herabfallen durch neuen Niederschlag noch vergrößern, so daß die am Fuße eines Turmes auf eine gleich große Fläche fallende Regenmenge größer ist, als an der Spitze desselben. Die Dauer und Beschaffenheit des Regens ist verschieden, je nachdem derselbe durch den andauernden Äquatorialstrom (vergl. § 254), oder durch das Eindringen des Polarstromes in den Äquatorialstrom veranlaßt wird. Im ersteren Fall erfolgt der Niederschlag allmählich und längere Zeit gleichmäßig andauernd, während er im letzteren Fall plötzlich in großer Menge stattfindet, aber schnell vorübergeht. Diese schnelle Verdichtung des Wasserdampfes ist dann in der Regel mit lebhaften, elektrischen Erscheinungen verbunden (§ 287).

Darauf beruht der Unterschied der sogenannten Landregen und der Gewitterregen. Erstere dauern in märsiger Stärke mit kleinen Tropfen lange Zeit an, letztere fallen mit großen Tropfen in sehr reichlicher Menge, aber schnell vorübergehend.

Die an einem Orte in einem bestimmten Zeitabschnitt fallende Regenmenge wird durch den Regenmesser (Ombrometer) gemessen. Ein trichterförmiges, oben offenes Gefäß, dessen Öffnung einen genau bestimmten Flächeninhalt hat, sammelt die auf diese Fläche fallende Regenmenge in einem Kasten, aus welchem sie in ein engeres Gefäß gebracht und ihrem kubischen Inhalt nach gemessen werden kann. Man kann danach bestimmen, wie hoch die gefallene Regenmenge den Boden bedecken würde, wenn durch Abfluß, Verdunstung und Eindringen in den Boden nichts verloren ginge. In Berlin beträgt die mittlere, jährliche Regenmenge 59 cm, in Kalkutta 174 cm, in Buitenzorg (Java) 375 cm, in Cayenne 330 cm, in Cerra Punjee (ostindisches Monsungebiet) 1420 cm. Im allgemeinen fällt an Gebirgen mehr Regen als in der Ebene und zwar (auf der nördlichen Halbkugel der Erde) vorzugsweise am Südabhang der Gebirge, was sich aus der Abkühlung erklärt, welche der Äquatorialstrom daselbst erleidet.

§ 259. Schnee. Ist die Temperatur der Luft unter dem Gefrierpunkt, so findet der Niederschlag der Feuchtigkeit nicht in flüssiger

Fig. 232.



Form, sondern in Gestalt feiner, nadelförmiger Eiskrystalle statt, welche sich, da sie dem hexagonalen Krystallsystem angehören, zu zierlichen, sechsstrahligen Sternen (Fig. 232) zusammengruppieren. Bei größerer Menge bilden dieselben unregelmäßige Schneeflocken, deren weiße, undurchsichtige Beschaffenheit von der lockeren Anhäufung der sie bildenden Eiskrystalle und den zahlreichen, zwischen ihnen eingeschlossenen, lufthaltigen Zwischenräumen herrührt.

Die sechsstrahligen Schneefiguren, welche am schönsten bei strenger Kälte und sparsam fallendem Schnee beobachtet werden, fängt man am besten auf einer, zuvor unter Null Grad abgekühlten, schwarzen Schiefertafel, oder einem schwarzen Tuch auf. Sehr mannigfaltige Formen derselben sind von Scoresby auf seinen Reisen in den Polarregionen beobachtet und abgebildet worden.

§ 260. Schneegrenze, Firn, Gletscher. In den Polargegenden, sowie in den höheren Gebirgsregionen (vergl. § 249), ist die Sommerwärme nicht mehr hinreichend, um die während des Winters im festen Aggregatzustand niedergeschlagenen Schneemassen zu schmelzen. Dies tritt in um so geringerer Höhe über dem Meeresniveau ein, unter je höherem Breitengrade das Gebirge gelegen ist; in der Polarzone sinkt die Schneegrenze bis zum Meeresniveau herab. So beträgt die Höhe der Schneegrenze an den Cordilleren von Bolivia und am Himalaya 4800 bis 5800 m, an den Alpen 2700—2800 m, am Altai 2000 m; an den norwegischen Kjölen 1600 m, auf Island 1000 m.

Übrigens wird die Höhe der Schneegrenze auch durch die absolute Höhe und durch die Massenhaftigkeit der Erhebung des Gebirges, durch die angrenzenden Hoch- oder Tiefländer, sowie durch die Menge der Niederschläge beeinflusst. So ist die Schneegrenze an der nördlichen Kette des Karakorum höher als an der südlichen Parallelkette des Himalaya, und am Nordabhang des letzteren höher als am Südabhang, weil an letzterem die stärksten Niederschläge stattfinden und der Himalaya nördlich an das Hochland von Tibet, südlich aber an die Stufenländer Indiens grenzt.

Ein großer Teil des im Winter auf dem Hochgebirge angesammelten Schnees stürzt bei beginnender Schneeschmelze im Frühling und Anfang des Sommers in Form von Lawinen von den geneigten Abhängen des

Gebirges herab. Der übrigbleibende Teil, auf den weniger steil geneigten Flächen, wird während des Sommers durch abwechselnde, oberflächliche Schmelzung unter den Strahlen der Sonne und Wiedergefrieren bei Nacht in körnigen Firn umgewandelt. Dieser Firn, welcher auf hohen Gebirgen Felder von meilenweiter Ausdehnung bildet, senkt sich durch seine Schwere allmählich in die tieferen Einsattelungen des Gebirges herab, indem er sich, infolge einer besonderen Eigenschaft des Eises, zu einer immer dichter und fester zusammenhängenden Eismasse vereinigt. Dadurch entstehen die Gletscher, welche gleichsam als die in den Thalschluchten des Hochgebirges herabsteigenden Abflüsse des Firnmeeres betrachtet werden können, und deren untere Enden sich meist weit unter die Schneegrenze hinab erstrecken (der Grindelwaldgletscher z. B. bis zu 1000 m Meereshöhe).

Die Eismasse des Gletschers ist in fortwährendem, langsamem Vorrücken begriffen, dessen Geschwindigkeit je nach der Gestalt und Neigung des Thalbettes, in welchem der Gletscher sich herabsenkt, verschieden ist. Tyndall fand diese Geschwindigkeit an verschiedenen Punkten des Mer de glace bei Chamouny gleich 24–54 cm in 24 Stunden. Die Gletscher in Grönland bewegen sich täglich bis zu 16 m und besitzen eine Breite von 4 bis 9 km und eine Dicke von 200–300 m. Die Eismasse des Gletschers ist von zahlreichen, bald mehr, bald minder breiten und tiefen Spalten zerklüftet, in welche das durch oberflächliche Schmelzung entstandene Wasser einsickert und sich zu einem unter dem Gletscher hin fließenden Bach sammelt, welcher am unteren Ende desselben aus einem mehr oder minder hoch gewölbten Gletscherthor hervorströmt. Das untere oder Stirnende des Gletschers würde durch das Herabsinken der Eismasse mit jedem Jahre tiefer nach dem Thale hin vorrücken, wenn nicht am unteren Ende ebensoviel abschmelze, wie von obenher nachrückt. In heißen, trockenen Jahren zieht sich der Gletscher zurück, indem die Schmelzung überwiegt, während er in einer Reihe kalter Jahre mit reichlichen Niederschlägen vorrückt und die vor seinem Ende angesammelten Schutt- und Geröllmassen, welche seine sogenannte Stirnmoräne bilden, mit unwiderstehlicher Gewalt vor sich herschiebt. Die Oberfläche des Gletschers ist in der Regel mit mehr oder minder zahlreichen Steinen und Felsstücken bedeckt, welche durch den Druck und die Reibung des Eises von den Thalwänden abgelöst, oder von oben auf den Gletscher herabgefallen sind. Bei seinem Herabrücken führt der Gletscher diese Gesteinmassen mit sich ins Thal herab, und dieselben häufen sich am unteren Ende als Stirnmoräne an, während die Ränder des Gletschers seiner ganzen Länge nach von zwei aus ähnlichem Geröll gebildeten Seitenmoränen eingefasst sind. Wenn sich die Thalbetten zweier Gletscher vereinigen, so fließen beide, wie zwei Ströme, in einen zusammen, und durch Vereinigung der beiden innern Seitenmoränen entsteht eine Mittelmoräne, welche auf dem Rücken des Gletschers herabläuft. In einer früheren Epoche der Erdbildung war die Ausdehnung der Gletscher, wie durch geologische Forschungen nachgewiesen wird, eine viel größere als gegenwärtig.

§ 261. Graupeln, Hagel, Glatteis. Graupeln sind kugelförmige, etwa erbsengroße, leicht zerdrückbare, trübe Schneekörnchen, welche namentlich im Frühjahr und Herbst bei schnell wechselnder Temperatur häufig niederfallen. Man kann dieselben als Schneeflocken betrachten, die durch teilweise Schmelzung und Wiedergefrieren während des Herabfallens verdichtet sind. — Die Hagelkörner bestehen aus einem trüben, einem Graupelkorn ähnlichen Schneekern, welcher von einer mehr oder minder dicken Hülle in concentrischen Schalen geschichteten Eises umgeben ist. Die schnelle Bildung so großer Eismassen, welche wegen ihres bedeutenden Gewichtes nicht wohl längere Zeit in der Luft geschwebt haben können, erklärt sich nach Dufour durch die Annahme, daß sich die Wassertröpfchen der hagelbildenden Wolke, unter Null Grad abgekühlt, im Zustande der Überschmelzung (§ 208) befinden. Durch Berührung

mit einer Schneeflocke wird die plötzliche Erstarrung der überschmolzenen Wasserteilchen veranlaßt, und dieselben überziehen in kurzer Zeit das durch die Wolke herabfallende Korn mit einer schalenförmig geschichteten Eishülle von beträchtlicher Dicke, welche durch eingeschlossene Luft weiß und undurchsichtig erscheint. Die Hagelwetter treten in der Regel in Begleitung von Gewittern (§ 288) auf und sind auf einen schmalen Landstrich beschränkt, der aber oft bedeutende Längenausdehnung hat. — Eine der Hagelbildung analoge Erscheinung ist das sogenannte Glatteis. Fallen im Winter unter den Gefrierpunkt abgekühlte und im Zustand der Überschmelzung befindliche Regentröpfchen auf den festen Erdboden, so erstarrten sie plötzlich und überziehen den Erdboden mit einer glatten Eissrinde. Daß hier die Abkühlung unter den Gefrierpunkt nicht erst am kalten Erdboden erfolgt, geht daraus hervor, daß die Bildung der Eisschicht auch auf ausgespannten Tüchern, Regenschirmen und anderen schlechten Wärmeleitern stattfindet.

§ 262. Tau und Reif. Durch die nächtliche Wärmeausstrahlung nach dem Weltraum wird bei heiterem Himmel die Erdoberfläche, wo sie von schlechten Wärmeleitern gebildet wird, bis unter den Taupunkt (§ 218) abgekühlt. Der in den mit der Erdoberfläche in Berührung befindlichen Luftschichten enthaltene Wasserdampf schlägt sich infolgedessen als Tau, oder wenn die Temperatur des Bodens unter dem Gefrierpunkt ist, als Reif nieder. Die Tau- oder Reifbildung erfolgt deshalb um so reichlicher, je größer das Wärmestrahlungsvermögen und je geringer das Wärmeleitungsvermögen der Erdoberfläche ist, am reichlichsten daher auf dunklen, rauhen Körpern, auf Pflanzenteilen, welche eine sehr große, strahlende Oberfläche darbieten und dabei sehr schlechte Wärmeleiter sind. An den Zweigen der Bäume bildet sich im Winter der Eisniederschlag als sogenannter Raufrost häufig in solcher Menge, daß starke Äste und Stämme durch das Gewicht desselben zusammenbrechen.

Die Taubildung wird verhindert durch alle Einflüsse, welche die freie Wärmeausstrahlung nach dem Weltraum beschränken, also durch Bewölkung des Himmels, durch Rauch, sowie durch jede Bedeckung des Bodens.

Siebenter Abschnitt.

Elektrizität und Magnetismus.

1. Reibungselektrizität.

§ 263. Erregung der Elektrizität durch Reibung; Leiter und Nichtleiter der Elektrizität. Viele Körper, wie Harze, Schwefel, Glas, Seide, erlangen durch Reiben die Eigenschaft, leichte Körperchen anzuziehen und nach erfolgter Berührung wieder abzustofsen. Diese Eigenschaft nannte man Elektrizität, weil man schon im Altertum am Bernstein (*ἤλεκτρον*) bemerkt hatte, daß er gerieben, leichte Körper, wie Aschenteilchen, Strohhalme u. dergl. anzieht, und teilte die Körper, je nachdem sie durch Reiben elektrisch wurden oder nicht, in idioelektrische und anelektrische. Nachdem jedoch Gray (1729) gezeigt hatte, daß die sogenannten anelektrischen Körper nicht nur elektrisiert werden können,