

schwerer als kalt; der bei der Erwärmung hinzugebrachte Wärmestoff muss also gewichtslos sein, und so betrachtete man die Wärme als imponderablen Stoff.

Seit Anfang dieses Jahrhunderts mehrte sich aber die Kenntnis von Fällen, wo Wärme durch Arbeit neu geschaffen wird; dadurch ward man gezwungen, die stoffliche Hypothese der Wärme fallen zu lassen, es wurde die mechanische Wärmetheorie aufgebaut, welche die lebendige Kraft der Molekularbewegung als Wärme auffasst; sie führte zu ungeahnten Erfolgen in der Erkenntnis der Erscheinungen.

Sehr viele Erscheinungen indes, alle, bei denen Wärme nicht neu geschaffen wird oder verbraucht wird, lassen sich sehr bequem so beschreiben, als ob wir es mit einem Stoff von unveränderlicher Quantität zu thun hätten. Wir wollen uns mit diesen Erscheinungen zuerst beschäftigen, und erst dann auf das Wesen der Wärme näher eingehen.

A. Ausdehnung durch die Wärme.

§ 115. Wenn wir einen festen Körper während der Erwärmung genau beobachten, so sehen wir, dass er sich ausdehnt, seine Länge nach allen Richtungen, also auch sein Volumen, zu-

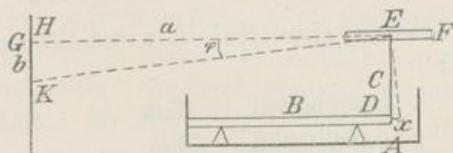


Fig. 104.

nimmt. Die Zahl, welche angibt, um welchen Bruchteil seiner Länge ein Körper sich ausdehnt, wenn er aus schmelzendem Eis in siedendes Wasser gebracht wird, heisst sein linearer Ausdehnungskoeffizient; noch häufiger wird der hundertste Teil jener Grösse so genannt. Da die Ausdehnung sehr klein ist, muss man empfindliche Methoden zu ihrer Messung benutzen. Genaue Bestimmungen wurden von Laplace und Lavoisier in folgender Art ausgeführt: in einem Troge A (Fig. 104), der mit Eiswasser oder mit siedendem Wasser gefüllt werden konnte, ruhte der zu untersuchende Stab B, so dass sein eines Ende fest an der Wand

anlag, das andere D dagegen frei beweglich war. Dies Ende wird sich also bei der Verlängerung verschieben. Gegen das Ende lehnt sich unter leichtem Druck ein Hebel c mit dem Drehpunkt E, welcher ein Fernrohr F trägt, welches sich bei Drehung des Hebels, hervorgebracht durch Verlängerung des Stabes, ebenfalls dreht. Das Fernrohr ist eingestellt auf eine entfernte Skala G; man sieht, mit dem Fadenkreuz zusammenfallend, Teilstriche H und K, wenn der Stab in Eis oder siedendem Wasser liegt. Nennen wir $EH = a$, $HK = b$, den Drehungswinkel φ , so ist $\frac{b}{a} = \operatorname{tg} \varphi$, nennen wir die

Verlängerung x , so ist auch $\frac{x}{c} = \operatorname{tg} \varphi$, also $\frac{x}{c} = \frac{b}{a}$, $x = \frac{cb}{a}$.

Wenn daher a sehr gross ist, erhält auch für sehr kleine x die Strecke b einen erheblichen Wert, so dass sie sich genau messen lässt.

In neuerer Zeit hat man viel empfindlichere Apparate mit feinen Fühlhebeln angewandt, die auch an kurzen Stäben genaue Messungen gestatten.

Es hat sich ergeben, dass die Verlängerung eines Stabes proportional seiner Länge, der Wärmezunahme und abhängig von der Substanz ist, also die Länge L_t bei t° sich aus der L_0 bei 0° berechnen lässt nach der Gleichung

$$L_t = L_0 + \alpha t L_0 = L_0 (1 + \alpha t).$$

Der Ausdehnungskoeffizient α hat für einige Substanzen folgende Werte:

Platin	0,00000900	Zinn	0,0000225
Gusseisen	0,00001070	Blei	0,0000292
Eisen	0,00001210	Zink	0,0000291
Stahl	0,00001239	Glas	0,0000057—95
Kupfer	0,00001688	Kalkstein	0,00000809
Messing	0,00001890	Holz	0,0900026—97
Silber	0,00001930		

Die Ausdehnung ist nicht ganz streng proportional der Temperaturzunahme, oder anders ausgedrückt: der Ausdehnungskoeffizient ist nicht ganz konstant, sondern er wächst im allgemeinen mit steigender Temperatur, wenn auch nur sehr wenig.

§ 116. Diese Ausdehnung ist in vielen Fällen von grosser praktischer Bedeutung; so ist sie z. B. bei längeren Eisenbauten

zu beachten. Der Ausdehnungskoeffizient von Gusseisen ist etwa 0,00001, d. h. 1 m dehnt sich pro Grad Celsius um 0,01 mm; eine eiserne Brücke von 100 m Länge würde sich daher bei einer Differenz von 50°, die leicht zwischen Sommer und Winter vorkommt, um 5 cm ändern; daher dürfen ihre Enden nicht eingemauert sein. Noch viel mehr kommt das in Betracht bei Eisenbahnschienen, welche daher nicht dicht an einander gelegt werden.

Ferner ist die Ausdehnung zu berücksichtigen bei Längenmessungen, da die Maßstäbe sich ausdehnen; es ist die gemessene Länge daher zu reduzieren auf die Temperatur, bei welcher die Teilung richtig ist.

Wir haben gesehen, dass die Schwingungsdauer eines Pendels von seiner Länge abhängt; also wird sich der Gang einer Pendeluhr mit der Temperatur ändern, so dass sie im Sommer langsamer geht, im Winter schneller. Dem hilft man ab durch die sog. Kompensationspendel oder Rostpendel: Die Pendelstange (Fig. 105) trägt dicht unter ihrem Drehpunkt A einen Querbalken B, von welchem sie sich in zwei Stahlstangen C fortsetzt. An diese schliessen sich durch zwei Querstäbe zwei Zinkstäbe D, die aufwärts gehen, und oben wieder durch einen Querstab verbunden sind; von diesem geht endlich wieder eine Stahlstange E abwärts, welche unten die Linse trägt. Ändert sich nun die Temperatur, so verlängern sich die Stahlstäbe nach unten, die Pendellänge wächst; die Zinkstäbe aber verlängern sich nach oben, die Pendellänge nimmt ab. Nennen wir die Länge der Stahlstäbe C + E, die der Zinkstangen D, so ist die Längenänderung bei t° Temperaturänderung:

$$(C + E) 0,0000124 - D \cdot 0,0000291 t,$$

was durch passendes Verhältnis von C + E zu D gleich 0 werden kann, nämlich für $\frac{C + E}{D} = 2,35$; dann bleibt die Schwingungsdauer für alle Temperaturen die gleiche.

§ 117. Ausser dem linearen Ausdehnungskoeffizienten hat man den kubischen oder Volumenausdehnungskoeffizienten definiert. Haben wir einen Würfel von der Seitenlänge L_0 , so ist dessen Volumen $V_0 = L_0^3$. Bei t° wird die Seite $L_t = L_0 (1 + \alpha t)$, das Volumen $V_t = L_t^3 = L_0^3 (1 + \alpha t)^3 = V_0 (1 + 3 \alpha t + 3 \alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3)$.

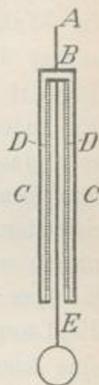


Fig. 105.

Solange nun αt sehr klein ist, können wir die höheren Potenzen vernachlässigen und schreiben $V_t = V_0 (1 + 3 \alpha t) = V_0 (1 + \beta t)$, wo β der kubische Ausdehnungskoeffizient ist. Also ist $\beta = 3 \alpha$.

§ 118. Während wir bei festen Körpern zwei Ausdehnungskoeffizienten definieren können, ist bei Flüssigkeiten und Gasen nur von dem kubischen Ausdehnungskoeffizienten die Rede, weil wir sie in Gefässen einschliessen müssen, in welchen sich nur das Volumen der Flüssigkeit ändern kann. In dem Volumen der Flüssigkeiten hat man nun ein Mittel, den Wärmegrad eines Körpers genauer zu bestimmen. Man nennt denselben die Temperatur. Die Temperatur einer Flüssigkeitsmasse ist also definiert durch ihr Volumen; wir werden weiterhin sehen, dass die so definierte Temperatur von der Wahl der Flüssigkeit nahezu unabhängig ist, wollen aber zunächst die Temperatur durch das Volumen einer Quecksilbermasse definiert denken. Eine bessere thermometrische Substanz werden wir später (§ 126) kennen lernen. Es ist weiter ein Erfahrungssatz, dass wenn wir zwei Körper für einige Zeit zusammenbringen, ihre Temperatur identisch wird. Bringen wir daher dieselbe Flüssigkeitsmasse mit verschiedenen Körpern nach einander in Berührung, so wird ihre Temperatur stets gleich der des berührten Körpers sein, und wir werden durch das Volumen der Flüssigkeit die Temperatur des Körpers ermitteln können. Instrumente, welche eine kleine Flüssigkeitsmasse enthalten, und so eingerichtet sind, dass wir deren Volumänderung leicht beobachten können, heissen Thermometer.

Als thermometrische Flüssigkeit nimmt man meist Quecksilber, nur für besondere Zwecke Alkohol oder andere Substanzen. Die Flüssigkeit wird in ein Glasgefäss gefüllt, welches aus einem weiteren Teile A (Fig. 106) und einer sehr engen Kapillare B besteht. Das Thermometer wird hergestellt, indem man durch die oben noch offene Röhre B etwas Quecksilber in die Kugel bringt und dasselbe für längere Zeit im Kochen erhält; das verdampfende Quecksilber treibt alle Luft aus, löst auch die an den Glaswänden absorbierte Luft und Feuchtigkeit. Schliesslich ist der ganze Apparat nur mit Quecksilber und Quecksilberdampf erfüllt; man taucht jetzt die Spitze unter Quecksilber, lässt den Apparat sich abkühlen; der Quecksilberdampf kondensiert sich, es entsteht ein Vakuum, der äussere Luftdruck treibt daher Quecksilber in das Gefäss, welches sich

schliesslich bis zur Spitze füllt. Nun erwärmt man das Thermometer bis zu einer etwas höheren Temperatur, als bis zu welcher es benutzt werden soll; dabei dehnt sich das Quecksilber aus, ein Teil fliesst aus. Ist die gewünschte Temperatur erreicht, so schmilzt man oben schnell zu. Bei wieder eintretender Abkühlung und Zusammenziehung des Quecksilbers ist dann in der Kapillare ein luftleerer Raum. Dies ist nötig, damit nicht durch anwesenden Sauerstoff die Quecksilberfläche sich oxydiert, wodurch sie an den Wandungen haften würde.

Dadurch, dass Volumänderungen nur in der sehr engen Kapillare das Quecksilber in die Höhe treiben können, ist man im stande, sehr kleine Volumänderungen noch zu beobachten. Die Erfahrung hat nun gezeigt, dass, wenn man ein so hergestelltes Thermometer in schmelzendes Eis taucht, das Quecksilbervolumen stets die gleiche Grösse hat, d. h. der Quecksilberfaden stets an derselben Stelle der Kapillare steht. Man hat dadurch einen rein konventionellen Fixpunkt, von dem aus man die Volumänderungen rechnet. Um sie zu messen, muss aber noch die Grösse der Volumänderung, welche man als Einheit betrachtet, festgesetzt werden; das ist auf folgende Weise geschehen: wenn man das Thermometer in Dampf von siedendem Wasser bringt, so stellt sich die Quecksilberkuppe auch stets (mit später zu besprechender Einschränkung, § 133) auf einen bestimmten Punkt ein. Die Volumvermehrung zwischen diesen beiden Punkten, dem Schmelzpunkt des Eises und dem Siedepunkt des Wassers, wird nun der Messung zu Grunde gelegt. Bei der wissenschaftlich allein gebrauchten Teilung nennt man dies Intervall 100. Man sagt, ein Körper habe 0° , wenn das Thermometer, mit ihm in Berührung gebracht, die Stellung hat, wie im schmelzenden Eise; man sagt, er habe 100° , wenn der Quecksilberfaden dieselbe Stellung hat, wie im siedenden Wasser; die Temperaturerhöhung, welche $\frac{1}{100}$ dieser Volumvermehrung hervorbringt, nennt man 1 Grad Celsius oder 1 Centigrad. Nimmt man an, dass die Kapillare durchweg den gleichen Querschnitt hat, so wird die Verschiebung des Quecksilbers stets proportional der Temperaturerhöhung sein, d. h. bei 50° C. wird der Faden gerade zwischen dem Eis- und Siedepunkt stehen u. s. w. Man bringt nun an dem Eis- und Siedepunkt des Thermometers zwei Marken an,



Fig. 106.

die man mit 0° und 100° bezeichnet, und teilt die Röhre dazwischen in 100 gleiche Teile; die gleiche Teilung setzt man nach oben und unten beliebig weit fort. Dann haben wir ein Instrument, an welchem man die Temperatur der Umgebung aus dem Volumen des Quecksilbers jederzeit ablesen kann.

Ausser der wissenschaftlichen und in den romanischen Ländern allein gebrauchten Centigradteilung ist in Deutschland noch eine andere in Gebrauch, welche Réaumur eingeführt hat. Danach wird der Eispunkt mit 0° , der Siedpunkt mit 80° bezeichnet. Endlich ist in England und Amerika eine dritte Teilung üblich, die von Fahrenheit; hier wird der Schmelzpunkt des Eises 32° , der Siedepunkt 212° genannt. Also sind $100^{\circ} \text{ C.} = 80^{\circ} \text{ R.} = 180^{\circ} \text{ F.}$, und wir haben zur Reduktion der einen Angabe auf die andere

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

§ 119. Bei Benutzung des Thermometers zu genauen Messungen sind noch einige Umstände zu beachten. Die Länge zwischen 0° und 100° wird in 100 gleich lange Teile geteilt; soll denselben eine gleiche Volumzunahme, d. h. Temperaturzunahme, entsprechen, so muss der Querschnitt der Kapillare überall konstant sein. Das ist aber fast nie der Fall, und man muss die Differenzen der Volumina gleich langer Stücke untersuchen und daraus eine Korrektion für die Thermometerangaben ermitteln; man nennt dies das Thermometer kalibrieren. Es geschieht so: man kann bei einem fertigen Thermometer mit einiger Geduld einen Quecksilberfaden von beliebiger Länge abreißen von dem Inhalt der Kugel, und ihn dann im Innern der Kapillare verschieben. Ist der Querschnitt ganz konstant, so bleibt es auch die Fadenlänge, da Querschnitt mal Länge gleich dem abgelösten Volum ist. Man löst nun einen Faden von solcher Länge, dass er nahezu ein aliquoter Teil von 100° ist, also von etwa 50° oder 25° oder 20° u. s. w. Sei es ein Faden von etwa 50° . Wir schieben ihn so, dass sein eines Ende genau auf 0° steht, das andere befinde sich dann bei $50,6$; dann stellen wir das untere Ende genau auf 50° , das obere stehe bei $101,1^{\circ}$. Nun wissen wir: der Faden füllte erst $50,6$, dann $51,1$ Grade; der doppelte Faden hätte also $101,7$ Grade gefüllt, die wahre Länge unseres Fadens entspricht also $\frac{101,7}{2} = 50,85^{\circ}$. Der Faden hätte also das erste Mal von 0° bis $50,85^{\circ}$ reichen sollen; da er nur bis $50,6^{\circ}$

reicht, ist die Thermometerangabe falsch, bei der Gegend von 50° hat das Thermometer eine Korrektur von $+0,25^{\circ}$. In ähnlicher Weise kann man durch einen Faden von 25° Korrekturen für den Punkt 25° , 50° , 75° erhalten, durch einen Faden von 20° Korrekturen für 20° , 40° , 60° , 80° u. s. w.

Die wichtigste Voraussetzung ist ferner, dass der Nullpunkt und Siedepunkt richtig bestimmt sind; es zeigt sich aber, dass bei einem neu angefertigten Thermometer die Kugel sich noch sehr lange, Jahre hindurch, etwas zusammenzieht, was eine Folge der elastischen Nachwirkung (§ 92) vom Blasen der Kugel ist; dadurch wird das Quecksilber in der Kapillare in die Höhe getrieben, der Nullpunkt steigt allmählich. Daraus ergibt sich, dass das Thermometer nach der Anfertigung einige Jahre liegen muss, bevor es geteilt und benutzt wird.

Weiter hat sich ergeben, dass jede Erhitzung den Nullpunkt herunterdrückt. Dies ist wohl dem Umstande zuzuschreiben, dass beim Steigen des Quecksilbers der Inhalt der Kugel unter grösseren hydrostatischen Druck kommt, die Kugel sich dadurch etwas ausweitet. Nach einer Erhitzung auf 100° kann der Nullpunkt um 1° deprimiert sein, welche Depression nach einigen Stunden oder Tagen wieder verschwindet. Verschiedene Glassorten verhalten sich sehr verschieden; es hat sich gezeigt, dass Glas, welches gleiche Mengen Kali und Natron enthält, am schlechtesten ist, reines Kaliglas und reines Natronglas aber von diesem Fehler fast frei sind.

Endlich ist noch folgendes zu beachten: wie das Quecksilber sich bei Temperatursteigerung ausdehnt, so thut das auch das Glasgefäss, die Kugel wird allmählich geräumiger. Wir beobachten also in Wahrheit gar nicht die wirkliche Volumvermehrung des Quecksilbers, sondern nur die Differenz zwischen dieser und der Ausdehnung des Glasgefässes, die sog. scheinbare Ausdehnung des Quecksilbers. Stellen wir dies graphisch dar (Fig. 107): auf der x-Axe werden die Temperaturen aufgetragen, als Ordinaten das Volumen; die Kurve 1 gelte für das Quecksilber, Kurve 2 für das Glasvolumen. Dann entsprechen 100° der Volumzunahmendifferenz ab , und 50° werden wir haben, wo die Differenz der Zunahmen $cd = \frac{ab}{2}$. Dies wird aber durchaus nicht der Punkt sein, der der halben Volumzunahme des Quecksilbers allein entspricht, welches etwa der Punkt e wäre. Nun ist schon bemerkt, dass der Ausdehnungskoeffizient der festen Körper nicht ganz konstant ist, sondern

wächst, d. h. die Kurve 2 ist keine gerade Linie, sondern gekrümmt. Diese Krümmung ist verschieden für verschiedene Glassorten. Es stelle 3 die Kurve der Ausdehnung eines Thermometergefäßes von

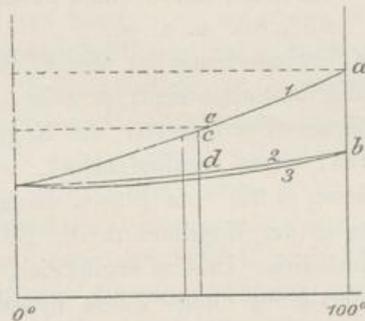


Fig. 107.

anderem Glase dar. Wie man sieht, wird bei einer anderen Temperatur die Differenz $fg = \frac{ab}{2}$ sein, d. h. die beiden Thermometer, welche bei 0° und 100° übereinstimmen, geben für mittlere Temperaturen etwas verschiedene Angaben.

§ 120. Da Quecksilber bei 357° siedet und bei -39° gefriert, ist ein gewöhnliches Quecksilberthermometer höchstens zwischen -30° und $+350^\circ$ zu benutzen. In neuester Zeit hat man Quecksilberthermometer angefertigt, bei denen die Kapillare nicht luftleer, sondern mit Stickstoff unter Druck gefüllt ist. Sie sind bis 500° brauchbar, weil durch den Druck des Gases das Sieden des Quecksilbers verhindert wird (§ 131). Für tiefere Temperatur nimmt man Alkoholthermometer. Von den zu speziellen Zwecken konstruierten Thermometern seien nur die Maximum- und Minimumthermometer angeführt, welche den Zweck haben, die höchste und niedrigste Temperatur, welche in einem längeren Zeitraum, z. B. in 24 Stunden auftrat, nachträglich ablesen zu lassen. Das Maximumthermometer besitzt eine weitere Kapillare und entsprechend grösseres Gefäß und ist mit Quecksilber gefüllt. Ueber dem Quecksilber liegt ein Stückchen Eisendraht, das Thermometer wird horizontal befestigt. Steigt die Quecksilbersäule, so schiebt sie das Eisenstäbchen vor sich her; dasselbe bleibt liegen, wenn das Quecksilber zurückgeht, und markiert so dessen höchsten Stand. Das ebenfalls horizontal befestigte Minimumthermometer hat

Alkoholfüllung und enthält in der Kapillare ein kleines Glasstäbchen; dieses kann wegen Kapillarspannung der Flüssigkeitsoberfläche nicht aus derselben auftauchen; sinkt die Temperatur, so wird es mit zurückgezogen, bleibt aber liegen, wenn die Flüssigkeit wieder steigt.

§ 121. Es gibt noch eine ganz andere Art von Temperaturmessern, die Metallthermometer. Verbinden wir zwei Streifen aus verschiedenem Metall, welche sich daher bei Temperaturänderung verschieden stark ausdehnen oder zusammenziehen, ihrer ganzen Länge nach durch Niete oder durch Zusammenlöten, so müssen sie sich bei Temperaturänderung krümmen, wobei das sich stärker ausdehnende Metall bei Temperatursteigerung die konvexe, bei Senkung die konkave Seite bildet. Es ist klar, dass die Biegung mit der Temperatur ab- und zunehmen muss, letztere sich also aus ersterer ableiten lässt. Je länger der Doppelstab, desto grösser ist die Biegung. Man stellt ihn daher in der Form einer Spiralfeder A (Fig. 108) her, deren eines Ende B befestigt wird, während das andere Ende an einer Axe C angreift, welche also bei Temperaturänderung gedreht wird. Sie trägt einen Zeiger D, dessen Stellung an einer empirisch hergestellten Teilung E die Temperatur abzulesen gestattet.

§ 122. Die Ausdehnung der Flüssigkeiten ist viel grösser, als die der festen Körper. Sie lässt sich am besten bestimmen mit Hilfe des Dilatometers, welches nichts anderes ist, als ein grosses, oben offenes Thermometer. Man füllt die Kugel mit der Flüssigkeit, bringt sie in Bäder von verschiedener bekannter Temperatur und beobachtet die Stellung der Flüssigkeit in der Kapillare. Dadurch erhält man die Volumzunahme v ; diese dividiert durch die Temperaturerhöhung $t_1 - t_0$ und durch das Volumen der ganzen Flüssigkeit V (welches durch Wägung bestimmt wird), ergibt die Ausdehnung der Volumeinheit für 1° zu $\frac{v}{V(t_1 - t_0)}$.

Wie schon bei dem Thermometer besprochen ist, beobachten wir indessen auf diese Weise nicht die wahre Ausdehnung der Flüssigkeit, sondern nur die scheinbare, nämlich die Differenz zwischen der Ausdehnung der Flüssigkeit und des Gefässes. Letztere müssen wir also kennen, um den wahren Ausdehnungskoeffizienten zu erhalten. Es lässt sich der kubische Ausdehnungskoeffizient eines

Glasgefäßes zwar angenähert aus dem linearen berechnen; aber in den geblasenen Glasgefäßen sind immer Spannungen vorhanden, welche unregelmäßige Ausdehnung bewirken, so dass für genaue Messungen stets der Koeffizient des speziellen Gefäßes bestimmt werden muss.

Diese Bestimmung setzt nun wieder die Kenntnis der Ausdehnung einer Flüssigkeit voraus; als solche wird das Quecksilber verwandt. Wir wiegen das Dilatometer leer, das Gewicht sei a ; wir füllen es bis zur Spitze mit Hg, während es in Eis steckt, wiegen es wieder, es finde sich b ; dann ist $b - a$ das Gewicht des Quecksilbers, also $\frac{b - a}{s_0} = v$ das Volumen des Gefäßes und des Quecksilbers, wenn s_0 das spezifische Gewicht des Quecksilbers bei 0° bedeutet. Nun bringen wir das Gefäß in Dampf von siedendem



Fig. 108.

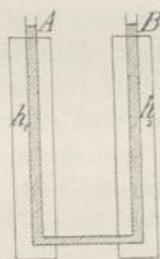


Fig. 109.

Wasser, erhitzen es also auf 100° . Dabei dehnt sich das Quecksilber aus, es fließt ein Teil aus, aber weniger als sollte, weil das Gefäß sich auch ausdehnt. Ist β der kubische Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers, α der des Glases, so sollte $\beta \cdot v \cdot 100$ das Volum des ausfließenden Quecksilbers sein, es fließt aber nur $\beta \cdot v \cdot 100 - \alpha \cdot v \cdot 100$ aus. Das ausgeflossene Volumen ergibt eine dritte Wägung c nach dem Erhitzen zu $\frac{b - c}{s_0}$. Also ist $\frac{b - c}{s_0} = (\beta - \alpha) \frac{b - a}{s_0} 100$, woraus α zu finden, wenn β bekannt ist.

Es handelt sich also nun darum, den Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers kennen zu lernen ohne Benutzung des Dilatometers. Die Methode dazu ist von Dulong und Petit ersonnen und ist im Prinzip folgende: 2 Röhren A und B (Fig. 109) stehen durch

eine enge Kapillare in Verbindung. Sie sind mit Quecksilber gefüllt. Sind die Höhen in den Schenkeln h_1 und h_2 , die Dichten des Quecksilbers s_1 und s_2 , so ist nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren $h_1 s_1 = h_2 s_2$. Die Höhen sind also identisch, wenn die Dichten es sind, d. h. wenn die Temperatur auf beiden Seiten gleich ist. A und B stecken aber bis auf die oberste Kuppe in weiteren Cylindern, welche mit Eiswasser, Wasser oder Wasserdampf von 100° gefüllt werden können; die eine Röhre wird auf 0° erhalten, die andere auf verschiedene Temperaturen gebracht; dadurch werden die Dichten, also die Höhen verschieden. Immer ist $\frac{h_1}{h_2} = \frac{s_2}{s_1} = \frac{v_1}{v_2}$, da das Volum der Dichte umgekehrt proportional. Aus $h_1 : h_2 = v_1 : v_2$ folgt $\frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$, die Volumzunahme der Volumeinheit lässt sich daher aus der kathetometrisch zu messenden Höhendifferenz erhalten, und die Volumänderung der Gefäße kommt gar nicht in Betracht.

Der Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers ist nach den neuesten Bestimmungen: $\beta = 0,0001815$. Er ist, wenn wir die Temperatur nach dem Luftthermometer (§ 126) definieren, nicht konstant, sondern wächst mit der Temperatur. Nach Regnault ist er z. B. bei 0° : 0,00018116, bei 100° : 0,00018411, bei 200° : 0,00018832, bei 300° : 0,00019381.

Wie beim Quecksilber, so ist auch bei den anderen Flüssigkeiten¹⁾ der Koeffizient von der Temperatur abhängig, so dass man schreibt: $\beta = A + Bt + Ct^2 \dots$, wo die Konstanten A, B, C... aus den Beobachtungen bestimmt werden. So ist z. B. für Alkohol nach Kopp: $\beta = 0,00104139 + 0,000001751 t + 0,000000000212 t^2$.

§ 123. Von besonderer Wichtigkeit ist für uns das Wasser, welches ein abnormes Verhalten zeigt. Von 0° an erwärmt, zieht sich das Wasser zusammen bis 4° , erst von da an dehnt es sich aus; es besitzt also bei 4° ein Dichtemaximum. Folgende Tabelle gibt die Dichte, d. h. das Gewicht von 1 *ccm* in Gramm und das Volumen von 1 *g* in Kubikcentimeter bei verschiedenen Temperaturen:

¹⁾ Zahlenangaben siehe in Landolt-Börnstein, physikalisch-chemische Tabellen, Berlin 1894.

Kayser, Physik. 3. Aufl.

Temperatur	Dichte	Volumen
- 10°	0,998145	1,001858
0°	0,999871	1,000129
4°	1,000000	1,000000
10°	0,999747	1,000253
20°	0,998259	1,001744
50°	0,988190	1,011950
100°	0,958866	1,043120

Werden im Wasser Salze gelöst, so sinkt sein Gefrierpunkt; gleichzeitig wird das Dichtenmaximum mit zunehmender Salzmenge immer weniger ausgeprägt.

Die Eigentümlichkeit eines Dichtemaximums bei 4° hat eine für das Tierleben im Wasser wichtige Folge: wird Wasser im Winter von oben abgekühlt, so wird es an der Oberfläche dichter, sinkt also unter, während wärmeres nach oben kommt, um seinerseits abgekühlt zu werden. Dadurch sinkt die Temperatur der ganzen Wassermasse gleichmässig. Das gilt aber nur bis zur Temperatur von 4°; bei noch weiterer Abkühlung der Oberfläche wird das Wasser wieder leichter, und von nun an pflanzt sich die Abkühlung nach der Tiefe nur durch Leitung sehr langsam fort. Auf dem Grunde tiefer Seen herrscht daher eine konstante Temperatur von 4°. Würde sich das Wasser unter 4° auch noch zusammenziehen, so würde es sich durchweg bis 0° abkühlen und dann die ganze Masse sich in Eis verwandeln, wodurch die lebenden Wesen vernichtet würden.

§ 124. Wenden wir uns endlich zur Wirkung der Wärme auf die Gase, so können wir dieselbe auf zwei verschiedene Arten untersuchen: 1. können wir einer Gasmasse Wärme zuführen und dabei ihren Druck konstant halten; wir finden dann, dass das Gas sich ausdehnt, und nennen die Volumzunahme der Volumeinheit pro Grad C. den Ausdehnungskoeffizienten; 2. können wir Wärme zuführen, während das Volumen konstant bleibt; dann finden wir, dass der Druck oder die Spannung des Gases steigt; man nennt die relative Druckzunahme für 1° C. den Spannungskoeffizienten. Vielfach werden die beiden Grössen auch als Ausdehnungskoeffizient bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen bezeichnet. Sie

sollten identisch sein, da nach dem Mariotteschen Gesetz der Druck dem Volumen umgekehrt proportional ist.

Die ersten Versuche über Ausdehnung der Gase sind von Gay-Lussac gemacht; er fand, dass 1. die Volumzunahme proportional dem Volumen und der Temperaturzunahme sei, und 2. dass diese Zunahme für alle Gase identisch sei. Nennen wir daher das Volumen bei 0° : v_0 , bei t° : v_1 , so ist $v_1 = v_0 + v_0 \alpha t = v_0 (1 + \alpha t)$, wo α , der Ausdehnungskoeffizient, für alle Gase denselben Wert hat. Diese Gleichung wird das Gay-Lussacsche Gesetz genannt.

Die Versuche von Gay-Lussac sind vielfach wiederholt worden, am genauesten von Regnault, Magnus und Jolly. Dieselben fanden, dass das Gay-Lussacsche Gesetz nur angenähert richtig ist, in Wahrheit aber 1. Spannungs- und Ausdehnungskoeffizient verschieden sind; 2. für verschiedene Gase die Koeffizienten nicht identisch sind; 3. jeder Koeffizient nicht ganz konstant ist, sondern von der Dichte des Gases abhängt.

Für atmosphärische Luft fanden

Regnault	$\alpha = 0,0036694$
Magnus	$\alpha = 0,0036700$
Jolly	$\alpha = 0,0036702$

Man kann daher setzen $\alpha = \frac{11}{3000}$ oder $\frac{1}{273}$.

Für andere Gase fand Jolly den Spannungscoeffizient, Regnault den Spannungs- und Ausdehnungskoeffizient:

	Jolly	Regnault	
		Ausdehnungs- koeffizient	Spannungs- koeffizient
H	0,0036562	0,0036613	0,0036678
N	0,0036677	—	—
O	0,0036743	—	—
CO ₂	0,0037060	0,0037099	0,0036856
SO ₂	0,0038453	0,0039028	0,0038453

Nach den neuesten Messungen von Chappuis ist für H: $\alpha = 0,00366254$.

Den Einfluss des Druckes zeigen für atmosphärische Luft folgende Angaben Regnaults:

Druck	Ausdehnungskoeffizient	Druck	Spannungskoeffizient
760 mm	0,0036706	110 mm	0,0036482
2525 „	0,0036944	1678 „	0,0036760
5000 „	0,0037320	3655 „	0,0037091
18000 „	0,0038243		

§ 125. Wir haben für die Gase zwei fundamentale Gesetze gehabt, das Mariottesche und das Gay-Lussacsche. Ersteres bezieht sich auf konstante Temperatur und lautet $p v = p_1 v_1$, letzteres $v = v_0 (1 + \alpha t)$. Beziehen wir die erste Gleichung auf die Temperatur t , für welche die zweite gilt, und setzen wir p_1 gleich dem Normaldruck einer Atmosphäre = 760 mm und nennen es p_0 , so können wir durch Vereinigung beider Gleichungen schreiben:

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

Der Zustand einer Gasmasse ist vollkommen bekannt, wenn die drei Grössen: Druck, Volumen, Temperatur, p , v , t , gegeben sind. Obige Gleichung gibt eine Beziehung zwischen diesen Grössen, sie gestattet eine von ihnen zu berechnen, wenn die beiden anderen gegeben sind, oder sie gestattet den Zustand des Gases unter irgend welchen Bedingungen zu berechnen, wenn derselbe bei normalen Bedingungen (0° und 760 mm) bekannt ist. Man nennt eine solche Gleichung eine Zustandsgleichung. Obige Zustandsgleichung der Gase ist in Wahrheit nur angenähert richtig, da weder das Mariottesche noch das Gay-Lussacsche Gesetz streng richtig sind; ein Gas, welches der Gleichung streng folgen würde, nennt man ein vollkommenes oder ideales Gas; Wasserstoff kommt einem solchen am nächsten.

Wir können die Zustandsgleichung auf eine sehr wichtige andere Form bringen. Setzen wir $\alpha = \frac{1}{273}$, so wird

$$v p = v_0 p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right) = \frac{v_0 p_0}{273} (273 + t).$$

v_0 , das Volumen einer Gasmasse, etwa der Gewichtseinheit, bei 0° und 760 mm ist eine Konstante; ebenso $p_0 = 760$ mm; $\frac{v_0 p_0}{273}$ ist also für jedes Gas eine Konstante, wir schreiben dafür R.

Nehmen wir von verschiedenen Gasen äquimolekulare Massen, oder wie man auch sagt, je ein Gramm-Molekel, d. h. so viele Gramm, als das Molekulargewicht angibt, also z. B. 2 g H₂, 32 g O₂ u. s. w., so wird R für alle Gase denselben Wert erhalten, der sich leicht berechnen lässt.

Nach Regnaults Messungen würden z. B. 2 g H in einem Liter 22,35 Atmosphären Druck ausüben, wir erhalten also, wenn wir den Druck in Atmosphären, das Volumen in Liter nehmen:

$$\frac{p_0 v_0}{273} = \frac{22,35}{273} = 0,0819.$$

Weiter setzen wir $273 + t = T$, wo T die Temperatur in Celsiusgraden vermehrt um 273 angibt, d. h. die Temperatur in Celsiusgraden abgelesen an einem Thermometer, dessen Nullpunkt 273° tiefer liegt, als die Temperatur des schmelzenden Eises ist. Dann wird die Zustandsgleichung: $vp = RT$.

Die Temperatur T heisst die absolute Temperatur, der Nullpunkt derselben = - 273° C. heisst der absolute Nullpunkt. Die physikalische Bedeutung desselben ergibt sich leicht: ein Gasvolumen v von 0° C. zieht sich bei Temperaturerniedrigung um 1° um $\alpha v = \frac{1}{273} v$ zusammen, für 2° um $\frac{2}{273} v$, für 273° um $\frac{273}{273} v$, d. h. bei - 273° ist sein Volumen 0 geworden, — wenn das Gay-Lussacsche Gesetz soweit Geltung behielte. Insofern wir nun die Temperatur durch das Volumen der Körper messen, haben wir die tiefstmögliche Temperatur, den absoluten Nullpunkt erreicht, wenn das Volumen durch Temperaturerniedrigung zu Null geworden ist.

Durch Einführung der absoluten Temperatur nehmen viele Gesetze eine einfachere Form an; so zeigt $vp = RT$, dass bei konstantem Volumen v der Druck proportional der absoluten Temperatur, bei konstantem Druck p das Volumen v proportional der absoluten Temperatur sich ändert.

§ 126. Wir haben gesehen, dass man Temperatur durch Ausdehnung der Körper misst; und zwar nahmen wir Flüssigkeiten, Quecksilber oder Alkohol. Nun fragt sich, ob diese Wahl zweckmässig ist. Da zeigt denn eine einfache Ueberlegung, dass sie die bequemste Form des Thermometers allerdings ergibt, dass aber Gase eine viel vorzüglichere thermometrische Substanz bilden, weil 1. ihre Ausdehnung viel stärker ist, die ungleiche Ausdehnung der Glas-

gefäße also dagegen verschwindet (§ 117). Luft dehnt sich 150mal so stark aus als Glas, Quecksilber nur 7mal so stark; 2. weil bei Gasen die Ausdehnung genauer proportional der Temperatur ist; 3. weil bei allen Gasen die Ausdehnung fast identisch ist, daher nicht von ihrer speziellen Natur abhängt, sondern als eine reine Wirkung der Wärme erscheint.

So ist denn in der That die Ausdehnung der Gase, speziell der Luft oder auch des Wasserstoffs, zur Messung und Definition der Temperatur eingeführt worden. Eine bequeme Form des Luftthermometers ist von Jolly angegeben, Fig. 110: eine Kugel A, die mit trockener Luft gefüllt ist, steht durch eine enge Kapillare B

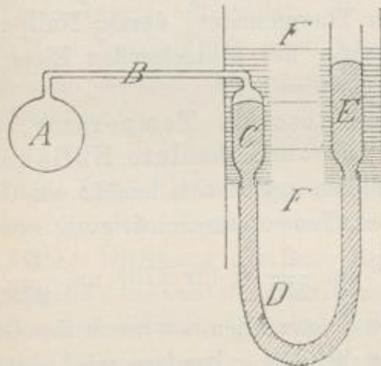


Fig. 110.

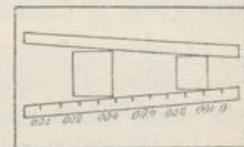


Fig. 111.

mit einem weiteren Glasrohr C in Verbindung. Hieran schliesst sich ein Schlauch D, dessen anderes Ende an dem Rohr E befestigt ist. C, D und E sind mit Quecksilber gefüllt, und im obersten Teil von C ist eine Marke angebracht; wenn bis an diese Marke — eine Spitze aus schwarzem Glas, welche gerade die Quecksilberfläche berühren soll — das Quecksilber steht, so hat die eingeschlossene Luft ein ganz bestimmtes Volumen. C ist an einer Säule befestigt, an welcher E auf und ab geschoben und festgeklemmt werden kann. F trägt eine Millimeterteilung, an welcher der Höhenunterschied der Quecksilberkuppen in C und E abgelesen wird. Dieser Unterschied plus dem herrschenden Atmosphärendruck gibt den Druck, unter welchem die eingeschlossene Luft sich befindet. Die Kugel A wird zuerst in schmelzendes Eis gebracht, E so eingestellt, dass das Quecksilber in C gerade die Spitze berührt, und der Druck der Luft in A bestimmt. Bringt man dann A in irgend

einen anderen Raum, dessen Temperatur bestimmt werden soll, stellt wieder durch Heben oder Senken von E das Quecksilber auf die Spitze ein, so ergibt die relative Druckänderung aus dem bekannten Spannungskoeffizienten die Temperatur.

Wie man sieht, ist das Instrument wenig bequem; es wird daher hauptsächlich gebraucht, um mit seinen Angaben die der Quecksilberthermometer zu vergleichen und für letztere eine Korrektion zu berechnen. Als Beispiel, wie weit die Angaben des Quecksilberthermometers falsch sein können, diene folgende Tabelle:

Luftthermometer	0°	20	40	60	80	100	200	300	350
Quecksilberthermometer	0°	20.14	40.20	60.18	80.10	100	201.25	305.72	360.50

§ 127. Noch in anderer Richtung sind die Luftthermometer wichtig, nämlich zur Messung sehr hoher Temperaturen. Instrumente zu diesem Zwecke nennt man Pyrometer. Eine ältere, sehr ungenaue Methode von Wedgwood benutzte dazu die Ausdehnung von Stücken aus feuerfestem Thon: zwei Metallstreifen B (Fig. 111) sind auf einer Unterlage befestigt, so dass sie schwach konvergieren. Eine Thonplatte A wird sich dann je nach ihrer Breite verschieden weit hinausschieben lassen. An den Schienen ist eine Teilung angebracht, welche die Temperatur ergibt, wenn die auf die zu messende Temperatur erhitzte Thonplatte sich bis zu der betreffenden Stelle einschieben lässt. Die Thonplatten sind indes sehr veränderlich, kommen z. B. nach einer Erhitzung nie auf ihr ursprüngliches Volumen zurück.

Das Luftthermometer ist dagegen ganz zuverlässig bis zu sehr hoher Temperatur, etwa 1500°. Man fertigt dann die Kugel aus Platin oder Porzellan, als Kapillare dient meist eine sehr enge Kupferöhre. Für noch höhere Temperatur wird es freilich auch unzuverlässig; Platin und Porzellan lassen dann die Luft durch.

Andere zuverlässige Methoden, die kalorimetrische (§ 146) und die elektrischen (§ 281 und § 304) werden wir später kennen lernen.

B. Aenderung des Aggregatzustandes.

§ 128. Wenn wir einen festen Körper immer mehr erwärmen, so dehnt er sich aus, seine Molekeln kommen in grössere Ent-