

Übergänge stattfinden. Dieses Schwächer- und Stärkerwerden beim Zusammenklingen zweier Töne nennt man Schwebungen oder Stöße; ihre Zahl ist immer gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne. Mehr als zwölf Schwebungen in der Sekunde werden nicht mehr einzeln wahrgenommen, sie bedingen dann die Rauigkeit des Akkords. Am unangenehmsten werden 33 Schwebungen in der Sekunde empfunden; darüber hinaus werden sie allmählich nicht mehr wahrgenommen. Eine einfache Rechnung zeigt, daß in der Tat bei den harmonisch klingenden Intervallen die Schwebungen stets weit von dieser Grenze entfernt bleiben.

Auf diese Schwebungen wurden früher auch die Differenz- oder TARTINISCHEN Töne zurückgeführt, deren Schwingungszahl ebenfalls gleich der Differenz der Schwingungszahlen der zwei ursprünglichen Töne ist. Nach HELMHOLTZ ist dies aber nicht richtig, schon deshalb nicht, weil es daneben auch Summationstöne gibt.

Man kann die Konsonanzen und Dissonanzen mittels der sog. LISSAJOUS'SCHEN Klangfiguren auch sichtbar machen. Stellt man nämlich zwei senkrecht zueinander schwingende Stimmgabeln, die beide an einer ihrer Zinken einen kleinen Spiegel tragen, so auf, daß ein Lichtstrahl von dem ersten Spiegel auf den zweiten und von dort auf einen Schirm reflektiert wird, so entstehen bestimmte Lichtfiguren. Schwingt nämlich nur eine Stimmgabel, so entsteht eine leuchtende gerade Linie; schwingen beide, so entsteht bei Gleichheit des Tons je nach der Phasendifferenz entweder eine gerade Linie oder ein Kreis oder eine Ellipse [vgl. § 146]. Sind dagegen die Stimmgabeln etwas verstimmt, so gehen diese Figuren wegen der nun wechselnden Phasendifferenz ineinander über. In gleicher Weise haben auch die anderen Konsonanzen charakteristische einfache Lichtfiguren, die bei Verstimmung der Stimmgabeln einen Wechsel zeigen.

§ 76. **Dopplers Prinzip.** Wenn die Entfernung zwischen einer Tonquelle und einem Beobachter rasch kleiner wird, so wird der Ton der ersteren höher. Dies ist leicht zu konstatieren bei dem Pfeifen einer sich nähernden Lokomotive. Von einer ruhenden Tonquelle aus gelangen nämlich in einer Sekunde eine bestimmte Zahl von Schallwellen ins Ohr des Beobachters; nähert sich aber die Tonquelle in einer Sekunde um x Meter, so kommen mehr Schallwellen zur Perception, nämlich auch die, welche sonst vom Beobachter noch x Meter entfernt wären. Entfernt sich die Tonquelle oder der Beobachter, so muß natürlich der Ton tiefer werden.

Wärmelehre.

A. Mechanische Wärmetheorie.

§ 77. **Wesen der Wärme.** Unter Wärme versteht man dasjenige Agens, welches bestimmte Nervenendigungen so reizt, daß wir eine

Temperaturempfindung haben. Früher nahm man einen Wärmestoff zwischen den Körpermolekülen an, der unter Umständen austreten, „frei werden“ könne. Dagegen sprechen aber viele Tatsachen. Graf RUMFORD zeigte zuerst, daß durch Rotation eines Kolbens in einem dicht anschließenden metallischen Hohlzylinder, also durch mechanische Arbeit, eine unbegrenzte Wärmemenge erzeugt werden kann; auch hat das Metall vor und nach der Reibung dieselbe Wärmekapazität, d. h. Fähigkeit, Wärme aufzunehmen. Nach der stofflichen Theorie könnte aber in den durch Druck verkleinerten Intermolekularräumen nicht mehr so viel Wärme aufgenommen werden wie vorher. Noch entscheidender war der Versuch von DAVY: Er brachte in einem Raume von 0° zwei Eisstücke allein dadurch zum Schmelzen, daß er sie aneinander rieb. Hier ist sogar die Wärmekapazität des entstandenen Wassers größer als die des Eises. Durch diese und andere Versuche wurde festgestellt, daß Wärme kein Stoff, sondern Energie ist, und zwar Energie der Körpermoleküle¹.

§ 78. **Wärme und mechanische Arbeit.** Da Wärme eine, wenn auch unsichtbare, Form der Energie ist, so müssen zwischen ihr und anderen Arten der Energie Beziehungen existieren. Es ist das unsterbliche Verdienst des Heilbronner Arztes ROBERT MAYER, durch scharfsinnige Deduktionen nachgewiesen zu haben (1842), daß die Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme stets nach unwandelbaren Gesetzen erfolgt. Gleichzeitig und unabhängig von ihm war der Engländer JOULE durch viele mühsame Versuche zu demselben Resultate gekommen. Bezeichnet 1 Meterkilogramm die Arbeit, die nötig ist, um 1 kg 1 m zu heben, und 1 (große) Kalorie die Wärmemenge, die nötig ist, 1 kg Wasser von 0° auf 1° zu erwärmen [§ 98], so ist nach diesen beiden Forschern 1 Kalorie äquivalent 427 Meterkilogrammen. (1. Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.) Will man also Wärme in Arbeitsmaß, durch das mechanische Äquivalent, ausdrücken, so multipliziert man mit 427; will man Arbeit durch ihr thermisches Äquivalent ausdrücken, so dividiert man durch 427. Diese Beziehung zwischen Wärme und Arbeit ist offenbar ein Spezialfall des großen Gesetzes von der Erhaltung der Energie².

¹ Bei den Gasen handelt es sich dabei fast ausschließlich um kinetische Energie, bei den festen und flüssigen Körpern ist daneben auch die potentielle Energie der Moleküle von Bedeutung. Im Gegensatz zum Schall sind die bei der Wärme (und dem Lichte) in Betracht kommenden Molekularbewegungen ungeordnet. [Vgl. §§ 105, 107, 135.] — ² Um eine (große) Kalorie in absoluten mechanischen Einheiten [§ 5] auszudrücken, setzt man für 1 Meterkilogramm den Wert 9,81 Joule ein [§ 12. Anmerkung]. Folglich 1 Kalorie = 427 · 9,81 Joule = 4188,87 Joule. Demnach 1 Grammkalorie [§ 98] = 4,19 Joule = 4,19 · 10⁷ Erg. Andererseits 1 Joule = 0,24 Grammkalorien.

Äquivalenzwert bei Wasser = 69 Kalorien

Während nun Arbeit stets und vollständig in Wärme verwandelt werden kann, läßt sich der Wärmeinhalt eines Körpers nur dann in Arbeit überführen, wenn der betr. Körper heißer ist als seine Umgebung, und auch dann nur teilweise; ein anderer Teil der Wärme sinkt dabei unausgenutzt zu tieferer Temperatur herab. Oder, wie CLAUDIUS umgekehrt sagte: Wärme kann ohne Arbeitsverbrauch nicht von einem kühleren auf einen wärmeren Körper übergehen. Man bezeichnet diese Einschränkungen zum 1. Hauptsatz als sog. 2. Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Soweit danach Wärme in Arbeit verwandelt werden kann, gilt das Äquivalenzgesetz des 1. Hauptsatzes. Zur Erläuterung des Gesagten diene noch folgendes: Um einem Körper seinen gesamten Wärmevorrat zu entziehen, müßte man ihn bis zum absoluten Nullpunkt [§ 83] abkühlen, was unmöglich ist, wie überhaupt schon die Darstellung tieferer Temperaturen in der Praxis auf große Schwierigkeiten stößt. Zweitens geht aber auch innerhalb der wirklich in Betracht kommenden Temperaturbreiten stets ein Teil des Wärmevorrats für die Umwandlung in Arbeit dadurch verloren, daß alle Körper beständig durch Leitung und Strahlung Wärme an ihre Umgebung abgeben, wodurch eben ihre für den Umwandlungsprozeß maßgebende Anfangstemperatur sinkt. Es findet also eine Zerstreung (Dissipation) bzw. Entwertung (Degradation) von nützlicher Wärme statt, und es bleibt immer weniger Wärme für Rückverwandlung in mechanische Arbeit übrig. Da nun alle Energieformen die Tendenz haben, sich schließlich in die als Wärme charakterisierte ungeordnete Molekularbewegung zu verwandeln, muß es nach dem Gesagten allmählich dahin kommen, daß die Welt in den Zustand des „Wärmetodes“ gelangt. Man drückt diesen Gedanken oft auch so aus: Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu, wobei Entropie¹ eben den „Zerstreungsgrad“ der Energie bzw. die Summe der entwerteten Energie bedeutet. Zuletzt würden also überhaupt keine Temperaturunterschiede mehr bestehen, somit auch die Grundlage für Rückgewinnung mechanischer und andersartiger Energie fehlen.

§ 79. **Wärme durch chemische Vorgänge.** Mehr noch als durch mechanische Arbeit entsteht auf der Erde Wärme durch chemische Prozesse. Besonders kommen hier die Verbindungen von Körpern mit Sauerstoff (Verbrennungen) in Betracht. So entsteht z. B. bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff eine Wärme von 34000 (großen) Kalorien. Diese ist der Ausdruck dafür, daß vorher getrennte Mole-

¹ Von *ἐντροπία* umwenden, umwandeln. Im Sinne von CLAUDIUS, der das Wort geschaffen, bezeichnet Entropie eine bestimmte, hier nicht näher zu erörternde, rechnerische Größe, die mit dem nicht in Arbeit verwandelbaren Teil der Wärme wächst.

küle, die eine große Affinität zueinander besitzen, mit großer Heftigkeit aneinanderprallen und in stürmische Schwingungen geraten. Auf der Verbrennung der eingeführten Nahrungsmittel bzw. der Körperbestandteile beruht die Eigentemperatur der Organismen, die auch den sogenannten Kaltblütern zukommt. — Seltener als solche exothermischen Prozesse, bei denen also Wärme frei wird, sind endothermische Prozesse, bei denen Wärme gebunden wird. — Auch beim Zerfall radioaktiver Elemente [§ 210] werden erhebliche Wärmemengen frei.

§ 80. **Sonnenwärme.** In letzter Linie stammt alle Erdwärme von der Sonne ab. So wird u. a. die Strahlungsenergie der Sonne in den Pflanzen in potentielle chemische Energie umgewandelt, indem mit Hilfe des Chlorophylls die komplizierten Verbindungen aufgebaut werden, durch deren Verbrennung der tierische Organismus seine Wärme erhält; und auf dieselbe Quelle sind die unermesslichen Wärmevorräte der Steinkohlenlager zurückzuführen, welche letztere ja durch langsame Vermoderung fossiler Pflanzen unter Luftabschluß entstanden sind. Über die Entstehung der Sonnenwärme gibt es natürlich nur Hypothesen. Viele nehmen mit KANT-LAPLACE an, daß durch Rotation von Nebelmassen glühende Weltkörper entstanden seien, die sich allmählich von der Rinde zum Zentrum abkühlen. Während die Sonne noch im ersten Stadium ist, hat sich die Erde bis auf einen feurigen Kern schon abgekühlt, und im Monde ist dieser Prozeß bereits ganz beendigt. Jedenfalls kann die Verdichtung, welche diese Abkühlung begleiten muß, mit Recht als ungeheuer große Wärmequelle angesehen werden. Die Sonnenwärme wird aber wahrscheinlich auch dadurch, trotz der großen Ausstrahlung, erhalten, daß fortwährend ungezählte kleine Weltkörper, Asteroiden, in sie hineinstürzen, wobei wiederum mechanische Arbeit in Wärme übergeht.

B. Ausdehnung durch Wärme.

§ 81. **Ausdehnungskoeffizient.** Mit wenigen Ausnahmen werden alle Körper durch Wärme ausgedehnt und umgekehrt durch Kälte zusammengezogen. Am meisten dehnen sich die Gase aus, weniger die flüssigen, und am wenigsten die festen Körper. Die Zahl, welche angibt, welchen Bruchteil der ursprünglichen Größe die Ausdehnung pro Grad der Temperaturerhöhung beträgt, heißt Ausdehnungskoeffizient (α). Dieser ist von der Natur der betreffenden Substanz abhängig. Man unterscheidet einen linearen, wenn die Ausdehnung nur in einer Richtung erfolgt (nur bei festen Körpern möglich), und einen kubischen; letzterer beträgt das Dreifache des ersteren.

Dehnt sich nämlich jede Seite eines Würfels um α aus, so wird sie $1 + \alpha$. Das Volumen des ganzen Würfels wird also $(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$. Da aber α für feste Körper schon sehr klein ist ($< 0,0001$), so können die höheren Potenzen unberücksichtigt bleiben. Auch der kubische Ausdehnungskoeffizient wird kurzweg mit α bezeichnet.

Mit Rücksicht auf die Ausdehnung durch Erwärmung werden z. B. bei Eisenbahnschienen kleine Zwischenräume gelassen und bei Pendeluhrn sog. Kompensationspendel angewandt [Seite 28]. Auch beruhen darauf die Metallthermometer.

Dieselben bestehen aus einem langen spiralig gewundenen Streifen, der aus zwei oder drei Metallen zusammengesetzt ist, und dessen Krümmung bei Erwärmung zunimmt. Sein eines Ende ist fest, das andere beweglich und mit Zeiger versehen; letzterer spielt vor einer nach Celsiusgraden eingeteilten Skala.

Bei Flüssigkeiten, die in Gefäßen eingeschlossen sind, wird nur die scheinbare Ausdehnung beobachtet, d. h. die Differenz der Ausdehnung des Gefäßes und derjenigen der Flüssigkeit. Die wahre Ausdehnung von Flüssigkeiten kann man u. a. mittels kommunizierender Röhren bestimmen.

Wird der eine Schenkel kommunizierender Röhren auf der Temperatur 0 erhalten (indem man ihn z. B. mit schmelzendem Eis umgibt), der andere auf t° erwärmt, so wird eine Flüssigkeit, z. B. Quecksilber, in beiden Schenkeln verschieden hoch stehen. Dann verhalten sich die Volumina der Flüssigkeit in beiden Schenkeln wie die Höhen, $\frac{v}{v_0} = \frac{h}{h_0}$, wobei v_0 und h_0 Volumen bzw. Höhe bei 0° , v und h bei t° bedeuten. Nun ist nach § 82 $v = v_0(1 + \alpha t)$. Daraus folgt $1 + \alpha t = \frac{h}{h_0}$ und $\alpha = \frac{1}{t} \cdot \frac{h - h_0}{h_0}$.

§ 82. Ausdehnung der Gase. Während feste und flüssige Körper sich nicht ganz regelmäßig ausdehnen, dehnen sich alle Luftarten fast ganz gleichmäßig aus, nämlich für jeden Grad Celsius um $\frac{1}{273}$ ihres Volumens bei 0° (Gesetz von GAY-LUSSAC). Hat also ein Gas bei 0° das Volumen v_0 , dann hat es bei 1° das Volumen $v_0 + \alpha v_0$, bei t° das Volumen $v_0 + t\alpha v_0$. Es ist also

$$v_t = v_0(1 + \alpha t).$$

In Worten: bei gleichbleibendem Drucke sind die Gasvolumina der Temperaturzunahme proportional. Bleibt dagegen das Volumen unverändert, so wächst der Druck des Gases für jeden Grad der Temperaturzunahme um $\frac{1}{273}$ des Druckes bei 0° . Es ist also

$$p_t = p_0(1 + \alpha t).$$

In Worten: bei gleichbleibendem Volumen sind die Gasdrücke der Temperaturzunahme proportional. Diese beiden Gesetze kann man zusammen mit dem BOYLE-MARIOTTESchen Gesetz [§ 48] durch eine einzige Formel ausdrücken, nämlich

$$pv = p_0v_0(1 + \alpha t).$$

22,4 Liter pro Mol
 74
 min.

$R = \frac{22,4}{273} = 0,082$

Ist $p = p_0$ bzw. $v = v_0$, so erhält man daraus ja sofort obige Gleichungen. Für den Fall $t = 0$ (d. h. bei gleichbleibender Temperatur) ergibt sich daraus das MARIOTTESCHE Gesetz, $p v = p_0 v_0$.

§ 83. **Absoluter Nullpunkt.** Die gewöhnliche Unterscheidung zwischen Wärme und Kälte ist offenbar ganz willkürlich. Beide sind nur quantitativ, nicht qualitativ voneinander verschieden. Da Wärme auf Molekularbewegung beruht, so kann von einem Nullpunkt der Wärme nur die Rede sein, wenn keine derartige Bewegung mehr stattfindet. Nach der kinetischen Gastheorie [§ 45] könnte dann das Gas aber auch keine Spannung mehr haben, da ja der ausgeübte Druck nur ein Folge der Molekularbewegung ist. Es würde also $p_0 (1 + \alpha t) = 0$. Da nun p_0 , der Druck bei 0° , eine bestimmte Größe ist, so würde der andere Faktor dieses Produktes $1 + \alpha t = 0$, woraus $t = -273$ folgt¹. Der absolute Nullpunkt liegt also bei -273° . Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, tiefere Temperaturen als -270° herzustellen. Zur Umwandlung gewöhnlicher Temperaturangaben in absolute Temperaturen hat man nur 273 zu addieren. Bezeichnet man $273 + t$, also die absolute Temperatur, mit T und berücksichtigt, daß $1 + \alpha t = 1 + \frac{t}{273} = \frac{273 + t}{273}$, so lauten obige Formeln

$$\begin{aligned}
 v &= v_0 (1 + \alpha t) = \frac{v_0 T}{273} \\
 p &= p_0 (1 + \alpha t) = \frac{p_0 T}{273} \\
 p v &= \frac{p_0 v_0 T}{273}
 \end{aligned}$$

absolute Temperatur

Bezeichnet man die Konstante $\frac{p_0 v_0}{273}$ mit R , so nimmt das BOYLE-MARIOTTE-GAY-LUSSACSCHE Gesetz die einfache Form an

$$p v = R T.$$

Bei gleichbleibendem Druck sind also die Volumina, bei gleichbleibendem Volumen die Spannungen der Gase direkt proportional der absoluten Temperatur.

Man nennt obige Gleichung die Zustandsgleichung der Gase, weil durch sie der Zustand einer Gasmenge bestimmt wird. Sie ist übrigens nur annähernd richtig [vgl. § 48].

§ 84. **Ausdehnung des Wassers.** Das Wasser bildet eine bemerkenswerte Ausnahme von obigem Gesetze. Wenn es bei 0_0 erwärmt wird, so dehnt es sich nicht aus, sondern zieht sich zusammen, bis es bei 4° Celsius seine größte Dichtigkeit erreicht hat. Von da an

¹ In Wirklichkeit existiert bei dieser Temperatur kein gasförmiger Körper, da er schon vorher verflüssigt wird.

*Gefüge von Wasserfall...
 Wasser dehnt sich aus...
 ...*

dehnt es sich wieder aus. Diese Eigenschaft ist sehr wichtig für die im Wasser lebenden Organismen, da sonst stillstehende oder langsam fließende Gewässer bis auf den Grund gefrieren würden. So aber kühlt sich die oberste Schicht bis auf 4° ab und sinkt infolge ihrer größeren Dichte und Schwere nach unten. Die wärmeren Schichten steigen herauf und werden auch allmählich abgekühlt. Schließlich bleiben die kälteren Schichten oben, ebenso wie das Eis, welches spezifisch noch leichter als Wasser von 0° ist und somit eine schützende Decke bildet. Dies gilt aber nur für stehende Gewässer, da strömendes Wasser sich auch auf 0° und darunter abkühlen kann, ohne zu gefrieren. In diesem Falle kann durch Berührung mit dem Boden sogenanntes *Grundeis* entstehen. — Manche feste Körper zeigen ebenfalls bei Temperaturzunahme eine Zusammenziehung (allerdings nur in bestimmter Richtung), z. B. gedehnter Kautschuk und Jodsilber.

§ 85. **Thermometer.** Da die Ausdehnung der Körper durch die Wärme proportional der Erwärmung erfolgt, dient sie zur Temperaturmessung. Gewöhnlich benutzt man Quecksilberthermometer, da Quecksilber sich ziemlich regelmäßig ausdehnt [vgl. § 81 scheinbare Ausdehnung]. Ein gewöhnliches Thermometer besteht aus einem Gefäß mit Quecksilber und einer damit verbundenen luftleeren, kapillaren Röhre, neben der eine Skala angebracht ist. Die Röhre wird bei der Herstellung zugeschmolzen, nachdem durch Kochen des eingefüllten Quecksilbers alle Luft vertrieben ist. Als Fundamental- oder Fixpunkte wählt man gewöhnlich den Gefrierpunkt und Siedepunkt des Wassers¹. Oberhalb des Gefrier- oder Eispunktes, der mit 0 bezeichnet wird, gibt das Thermometer Wärmegrade an, unter demselben sog. Kältegrade [vgl. § 83]. Als Empfindlichkeit des Quecksilberthermometers bezeichnet man die Längenverschiebung des Quecksilberfadens für 1° Temperaturerhöhung. Den Abstand zwischen beiden Fundamentalpunkten teilte REAUMUR in 80 Grade, CELSIUS in 100; letztere Einteilung ist jetzt allgemein üblich. Nur in England und seinen Kolonien gebraucht man die Einteilung nach FAHRENHEIT. Hier wird als Nullpunkt die Temperatur einer bestimmten Mischung von Kochsalz, Schnee und Salmiak angenommen; von hier bis zum Gefrierpunkt des Wassers sind 32 Grad, von diesem bis zum Siedepunkt des Wassers 180, im ganzen also 212 Grad.

Folgende Tabelle dient zur Umrechnung:

$$\begin{aligned} n^{\circ} (C) &= \frac{4}{5} n^{\circ} (R) = \frac{9}{5} n^{\circ} + 32^{\circ} (F) \\ n^{\circ} (R) &= \frac{5}{4} n^{\circ} (C) = \frac{9}{4} n^{\circ} + 32^{\circ} (F) \\ n^{\circ} (F) &= \frac{5}{9} (n^{\circ} - 32^{\circ}) (C) = \frac{1}{9} (n^{\circ} - 32^{\circ}) (R). \end{aligned}$$

¹ Genauer: Die Temperaturen des schmelzenden Eises und der Dämpfe des (bei 760 mm Druck) siedenden Wassers, weil diese konstant sind, während das, ja nicht immer reine, Wasser eventuell eine Gefrierpunktserniedrigung bzw. Siedepunkterhöhung zeigt [§§ 89, 90].

Da Quecksilber bei $-38,5^{\circ}$ gefriert, ersetzt man es bei tiefen Temperaturen durch Weingeist, oder noch besser durch Petroläther, Xylol oder Pentan. Auch für hohe Temperaturen eignen sich gewöhnliche Quecksilberthermometer nicht; fertigt man sie jedoch aus geschmolzenem Quarz statt aus Glas an, so kann man sie bis zu 750° benutzen. Die Messung höchster Temperaturen (sog. Pyrometrie) erfordert besondere Vorrichtungen bzw. Verfahren. Man erhitzt z. B. einen schwer schmelzbaren Körper auf die zu bestimmende Temperatur und bestimmt diese dann kalorimetrisch [§ 99]; oder man mißt die Helligkeit eines glühenden Körpers („optische Pyrometer“) usw. — Für alle Temperaturen, sowohl hohe wie niedrige, geeignet sind Metallthermometer [§ 81], Gasthermometer [s. u.], sowie Thermoelemente [§ 184]. — Um die höchsten bzw. niedrigsten Temperaturen während eines bestimmten Zeitraumes anzuzeigen, dienen die Maximum- und Minimumthermometer.

Eine für meteorologische Zwecke gebräuchliche Konstruktion derselben zeigt z. B. Fig. 71. In dem schraffierten Teile des Apparates ist Weingeist, dazwischen ein Quecksilberfaden. Über beiden Enden des letzteren befindet sich je ein mit federnden Glasfäden versehener Eisenstift, an dem zwar der dünnflüssige Weingeist, aber nicht das dickflüssige Quecksilber vorbei kann. Steigt also auf der einen Seite das Quecksilber (was rechts bei Erwärmung des Weingeistes im Thermometergefäß *T*, links bei Abkühlung desselben erfolgt), so schiebt es den betr. Eisenstift vor; fällt das Quecksilber, so bleibt der Stift an seiner Stelle liegen. Das untere Ende des rechten Stiftes zeigt somit die höchste, das des linken die niedrigste Temperatur während einer bestimmten Zeit an. Die Zurückführung der Stifte an die Enden des Quecksilberfadens erfolgt mit Hilfe eines Magneten.

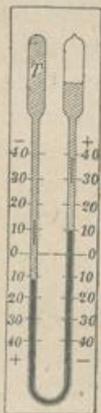


Fig. 71.

Bei den medizinisch verwendeten Maximumthermometern (Fieberthermometern), die gewöhnlich mit Quecksilber gefüllt sind, besitzt die Kapillare unten eine Verengung. Diese hindert nicht die mit großer Kraft erfolgende Ausdehnung des Quecksilbers; dagegen reißt bei der Abkühlung an dieser Stelle der Quecksilberfaden ab, weil sich nur der untere Teil zusammenzieht, während der obere Teil die Verengung nicht passieren kann. Bei einer anderen Konstruktion ist der obere Teil des Quecksilberfadens durch ein Luftbläschen von dem übrigen Quecksilber getrennt und wird beim Steigen des Quecksilbers vorgeschoben, während er beim Fallen an der erreichten Stelle liegen bleibt. Nach Gebrauch wird durch Schütteln der abgetrennte Teil zurückgebracht.

Für manche Zwecke sind den Flüssigkeitsthermometern die Gas-thermometer vorzuziehen. Dieselben sind sehr empfindlich und genau, da Gase sich stark und dabei gleichmäßig ausdehnen; auch können sie für alle Temperaturen benutzt werden. Sie dienen hauptsächlich für wissenschaftliche Untersuchungen, während sie für die Praxis nicht in Betracht kommen, da die Temperatur nicht einfach

*Legenreihe
Original beim
Prinzillumbaum*

abgelesen, sondern erst berechnet wird. Gewöhnlich nimmt man zu ihrer Füllung Luft oder Wasserstoff, für tiefste Temperaturen auch Helium.

Fig. 72 zeigt das gebräuchliche JOLLY'sche Gasthermometer. Von dem mit Luft usw. gefüllten Gefäß V führt die Kapillarröhre c zur Glasröhre b , die wieder durch einen Schlauch mit der Glasröhre a in Verbindung steht. a und b sind an einem Stativ verschieblich und zum Teil mit Quecksilber gefüllt, das auch den Verbindungsschlauch ausfüllt. In b ist bei a eine Glasspitze eingeschmolzen. Taucht man V in schmelzendes Eis und stellt durch Verschiebung von a die linke Quecksilberkuppe so ein, daß sie a berührt, so ist der Druck des über ihr befindlichen Gases (p_0) gleich dem Barometerstand plus der Höhendifferenz beider Quecksilbersäulen. Erhitzt man dann das Gefäß V auf die Temperatur t , so sucht sich das Gas auszudehnen. Verhindert man dies, indem man a so weit verschiebt, daß die Quecksilberkuppe in b wieder a berührt, so ist jetzt der Druck des Gases (p_t) gleich dem Barometerstand plus der jetzigen Höhendifferenz beider Quecksilbersäulen. Aus der Formel $p_t = p_0 (1 + \alpha t)$ [§ 82] ergibt sich dann $t = \frac{p_t - p_0}{\alpha p_0}$. Hierzu kommen für genaue Messungen noch verschiedene Korrekturen, z. B. Berücksichtigung der Ausdehnung des Glasbehälters, Reduktion der Quecksilberhöhe auf 0° usw.

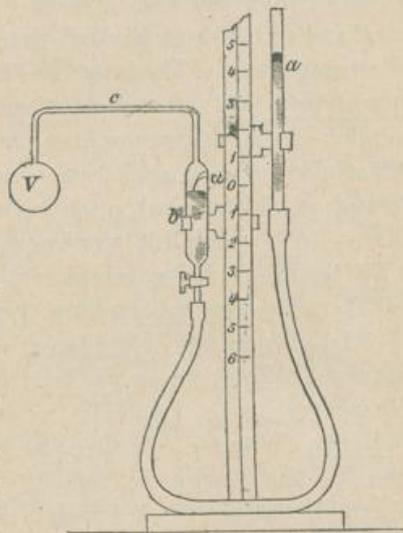


Fig. 72.

Noch feinere Temperaturmessungen lassen sich mit dem Bolometer [§ 178] und mit Thermoelementen [§ 184] ausführen.

§ 86. Luftströmungen. Bei der Ausdehnung durch Wärme muß das spezifische Gewicht eines Körpers abnehmen, da ja dieselbe Masse auf einen größeren Raum verteilt wird. Daraus folgt, daß z. B. in einer Stube die wärmere Luft stets nach oben strömen wird. Darauf beruht auch eine Art der Ventilation, indem in eine Öffnung an der Decke eine Flamme gestellt wird. Auf die ungleiche Erwärmung der Luft und die dadurch bedingte Verschiedenheit des Luftdrucks sind auch die Winde zurückzuführen. So entstehen z. B. die Passate dadurch, daß am Äquator die erwärmte Luft in die Höhe steigt und zu ihrem Ersatze von den Polen her Luft dahin strömt. Analog lassen sich die Winde erklären, die von der Küste nach der See und umgekehrt wehen.

C. Änderung des Aggregatzustandes.

§ 87. **Schmelzen und Gefrieren.** Führt man einem festen Körper Wärme zu, so steigt seine Temperatur bis zum Schmelzpunkte, d. h. bis zu dem Punkte, wo er anfängt, in den flüssigen Aggregatzustand überzugehen. Dieser Übergang vom festen in den flüssigen Zustand unter dem Einfluß der Erwärmung heißt eben Schmelzen, der umgekehrte Vorgang Erstarren oder Gefrieren. Schmelzpunkt und Erstarrungspunkt sind in der Regel identisch und nur bezüglich des Ausgangspunktes verschieden. Allerdings können manche Flüssigkeiten in geschlossenen ganz reinen Gefäßen, die vor Erschütterung geschützt sind, auch bis unter den Gefrierpunkt (Wasser z. B. bis -10°) abgekühlt werden, ohne zu erstarren. Derartige unterkühlte Flüssigkeiten erstarren jedoch sofort, wenn ein festes Stoffteilchen hineingebracht wird [vgl. § 43].

*überkühlt
unterkühlt
überkühlt*

Ist einmal der Schmelzpunkt erreicht, so steigt trotz aller Wärmezufuhr die Temperatur des betr. Körpers nicht eher an, bis seine ganze Masse verflüssigt ist. Die hierzu nötige Wärme nannte man früher latente Wärme, da sie ja scheinbar verschwindet. Sie leistet aber eine bestimmte innere Arbeit, indem sie die Moleküle so weit voneinander entfernt, wie es eben für den flüssigen Zustand charakteristisch ist; man nennt sie daher heute besser Schmelzwärme. Umgekehrt wird beim Erstarren einer Flüssigkeit Wärme frei, da für die verminderte potentielle Energie der Moleküle ihre kinetische größer wird; und zwar entspricht die Menge dieser Wärme genau der Schmelzwärme.

Unter Schmelzwärme im engeren Sinne versteht man die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 gr eines festen Körpers in den flüssigen Zustand zu bringen. Die Schmelzwärme ist am größten beim Eis, nämlich ca. 80 Kalorien [vgl. §§ 98, 100].

Der Schmelzpunkt (bzw. Gefrier- oder Erstarrungspunkt), d. h. also die Temperatur, bei der die Verflüssigung eines festen (bzw. Erstarrung eines flüssigen) Körpers beginnt, ist für jeden Stoff bei bestimmtem äußeren Druck [§ 88] eine konstante Größe; bei Atmosphärendruck z. B. für Wasserstoff -259° , Kohlenoxyd -207° , Alkohol -90° , Quecksilber $-38,5^{\circ}$, Äther -32° , Wasser 0° , Wachs $+63,5^{\circ}$, Blei $+327^{\circ}$, Platin $+1770^{\circ}$, Iridium 2300° .

Der Schmelzpunkt von Metalllegierungen (die man auch als feste Lösungen bezeichnen kann) ist im allgemeinen tiefer als der aus den einzelnen Bestandteilen zu berechnende Durchschnittswert, oft sogar tiefer als der Schmelzpunkt des am leichtesten schmelzbaren Bestandteils [vgl. § 89].

§ 88. **Druck und Schmelzpunkt.** Mit wenigen Ausnahmen dehnen sich die Körper beim Schmelzen aus, während beim Erstarren sich ihr Volumen verringert. Die Erwärmung repräsentiert also gewissermaßen eine zentrifugale Kraft: sie entfernt die Körpermoleküle voneinander. Im Gegensatz dazu ist äußerer Druck eine zentripetale Kraft: durch

Kompression (wie auch durch Abkühlung) werden die Körpermoleküle genähert. Hieraus folgt, daß äußerer Druck den Übergang vom festen in den flüssigen (und analog auch vom flüssigen in den gasförmigen) Zustand erschweren muß, weil er ja der Ausdehnung der Moleküle entgegenwirkt. Mit anderen Worten, es wird jetzt mehr Wärmezufuhr nötig sein, um den für den flüssigen Zustand charakteristischen Abstand der Moleküle zu erzielen; das Schmelzen erfolgt jetzt bei höherer Temperatur. Andererseits muß natürlich Druck das Erstarren von Flüssigkeiten (und analog auch die Verflüssigung gasförmiger Körper) begünstigen.

Eine Ausnahme hiervon bilden die wenigen Körper, die in flüssigem Zustande ein kleineres Volumen besitzen als im festen. Hierzu gehört vor allem Wasser [§ 84], ferner Wismut, Antimon usw. Wenn Wasser sich in Eis verwandelt, dehnt es sich dabei aus, und zwar mit einer enormen Gewalt. Umgekehrt zieht sich Eis beim Schmelzen zusammen, ein Prozeß, der offenbar durch Druck begünstigt werden muß, daher erniedrigt Druck den Schmelzpunkt des Eises. So kann man Eis unter hohem Druck beliebig formen (sog. Plastizität des Eises). Ferner beruht das Fließen der Gletscher darauf. Die Eismassen der Gletscher erfahren in engen Schluchten einen solchen Druck, daß trotz der großen Kälte eine Schmelzung stattfindet und der Gletscher fließt. Kommt er in breitere Bahnen, so gefrieren die Eismassen wieder (Regelation).

§ 89. **Gefrierpunktserniedrigung.** Zur Überführung eines festen Körpers in den flüssigen Zustand ist, wie gezeigt wurde, Arbeit nötig. Diese kann von außen durch Zufuhr von Wärme geleistet werden. Ein fester Körper kann sich aber auch spontan in einer Flüssigkeit auflösen, dann entzieht er die dazu nötige Wärme („Lösungswärme“) seiner Umgebung; es entsteht somit Abkühlung. Darauf beruhen u. a. die Kältemischungen. Bringt man z. B. gleiche Teile fein gestoßenes Eis und Kochsalz zusammen, so verändern beide ihren Aggregatzustand, es entsteht eine Flüssigkeit von geringerer Temperatur (-20°). Andere Kältemischungen sind z. B. Eis und Schwefelsäure (-50°), feste Kohlensäure und Äther (-80°). Bei manchen Lösungen findet allerdings eine Temperaturerhöhung statt; dann handelt es sich aber um chemische Verbindungen, z. B. beim Auflösen von Natrium in Wasser.

Ebenso wie Legierungen einen niedrigeren Schmelzpunkt haben [§ 87], ist auch der Gefrierpunkt einer Lösung erniedrigt. Meerwasser gefriert z. B. bei -2° . Die Gefrierpunkts- (bzw. Schmelzpunkts-) Erniedrigung (gewöhnlich mit Δ bezeichnet und mittels des BECKMANNschen Apparates leicht zu finden) ist nun erfahrungsgemäß für eine bestimmte Lösung proportional ihrer Konzentration.

Diejenige Gefrierpunktserniedrigung nun, die 1 Gramm Substanz in 100 Gramm Lösungsmittel bewirkt, heißt nach **RAOULT** reduzierte oder spezifische Gefrierpunktserniedrigung.

Bedingen c Gramm Substanz in 100 Gramm Lösungsmittel gelöst eine Gefrierpunktserniedrigung Δ , so ist die reduzierte Gefrierpunktserniedrigung $t = \frac{\Delta}{c}$. Die reduzierten Gefrierpunktserniedrigungen, die zwei Substanzen in einem und demselben Lösungsmittel unter sonst gleichen Verhältnissen bedingen, sind umgekehrt proportional den Molekulargewichten beider Substanzen. $t:t' = m':m$. (**RAOULTS**ches Gesetz). Anders ausgedrückt: Das Produkt aus Molekulargewicht (m) eines gelösten Stoffes und der reduzierten Gefrierpunktserniedrigung (t) ist eine nur von der Natur des Lösungsmittels, nicht der gelösten Substanz, abhängige Konstante (k) und dient daher zur Bestimmung des Molekulargewichts. Letzteres ergibt sich ja ohne weiteres aus der Formel $mt = m't' = k$, wenn eben t bzw. t' und k bekannt sind. Den Wert von t erhält man aus $\frac{\Delta}{c}$ (s. o.); k kann für jedes Lösungsmittel durch Auflösen einer Substanz von bekanntem Molekulargewicht gefunden werden. Für Wasser ist z. B. $k = 18,5$, für Benzol 49.

Durch die Gefrierpunktserniedrigung Δ kann man aber auch die Anzahl der gelösten Moleküle, d. h. die molekulare Konzentration einer Lösung bestimmen. Da nämlich das Gewicht einer Substanz gleich dem Produkt aus der Anzahl ihrer Moleküle und dem Molekulargewicht ist, folgt daraus, daß die Zahl ihrer Moleküle dem Quotienten aus dem Gewicht der Masse und dem Molekulargewicht, $\frac{c}{m}$, entspricht. $\frac{c}{m}$ ist also hier die Zahl der gelösten Moleküle in 100 Gramm Lösungsmittel. Aus den obigen Formeln $mt = \frac{m\Delta}{c} = k$ ergibt sich $\frac{c}{m} = \frac{\Delta}{k}$. Da k eine Konstante ist (s. o.), folgt andererseits, daß Lösungen gleicher molekularer Konzentration („äquimolekulare Lösungen“) auch dieselbe Gefrierpunktserniedrigung haben müssen, was auch durch Versuche bestätigt ist. Aus der molekularen Konzentration einer Lösung kann man wieder ihren osmotischen Druck berechnen [§ 44].

Die Lehre von den Gesetzen der Gefrierpunktserniedrigung, auch **Kryoskopie**¹ genannt, findet u. a. auch in der Medizin Anwendung.

§ 90. **Sieden**. Der Übergang eines (in der Regel flüssigen) Körpers in den dampf- (gas-, luft-) förmigen Zustand wird mit dem allgemeinen Ausdruck Verdampfung bezeichnet. Hierbei kann es sich um zwei ganz verschiedene Vorgänge handeln, um Sieden und Verdunsten.

Unter Sieden versteht man die bei einem bestimmten Temperaturpunkt (Siedepunkt) erfolgende schnelle Verdampfung einer Flüssigkeit, wobei die Dampfbildung in der Regel auch im Innern der Flüssigkeit vor sich geht. Voraussetzung für letzteres ist das Vorhandensein von (zunächst unsichtbaren) Luft- bzw. Gasbläschen in der Flüssigkeit, in welche hinein die Verdampfung erfolgt, so daß sie sich vergrößern und aufsteigen, wodurch der molekulare Zusammenhang gelockert wird und das sog. Kochen entsteht.

¹ κρύος Kälte, σκοπέω beobachten.

Siedepunkt nennt man, wie bereits erwähnt, die Temperatur, bei der das Sieden beginnt. Während des Siedens steigt trotz aller Wärmezufuhr die Temperatur der Flüssigkeit nicht an, bis die ganze Flüssigkeit in Dampf verwandelt ist. Die „latent“ gewordene Wärme (bezogen auf 1 gr der Flüssigkeit) bezeichnet man hier analog der Schmelzwärme [§ 87] als Verdampfungswärme; sie dient eben dazu, die Moleküle so weit auseinanderzubringen, wie es für den gasförmigen Zustand erforderlich ist.

Da beim Übergang in den gasförmigen Zustand eine starke Volumsvergrößerung stattfindet, folgt daraus, daß zwischen Druck und Siedepunkt analoge Beziehungen bestehen müssen, wie zwischen Druck und Schmelzpunkt [§ 88]. Bei gleichbleibendem Druck ist der Siedepunkt für dieselbe Substanz konstant; gewöhnlich wird er für 760 mm Barometerstand angegeben.

Der normale Siedepunkt beträgt z. B. für Helium $-268,7^{\circ}$ für Wasserstoff $-252,6^{\circ}$, für Luft $-191,4^{\circ}$, für Äther $+35^{\circ}$, für Alkohol $+78,4^{\circ}$, für Quecksilber $+357^{\circ}$.

Vermehrter äußerer Druck muß den Siedepunkt erhöhen, verminderter Druck ihn erniedrigen. In der Tat siedet z. B. Wasser auf dem Montblanc, wo ein Luftdruck von 420 mm Hg herrscht, schon bei 84° , und unter der Luftpumpe je nach der Verdünnung bei noch viel niedrigeren Temperaturen. Diese Abhängigkeit vom Druck geht noch deutlicher hervor, wenn man als Siedepunkt die Temperatur definiert, bei der die Spannung des gebildeten Dampfes, der sog. Sättigungsdruck [§ 93], den auf der Flüssigkeit lastenden (Atmosphären-) Druck überwindet. Einem geringeren Sättigungsdruck muß daher ein höherer Siedepunkt entsprechen. Andererseits kann man z. B. den Siedepunkt erhöhen, wenn man eine Flüssigkeit in einem fest verschlossenen Gefäße („PAPINScher Topf“, auch Autoklav oder Dampfkochtopf genannt) erhitzt; denn dann kann der Dampf nicht entweichen und vermehrt so den Druck im Innern des Gefäßes.

Bei Lösungen ist im allgemeinen der Siedepunkt im Vergleich zu dem des reinen Lösungsmittels erhöht; dies und die Erniedrigung des Gefrierpunktes kann man so deuten, daß die Salzmoleküle in Lösungen die freie Beweglichkeit der Moleküle des Lösungsmittels behindern. Jedenfalls ist die Gefrierpunktserniedrigung und Siedepunktserhöhung ebenso wie der osmotische Druck nicht von der Art, sondern von der Zahl der Moleküle abhängig [vgl. § 44 und 89]. Äquimolekulare Lösungen haben gleiche Siedepunktserhöhung. Auch die Siedepunktserhöhung wird in ähnlicher Weise wie die Gefrierpunktserniedrigung zur Bestimmung der Molekulargewichte benutzt.

§ 91. Siedeanomalien. Vollständig gasfreie Flüssigkeiten (z. B.

bereits mehrfach ausgekochtes Wasser und namentlich Schwefelsäure in glattwandigen Gefäßen) zeigen keine Blasenbildung beim Erhitzen (s. o.), sondern verdampfen nur von der Oberfläche aus. Sie können mehrere Grade über den Siedepunkt erhitzt werden, ohne zu verdampfen, was man Siedeverzug oder Überhitzung nennt. Die Verdampfung erfolgt in solchen Fällen plötzlich, stoßweise, namentlich bei einer kurzen Erschütterung. Hierdurch kann es zu Kesselexplosionen usw. kommen. Man beugt dem durch Hineinbringen eines rauhen bzw. pulverförmigen Körpers vor, an dem sich Gasblasen bilden.

Eine andere Siedeanomalie ist das sog. LEIDENFROSTSCHE Phänomen. Kommt eine Flüssigkeit mit sehr heißen Metallen in Berührung, so bildet sich um sie eine Dampfhülle, die ein eigentliches Sieden verhindert. Bei geringer Flüssigkeitsmenge entsteht ein flachgedrückter Tropfen, der hin und herspringt („sphäroidaler Zustand“); er ruht gewissermaßen auf einem elastischen Polster, nämlich der Dampfhülle. Erst bei genügender Abkühlung, wenn die Spannung des Dampfes so klein geworden ist, daß er das Gewicht des Tropfens nicht mehr aushält, verpufft derselbe.

§ 92. Verdunsten. Das Verdunsten ist ein spontanes Verdampfen von Flüssigkeit, das nur an der freien Oberfläche erfolgt und nicht an eine bestimmte Temperatur gebunden ist, wenn auch die Menge der verdunsteten Flüssigkeit mit der Temperatur zunimmt. Das Verdunsten verhält sich also zum Sieden etwa wie die Auflösung eines Körpers zum Schmelzen. Man kann sich hierbei vorstellen, daß an den Grenzschichten von Flüssigkeiten die Moleküle bei ihren Schwingungen in die benachbarten Luftschichten gelangen und nicht mehr zurückkehren. Bei jeder Verdunstung wird eine bestimmte Arbeit geleistet, um den äußeren Luftdruck sowie die Kohäsion zwischen den einzelnen Flüssigkeitsteilchen zu überwinden. Da die hierzu nötige Energie (Verdampfungswärme) nicht von außen (durch Erhitzen) zugeführt wird, so wird sie dem Körper selbst bzw. seiner Umgebung entzogen, deren Temperatur infolgedessen sinkt. Hierauf beruht z. B. die wohltätige Wirkung des Schweißes.

Außer der gewöhnlichen, langsamen, Verdunstung gibt es auch eine rasche, wenn z. B. eine unter höherem Druck stehende Flüssigkeit plötzlich eine Druckverminderung erfährt. Hierbei ist die Kälteentwicklung besonders stark. Fließt z. B. flüssige Kohlensäure, die in Stahlflaschen unter einem Druck von mehreren Atmosphären aufbewahrt wird, aus denselben aus, so verdunstet ein Teil der Flüssigkeit sehr rasch an der Luft und entzieht dabei dem übrigbleibenden Teil so viel Kälte, daß er zu einer schneeartigen Masse von ca. -58° erstarrt. Auf demselben Prinzip beruhen auch manche Eismaschinen.

Bei einer Art derselben wird z. B. in einem von Kühlwasser umgebenen Schlangenrohr Ammoniak mittels einer Druckpumpe verflüssigt; diese Flüssigkeit gelangt in ein zweites Schlangenrohr, wo geringerer Druck herrscht, so daß Verdunstung erfolgt. Die hierzu nötige Wärme wird einer Salzlösung entzogen, welche das zweite Schlangenrohr umgibt und ihrerseits zu einem Behälter geleitet wird, wo sich Einsatzgefäße mit Wasser befinden, welche letzteres dann gefriert.

§ 93. **Gesättigter und ungesättigter Dampf.** Läßt man in einer genügend langen, mit Quecksilber gefüllten Röhre, die unten in ein weites Gefäß mit Quecksilber eintaucht, z. B. eine bestimmte Menge Äther aufsteigen, so wird dieser in dem TORRICELLISCHEN Vakuum verdampfen. Durch die Spannung (Spannkraft bzw. Dampfdruck) des gebildeten Ätherdampfes wird die ursprünglich 760 mm hohe Quecksilbersäule nach abwärts gedrängt; ihre Höhe ist somit ein Maß für die Spannkraft des Dampfes. Die Verdampfung des Äthers hört aber bald auf, wenn nämlich die entstandenen Ätherdämpfe einen genügend großen Gegendruck auf den noch flüssigen Äther ausüben. Man sagt dann, der Raum über der Quecksilbersäule ist mit Ätherdampf gesättigt, oder auch kurz, der Ätherdampf ist gesättigt. Ein gesättigter Dampf ist demnach ein solcher, der mit der Flüssigkeit, aus der er entstanden ist, noch in Berührung ist und aus ihr nichts mehr aufnehmen kann. Sobald dieser Zustand erreicht ist, nimmt die Quecksilbersäule eine konstante Höhe an. Wird nämlich der Raum, in dem der flüssige und dampfförmige Äther ist, vergrößert, so verdampft noch ein Teil der Flüssigkeit, bis der vergrößerte Raum wieder gesättigt ist; wird er verkleinert, so wird ein Teil des Dampfes kondensiert. Stets aber bleibt die Spannung die gleiche, was eben aus der gleichbleibenden Höhe der Quecksilbersäule hervorgeht. Die Spannung eines gesättigten Dampfes (der sog. Sättigungsdruck) ist also vom Volumen unabhängig und zugleich ein Maximum (für die betreffende Temperatur). Einen größeren Druck durch Verkleinerung des Volumens zu erzielen, ist eben unmöglich, weil dann sofort ein Teil des Dampfes verflüssigt wird. Dagegen wird eine Erhöhung des Druckes herbeigeführt durch Erhitzen, indem dann neue Flüssigkeit verdampft, und zwar steigt der Druck gesättigter Dämpfe bei Temperaturerhöhung mehr an, als das GAY-LUSSAC'SCHE Gesetz besagt. Auch die Sättigungsmenge, d. h. eben die Dampfmenge, die ein Raum bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann, steigt mit der Temperatur. — Der Sättigungsdruck von Lösungen ist niedriger als der des reinen Lösungsmittels, was der bereits erwähnten Erhöhung des Siedepunktes entspricht [§ 90], und zwar ist die Abnahme proportional der Konzentration. Äquimolekulare Lösungen haben gleichen Dampfdruck [vgl. § 43].

Wird bei obigem Versuche der Raum über der Quecksilbersäule

so sehr vergrößert, daß schließlich aller Äther verdampft, so wird der Raum ungesättigt, oder, wie man gewöhnlich sagt, der Ätherdampf in jenem Raum ist ungesättigt. Charakteristisch für den ungesättigten Dampf ist also, daß er nicht mehr mit seiner Mutterflüssigkeit in Verbindung ist, die gewissermaßen das Magazin darstellt, aus dem das Sättigungsbedürfnis bei Volumschwankungen befriedigt werden kann. Man kann nun auch ungesättigten Dampf dadurch erhalten, daß man gesättigten so lange erhitzt bis alle Flüssigkeit verdampft ist. Aus diesem Entstehungsmodus ist der Name überhitzter Dampf, der identisch mit ungesättigtem Dampfe ist, verständlich. Umgekehrt kann man aus ungesättigtem Dampfe auch auf zwei Wegen gesättigten herstellen, nämlich durch Druck und durch Abkühlung. Ein ungesättigter oder überhitzter Dampf verhält sich wie ein vollkommenes Gas, gehorcht also den Gesetzen von BOYLE-MARIOTTE und GAY-LUSSAC [§ 82]. Gase kann man daher auch definieren als stark überhitzte Dämpfe. Der Druck eines ungesättigten Dampfes ist geringer als der eines gesättigten von gleicher Temperatur. —

Für Gasgemenge gilt das DALTONSche Gesetz, daß der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrucke [S. 50] ist. Letztere sind unabhängig von dem Vorhandensein anderer Gase oder Dämpfe. Ein luftgefüllter Raum nimmt z. B. die gleichen Mengen Wasserdampf auf wie ein luftleerer; allerdings dauert es länger. Der Druck entspricht dann dem Druck der Luft vermehrt um den Druck des Wasserdampfes.

§ 94. **Dampfdichte.** Unter Dampfdichte (oder spezifischem Gewicht eines Dampfes) versteht man gewöhnlich das Verhältnis zwischen dem Gewicht eines Volumens Dampfes und dem Gewicht eines gleichgroßen Volumens atmosphärischer Luft bei demselben Drucke und derselben Temperatur.

1 cem Luft wiegt bei 0° und einem Barometerdruck von 760 mm Quecksilber 0,001293 Gramm, bei einem Druck von 1 mm Quecksilber $\frac{0,001293}{760}$, bei einem Druck von b mm $\frac{0,001293 \cdot b}{760}$ Gramm. Bei t° dehnt sich das Volumen von 1 cem auf $(1 + at)$ cem aus [§ 82], folglich wiegt jetzt 1 cem $\frac{0,001293 \cdot b}{760(1+at)}$ und v cem $\frac{0,001293 \cdot b \cdot v}{760(1+at)}$ Gramm. Bezeichnet man dies Gewicht des Luftvolumens mit p' und das eines gleichen Dampfes mit p , so ist die Dampfdichte

$$D = \frac{p}{p'} = \frac{p \cdot 760 (1 + at)}{0,001293 \cdot b \cdot v}$$

Es handelt sich also darum, die Größen t , b , v und p zu bestimmen. p , das Gewicht des Dampfes, ist identisch mit dem Gewicht der Substanz, durch deren Verdampfung der Dampf entsteht.

Bei der Methode von GAY-LUSSAC und HOFMANN wird eine abgewogene Menge der zu untersuchenden Substanz in einem kleinen Glaszylinderchen mit Korken (der bei der Verdampfung herauspringt) in das Vakuum einer nach Kubikzentimetern graduierten Barometerröhre gebracht und dort verdampft, indem man zwischen Barometerröhre und einen sie umgebenden Glasmantel Dämpfe einer siedenden Flüssigkeit von bekanntem Siedepunkt leitet. So ist p und t bekannt; v wird an der Röhreneinteilung abgelesen, b entspricht hier der Differenz zwischen Atmosphärendruck und Höhe der Quecksilbersäule.

Bei der Methode von DUMAS bringt man die Substanz in einen Glasballon von bekanntem Volumen, der in eine feine Spitze ausgezogen ist, und verdampft sie in einem Bade von Wasser, Öl oder Chlorzink. Nach völligem Verdampfen wird die Spitze zugeschmolzen und der Ballon gewogen. So ist also v und p bekannt. b entspricht hier dem Luftdruck, t der Temperatur des Bades im Augenblicke des Zuschmelzens.

Am meisten angewandt, weil am bequemsten, ist die Luftverdrängungsmethode von VICTOR MEYER, bei der das durch die verdampfte Substanz verdrängte, also dem Dampfvolumen gleiche Luftvolumen ermittelt wird, ohne daß es dabei nötig ist, die Temperatur des Dampfes zu bestimmen.

Die Verdampfung erfolgt in dem Gefäß B (Fig. 73), das sich oben in ein Rohr R mit den Ansatzröhren M und H fortsetzt. M endigt in einer mit Wasser usw. gefüllten Wanne, unter einem ebenfalls mit Wasser gefüllten Meßzylinder C . Die zu verdampfende Substanz wird in einem Kölbchen G durch J eingeführt und ruht auf dem Glasstabe S , der in H luftdicht eingefügt und verschiebbar ist. Man bringt nun die in einem Mantel um B befindliche

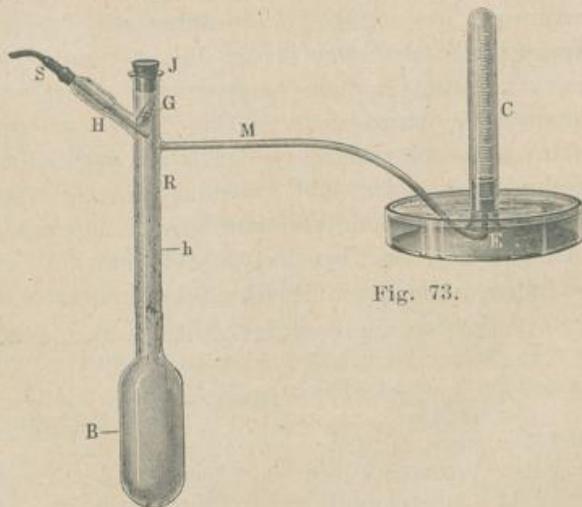


Fig. 73.

Heizflüssigkeit zum Sieden und läßt die Substanz, nachdem die Temperatur in B konstant geworden ist — es treten dann durch M keine Luftblasen mehr aus —, durch Zurückziehen des Stabes S nach B fallen. Indem sie nun hier verdampft, tritt die dem gebildeten Dampf an Volumen entsprechende Luftmenge durch M in das Meßglas C . Dieses Volumen v wird direkt an einer Teilung abgelesen. t entspricht der Temperatur des Wassers, b dem Barometerstande, von dem

natürlich der Druck der noch im Meßglas befindlichen Wassersäule abgezogen werden muß.

Die Bestimmung der Dampfdichte ist deshalb wichtig, weil man daraus die Molekulargewichte chemischer Verbindungen berechnen kann.

Nach dem Gesetz von AVOGADRO sind in gleichen Volumina aller Gase gleichviele Moleküle enthalten. Die spezifischen Gewichte gleicher Gasvolumina sind daher (wenn Temperatur und Druck gleich sind) proportional den Molekulargewichten. Bezeichnet M_x das Molekulargewicht der untersuchten Substanz, M_h das des Wasserstoffs, und ist das spezifische Gewicht der ersteren bezogen auf Luft = s , das des Wasserstoffs = 0,069, so ist

$$M_x : M_h = s : 0,069.$$

Da nun $M_h = 2$ ist, so ergibt sich

$$M_x = \frac{2s}{0,069} = s \cdot 28,8.$$

§ 95. **Kondensation.** Wie Flüssigkeiten in Dämpfe übergehen können, so ist auch der umgekehrte Vorgang möglich. Man spricht dann von Kondensation¹ oder Verflüssigung. Der Kondensationspunkt ist natürlich identisch mit dem Siedepunkt; die bei der Verflüssigung frei werdende Kondensationswärme ist gleich der latenten Verdampfungswärme [§ 90]. Zur Kondensation ist entweder Druck [§ 88] oder Kälte oder, noch besser, beides zusammen erforderlich. Heute können alle Gase verflüssigt werden, seitdem man weiß, daß diese Verwandlung stets unterhalb einer bestimmten Temperatur geschehen muß. Es ist dies die sog. kritische² Temperatur, die für jedes Gas verschieden ist. Oberhalb der kritischen Temperatur kann also ein Gas überhaupt nicht verflüssigt werden, wenn man auch noch so großen Druck anwendet. Die bei der kritischen Temperatur herrschende Dampfspannung wird kritischer Druck genannt. Dämpfe kann man als luftförmige Körper definieren, die sich (im Gegensatz zu den Gasen) unterhalb ihres kritischen Punktes befinden, also durch Druck allein kondensierbar sind.

Die kritische Temperatur beträgt z. B. für Wasserdampf +364°, Äther +197°, Kohlensäure +31°, Sauerstoff -119°, Luft -140°, Stickstoff -149°, Wasserstoff -241°, Helium -267°.

Zur Verflüssigung von Gasen, deren kritische Temperatur sehr tief ist, sind besondere Methoden erforderlich. Beim sog. Stufenverfahren wird zunächst ein Gas mit nicht zu tiefer kritischer Temperatur, z. B. Kohlensäure, durch Druck verflüssigt; hierauf wird durch Druckentlastung starke Verdunstungskälte [§ 92] erzielt, die man in Verbindung mit Druck zur Verflüssigung eines zweiten Gases mit tieferer kritischer Temperatur benutzt usw.

Viel benutzt, ev. in Verbindung mit diesem Stufenverfahren, wird neuerdings das Gegenstromverfahren von LINDE, das zuerst zur Verflüssigung der Luft angewandt wurde. Es wird hierbei durch eine Pumpe P

¹ *condenso* verdichten. — ² *κρίσιμος* entscheidend.

(Fig. 74) Luft unter einem Druck von 200 Atmosphären durch das Rohr *a* in das weitere Rohr *b* gepreßt und strömt nach Öffnung des Ventils *c* aus, wobei eine Druckentlastung und somit auch Abkühlung (vgl. § 102 Anmerkung) stattfindet. Die abgekühlte Luft strömt durch *d* in den Mantelraum *ee* und von hier aus durch *f* hindurch zur Pumpe zurück. (In Wirklichkeit sind *b* und *ee*, die in der schematischen Figur kurz und geradlinig gezeichnet sind, zwei Schlangenhohre von großer Länge.) Auf diese Weise werden also die durch *b* neu eintretenden Luftmengen von den durch *ee* in entgegengesetzter Richtung strömenden bereits abgekühlten Luftmengen immer wieder weiter abgekühlt, bis endlich Verflüssigung der Luft (bei ca. -190°) erfolgt. Die verflüssigte Luft fällt in die DEWARsche Flasche *G* [§ 103] hinab. Läßt man die flüssige Luft verdampfen, so entweicht zuerst Stickstoff (Siedepunkt bei $-195,6^{\circ}$) und dann erst Sauerstoff (Siedepunkt bei $-182,5^{\circ}$). Hierauf beruht ein Verfahren zur Gewinnung größerer Sauerstoffmengen aus Luft.

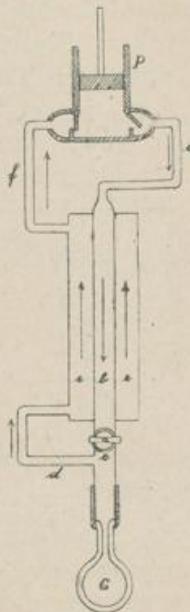


Fig. 74.

§ 96. **Hygrometrie.** Für viele Zwecke ist es nötig, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft zu kennen, d. h. ihre Sättigung mit Wasserdampf. Man unterscheidet hierbei absolute Feuchtigkeit, d. h. die in 1 cbm Luft wirklich vorhandene Menge Wasserdampf, und relative, d. h. das Verhältnis der vorhandenen Wasserdampfmenge zu der, welche bei vollkommener Sättigung vorhanden wäre. Zuweilen drückt man die Feuchtigkeit nicht durch die Mengen des Wasserdampfes in der Luft aus, sondern durch dessen (Partial-) Druck. Da man nun Sättigungsdruck den Druck nennt, der vorhanden ist, wenn die Luft für die betreffende Temperatur mit Wasserdampf gesättigt ist [§ 93], so kann man relative Feuchtigkeit auch definieren als Quotient aus dem Dampfdruck des tatsächlich vorhandenen Wasserdampfes und dem Sättigungsdruck. Man gibt die relative Feuchtigkeit in der Regel in Prozenten an. Wärmere Luft braucht mehr Feuchtigkeit zur Sättigung als kalte. Wird daher die Luft abgekühlt, so wird sie bei einer bestimmten Temperatur (dem sogenannten Taupunkt) gerade mit Wasserdampf gesättigt sein. Bei weiterer Abkühlung kondensiert sich der Wasserdampf zu Nebel, Tau, Regen, Reif.

Vollkommen reine Luft kann unter den Taupunkt abgekühlt werden, ohne daß Kondensation eintritt. Letztere erfolgt aber, wenn Rauch, Staubteilchen oder andere feste Körper (sog. Kondensationskerne) vorhanden sind. Als solche Kondensationskerne können auch freie Luftionen (besonders negative) wirken [vgl. § 212].

Der einfachste Feuchtigkeitsmesser, das Haarhygrometer¹ von SAUSSURE, beruht darauf, daß entfettetes Frauenhaar die Eigen-

¹ *ήγρός* feucht.

*daß die Luft
oben hin
entweicht, nicht
nach unten*

abgekühlt

schaft hat, sich durch Feuchtigkeit auszudehnen. Diese Bewegung wird hier auf einen Zeiger übertragen, der vor einer empirisch bestimmten Skala spielt. An Stelle eines Haares kann man auch Darm-saiten, Strohhalme usw. in derselben Weise benutzen.

Das Kondensationshygrometer, erfunden von DANIELL, benutzt den Taupunkt (s. o.).

Die Kugel *a* (Fig. 75) ist an der Außenseite vergoldet und halb mit Äther gefüllt; auch enthält sie ein kleines Thermometer. Sie geht über in die Röhre

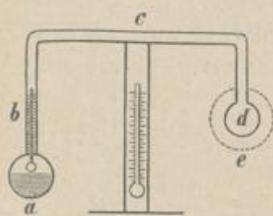


Fig. 75.

bc, die auf der anderen Seite ebenfalls mit einer Kugel *d* endigt, welche mit einem Musselinläppchen *e* umhüllt ist. Der ganze Apparat ist luftleer. Tropft man auf *e* Äther, so entsteht durch dessen Verdunstung Kälte, wodurch die Ätherdämpfe in *d* verflüssigt werden. Dies hat wieder zur Folge, daß der Äther in *a* verdampft und dadurch die Kugel *a* abkühlt. Wird die Abkühlung so stark, daß die Außenluft ihren Wasserdampf nicht mehr binden kann, so beschlägt sich *a* mit einem feinen Tau. Die Temperatur, bei der dies

geschieht, wird am Thermometer in *a* abgelesen. Den Sättigungsdruck des Wasserdampfes für diese Temperatur (der natürlich gleich ist dem Druck des bei der Lufttemperatur ungesättigten Wasserdampfes) und den Sättigungsdruck für die Lufttemperatur findet man in Tabellen; das Verhältnis beider Werte entspricht der relativen Feuchtigkeit.

Das AUGUSTSche Psychrometer¹ besteht aus zwei gleichen Thermometern, von denen das eine die Lufttemperatur angibt. Das andere ist unten mit einem Mullläppchen umhüllt, das mit einem Zipfel in Wasser taucht und so stets feucht bleibt; dieses Thermometer zeigt eine niedrigere Temperatur an, da infolge der Verdunstung des Wassers dem Thermometer Wärme entzogen wird. Je trockener nun die Luft, desto stärker die Verdunstung, desto niedriger also auch der Stand des zweiten Thermometers. Mittels besonderer Tabellen läßt sich aus beiden Temperaturen und ihrer Differenz die absolute und relative Feuchtigkeit bestimmen.

Den absoluten Feuchtigkeitsgehalt erhält man auch, wenn man ein bestimmtes Volumen Luft durch eine Röhre mit Chlorkalzium oder einer anderen hygroskopischen Substanz leitet, deren Gewichtszunahme dann direkt den Wassergehalt der Luft angibt.

§ 97. **Verwandlung von Wärme in Arbeit.** Die Ausdehnung durch Erwärmung wird in der Technik außerordentlich viel als treibende Kraft verwandt. Die betreffenden Vorrichtungen heißen **Wärme-kraft- oder kalorische Maschinen**. Bei den **Heißluftmaschinen** z. B. wird ein Kolben in einem Zylinder durch die erhöhte Spannung erhitzter atmosphärischer Luft bewegt; bei den **Gasmotoren** durch Explosion eines Gemisches von atmosphärischer Luft und Leuchtgas,

¹ ψυχρός kühl.

Spezifische Wärme.
 1) Kompressor
 2) Gießmaschine

wobei infolge der hohen Verbrennungstemperatur ein starker Überdruck entsteht; bei den Dampfmaschinen durch gespannten Wasserdampf.

Bei letzteren wird der Dampf im Dampfkessel aus Wasser gebildet; an diesem ist ein Wasserstandsmesser und ein Manometer zum Messen des Drucks, sowie ein Sicherheitsventil angebracht. Bei den Kolbendampfmaschinen gelangt der Dampf durch das Rohr *a* (Fig. 76) in den Dampfzylinder, wo er den luftdicht schließenden Kolben *e* aufwärts treibt. Ist dieser oben angelangt, so ändert durch selbsttätige Steuerung der Maschine der Schieber *g* seine Stellung so, daß er den unteren Dampfweg *c* verschließt, den oberen *f* offen läßt. Der Dampf gelangt also nun durch *f* über den Kolben und drückt ihn herunter, während der in *d* befindliche Dampf durch *c* nach *i* ins Freie gelangt. So geht das abwechselnd weiter. Die auf- und niedergehende Bewegung des Kolbens wird in eine Drehbewegung umgesetzt, indem sie durch die Pleuelstange auf ein exzentrisches Rad und durch dieses auf eine Welle übertragen wird, von der Treibriemen ausgehen. Dies ist der Typus einer Hochdruckmaschine, deren Dampf eine Spannung von über 2 (gewöhnlich $5-13$) Atmosphären hat. Bei den Niederdruckmaschinen, die nur mit einer Dampfspannung von 2 Atmosphären und weniger arbeiten, wird der verbrauchte Dampf nicht direkt in die freie Luft geleitet, weil hier durch Überwindung des äußeren Luftdruckes relativ zu viel Kraft verloren ginge, sondern in ein luftleeres Gefäß, den sog. Kondensator, wo er durch eingespritztes kaltes Wasser oder durch Außenkühlung verdichtet wird.

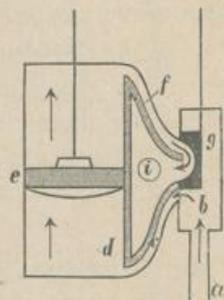


Fig. 76.

Bei den Dampfturbinen, die ähnlich gebaut sind wie die Wasserturbinen [§ 37], stößt der im Dampfkessel gebildete Dampf gegen ein Schaufelrad, so daß hier unmittelbar eine Drehbewegung erzeugt wird.

D. Spezifische Wärme.

§ 98. **Spezifische Wärme und Wärmekapazität.** Führt man verschiedenen Körpern dieselbe Wärmemenge zu, so nimmt ihre Temperatur (= Wärmezustand oder Wärmegrad) nicht gleichmäßig zu; so erwärmen sich bekanntlich Metalle leichter als Wasser. Anders ausgedrückt: Jeder Körper braucht zu einer bestimmten Temperaturerhöhung eine ganz bestimmte, von seiner Substanz abhängige Wärmemenge. Die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 Kilogramm (bzw. 1 Gramm) eines Körpers um 1° zu erwärmen, heißt spezifische Wärme dieses Körpers. Einheit der Wärmemenge ist diejenige, welche 1 Kilogramm (bzw. 1 Gramm) Wasser von $14,5^{\circ}$ auf $15,5^{\circ}$ erwärmt; man nennt sie große (bzw. kleine) Kalorie¹ [vgl. § 78]. Da nun die als Einheit gewählte spezifische Wärme des Wassers am größten ist, wird die spezifische Wärme aller anderen festen und flüssigen Stoffe durch Bruchteile von Kalorien ausgedrückt; sie beträgt z. B. für Kupfer 0,09,

¹ Von calor Wärme. — Kal = große Kalorie, kal = kleine Kalorie.

für Petroleum 0,51 Kalorien. Um einen m kg schweren Körper, dessen spezifische Wärme c ist, um 1° zu erwärmen, ist natürlich das m fache der spezifischen Wärme erforderlich. Diese Größe, also Produkt aus Körpergewicht und spezifischer Wärme, heißt **Wärmekapazität**¹ des Körpers. Von den Methoden zur Bestimmung der spezifischen Wärme (Kalorimetrie) seien nur folgende genannt:

§ 99. **Mischungsmethode.** Haben zwei Mengen einer Flüssigkeit, m und m' , die Temperatur t und t' ($t > t'$), und resultiert nach ihrer Mischung die mittlere Temperatur T , so ist klar, daß die erste Substanz für die Masseneinheit die Wärmemenge $t - T$ abgegeben, die zweite $T - t'$ aufgenommen hat. Es ist also

$$m(t - T) = m'(T - t').$$

Denn angenommen, daß keine Wärme durch Strahlung verloren geht, muß die Summe der Wärme vor und nach der Mischung gleich sein. Daraus ergibt sich die Endtemperatur

$$T = \frac{m t + m' t'}{m + m'}.$$

Diese Gleichung heißt auch **RICHMANN'Sche Regel**. Bei der Mischung zweier Flüssigkeiten von verschiedenen spezifischen Wärmen (c und c') wird die Verteilung der Wärme auch von letzteren abhängen. Es ist also

$$cm(t - T) = c'm'(T - t').$$

Ist nun Wasser eine von den beiden Flüssigkeiten, wo wird $c = 1$, und da alle anderen Größen direkt meßbar sind, erhält man daraus c' , also die spezifische Wärme der zweiten Flüssigkeit. Man kann so auch die spezifische Wärme fester und gasförmiger Körper bestimmen; letztere leitet man hierbei in Röhren durch die Flüssigkeit. Die Apparate, in denen diese Untersuchungen gemacht werden, heißen **Wasserkalorimeter**.

§ 100. **Eisschmelzungsmethode.** Da festgestellt ist, daß ca. 80 Grammkalorien nötig sind, um 1 Gramm Eis zu schmelzen, so läßt sich die spezifische Wärme eines Körpers, dessen Temperatur und Gewicht bekannt sind, leicht aus der Menge des Schmelzwassers berechnen, die in einem mit Eis gefüllten Gefäß (Eiskalorimeter) entsteht, wenn man den betr. Körper hineinhängt. Hat der Körper die Masse m , Temperatur t , spezifische Wärme c , so gibt er bei der Abkühlung auf 0° die Wärmemenge mct ab, da natürlich bei der Abkühlung die spezifische Wärme dieselbe Rolle spielt wie bei der Erwärmung. Entsteht die Menge m' von Schmelzwasser, so wurden dazu $80 m'$ Kalorien verbraucht. Es ist also $cmt = 80 m'$, folglich $c = \frac{80 m'}{m t}$.

¹ *Kapazität* = Fassungsvermögen, von *capax* in sich fassend.

Genauere Resultate gibt das **BUNSENSCHE** Eiskalorimeter (Fig. 77), bei dem die Menge des Schmelzwassers nicht direkt, sondern durch die eintretende Volumsdifferenz gemessen wird.

Im Raume *b* ist Wasser, das man durch rasche Verdunstung von Äther usw. in der Röhre *a* soweit abkühlt, daß es um *a* einen Eismantel bildet, dargestellt durch die punktierte Linie. Im unteren Teile von *b*, in der Röhre *c* und der damit verbundenen Kapillaren *e* ist Quecksilber, das durch die Ausdehnung des gefrierenden Wassers bei *e* ausfließt. Ist im ganzen Raume *b* eine Temperatur von 0° erzielt, was man durch Stillstehen des Quecksilberfadens erkennt, so wird nach Entfernung der Kältemischung in *a* die zu untersuchende erwärmte Substanz, deren Gewicht und Temperatur bekannt sind, gebracht. Der Eismantel schmilzt, und infolge der dabei eintretenden Volumsabnahme wird das Quecksilber in der Kapillare eine meßbare Strecke, etwa von *e* bis *d*, zurückgehen. Eine Volumsdifferenz von 0,09 ccm Quecksilber entspricht immer 1 Gramm geschmolzenen Eises.

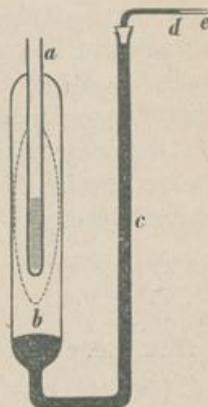


Fig. 77.

§ 101. **Atomwärme, Molekularwärme.** DULONG und PETIT fanden die merkwürdige Tatsache, daß die spezifische Wärme der Atome fester Elemente umgekehrt proportional den Atomgewichten ist. Das Produkt aus Atomgewicht und spezifischer Wärme, die sogenannte **Atomwärme**, ist demnach eine (annähernd) konstante Größe, nämlich ca. 6,4, und bietet ein wichtiges Hilfsmittel zur Bestimmung der **Atomgewichte**.

JOULE, NEUMANN und KOPP zeigten, daß auch die Molekularwärmen der festen chemischen Verbindungen, d. h. die Produkte aus Molekulargewichten und spezifischer Wärme, annähernd gleich der Summe der Atomwärmen der im Molekül vorhandenen **Atome** sind.

§ 102. **Spezifische Wärme der Gase.** Bei Gasen hat man zu unterscheiden zwischen der spezifischen Wärme bei gleichbleibendem Volumen, c_v , und derjenigen bei gleichbleibendem Druck, c_p . Wird z. B. in dem Gefäße *ABCD* (Fig. 78) 1 kg Luft erwärmt, wenn der Deckel *E* unbeweglich ist, so entspricht die Wärmemenge, die nötig ist, die Temperatur um 1° zu erhöhen, nach Reduktion auf die Volumeneinheit der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen. Ist der Deckel *E* aber beweglich, so wird sich die Luft bei der Erwärmung etwa bis *E'* ausdehnen; jetzt bleibt also der Druck gleich. Da im letzteren Falle die Luft eine Arbeit leistet, indem sie den Deckel entgegen der auf ihm lastenden Atmosphäre um das Stück *CC'* hebt, muß sie eine niedrigere Temperatur als im ersten Falle haben¹.

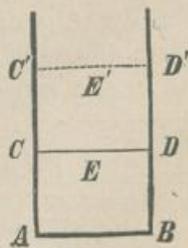


Fig. 78.

¹ Bei jeder Kompression eines Gases erwärmt sich dasselbe als Äquivalent für die zugeführte äußere Arbeit. Umgekehrt entsteht bei Ausdehnung

Anders ausgedrückt, um Luft bei gleichbleibendem Druck ebenso zu erwärmen wie dieselbe Menge bei gleichbleibendem Volumen, ist mehr Wärme nötig. Es ist also $c_p > c_v$, und $c_p - c_v$ entspricht genau der von der Luft bei der Verschiebung des Deckels geleisteten Arbeit; auf diesem Wege wurde auch von MAYER zuerst die Äquivalenzzahl zwischen Wärme und Arbeit berechnet. c_p kann man direkt finden, indem man das betr. Gas zuerst auf eine bestimmte Temperatur bringt und dann in Schlangenrohren durch ein Wasserkalorimeter leitet und weiter wie bei der Mischmethode [§ 99] verfährt. c_v kann man deshalb nicht direkt bestimmen, weil sich ja bei der Abkühlung im Kalorimeter das Volumen ändern muß. Dagegen ist das Verhältnis $\frac{c_p}{c_v} = k$ bekannt; es beträgt für alle Gase bei einem Atmosphärendruck ungefähr 1,4. Der Ausdruck \sqrt{k} ist bereits bei der Akustik [§ 71] als sogenannter LAPLACEScher Faktor erwähnt worden, mit dem die Formel für die Schallgeschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$ multipliziert werden muß.

Diese Formel wäre nur richtig, wenn die an den Verdichtungsstellen der Schallwellen immer entstehende Wärme abströmen, also vernachlässigt werden könnte. Da aber Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, da ferner die Temperaturschwankungen in den Schallwellen sehr rasch verlaufen, so ist dies hierbei nicht der Fall¹. In den Verdichtungen wird daher die elastische Spannung durch die Erwärmung noch vermehrt, in den Verdünnungen durch die Abkühlung noch mehr verringert. Dadurch findet eine Erhöhung der Schallgeschwindigkeit statt, die, wie LAPLACE zeigte, dem Faktor k entspricht. Umgekehrt kann natürlich aus einer bekannten Schallgeschwindigkeit $\frac{c_p}{c_v}$ gefunden werden.

Aus $\frac{c_p}{c_v}$ und c_p ergibt sich dann c_v .

E. Fortpflanzung der Wärme.

§ 103. **Wärmeleitung.** Die Fortpflanzung der Wärme erfolgt zum Teil derartig, daß sich die Bewegung der Moleküle direkt auf benachbarte überträgt. Dieser Modus heißt **Wärmeleitung**, und zwar innere, wenn es sich um die Moleküle desselben Körpers handelt,

eines Gases unter äußerer Arbeitsleistung **Abkühlung**. Wenn sich dagegen ein Gas in den luftleeren Raum ausdehnt, also keine äußere Arbeit dabei leistet, so findet **keine Abkühlung** statt. Letzteres gilt aber nur für „ideale“ Gase. In Wirklichkeit findet auch bei Ausdehnung eines Gases in den leeren Raum eine geringe Abkühlung statt, weil hier innere Arbeit zur Überwindung der molekularen anziehenden Kräfte geleistet wird. Dies Prinzip kommt z. B. bei der LINDESchen Maschine [§ 95] zur Geltung. — ¹ Man nennt Vorgänge, bei denen ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, so daß die Temperatur gleich bleibt, **isothermisch** [ἴσος gleich, θερμός warm]; solche, bei denen dies nicht der Fall ist, **adiabatisch** [α privativum, διαβαίνω hindurchgehen].

äußere, wenn dabei die Bewegung auf einen anderen Körper übergeht. Gute Wärmeleiter sind besonders die Metalle, unter denen wieder Silber die erste Stelle einnimmt. Es ist bemerkenswert, daß der Leitungsfähigkeit für Wärme im allgemeinen die für Elektrizität proportional ist. Auf der guten Leitungsfähigkeit der Metalle beruht z. B. die DAVYSsche Sicherheitslampe, eine einfache Öllampe, die von einem feinmaschigen Drahtnetz umgeben ist. Dieses entzieht den Flammgasen bei ihrem Hindurchtreten so viel Wärme, daß sie unter ihre Entzündungstemperatur abgekühlt werden; dadurch werden Explosionen vermieden, selbst wenn in der Umgebung Grubengase („schlagende Wetter“) sind. Interessant sind die Verhältnisse bei den Kristallen, deren Leitungsfähigkeit in den verschiedenen Achsen verschieden ist. Im Gegensatz zu den festen Körpern leiten flüssige und namentlich gasförmige (mit Ausnahme des auch sonst den Metallen nahe stehenden Wasserstoffes) die Wärme schlecht. So beruht z. B. die kälteschützende Wirkung der Kleider, Doppelfenster und mancher anderer schlechter Wärmeleiter (Wolle, Sägespäne, Asche usw.) auf der darin befindlichen unbewegten Luft. Der beste Wärmeisolator ist aber der luftleere Raum; man versieht daher z. B. Glasgefäße mit doppelten Wandungen, zwischen denen ein luftleerer Raum hergestellt wird. Diese sog. Vakuummantelgefäße, wozu auch die viel benutzten „Thermosflaschen“ gehören, werden dadurch noch brauchbarer, daß die innere Wand des Zwischenraumes mit einem Silber- oder Quecksilberspiegel versehen wird, wodurch auch die unsichtbaren Wärmestrahlen abgehalten werden (DEWARsche Flaschen).

§ 104. **Wärmeströmung.** In flüssigen und luftförmigen Körpern, die, wie erwähnt, ein schlechtes Wärmeleitungsvermögen besitzen, erfolgt die Fortpflanzung der Wärme hauptsächlich durch Massenverschiebung. Man spricht hier von Wärmeströmung oder Wärme-konvektion¹. Es geraten nämlich die erwärmten Teilchen infolge ihres veränderten spezifischen Gewichtes in Bewegung und geben die mitgeführte Wärme an andere Teilchen ab. So werden beim Kochen des Wassers die untersten Schichten zuerst erwärmt, steigen als spezifisch leichtere Teilchen auf und werden durch andere Teilchen ersetzt, bei denen sich der Vorgang wiederholt [vgl. §§ 84, 86]. Auf Konvektion beruht auch die Zentralheizung mit Wasser, Luft bzw. Wasserdampf.

§ 105. **Wärmestrahlung.** Die dritte Art der Wärmefortpflanzung geschieht durch Strahlung. Man hat sich vorzustellen, daß durch die Bewegung der Körpermoleküle, auf der ja die Wärme beruht, auch die zwischen ihnen befindlichen Äthermoleküle in Schwingungen

¹ *convectio*, das Zusammenfahren, Fortschleppen.

geraten und diese dem angrenzenden Äther mitteilen, der sie in Form von transversalen Wellen (20—400 Billionen in 1 Sekunde bei dunklen Wärmestrahlen) zu anderen Körpern fortleitet, wo sie wieder in Bewegung materieller Teilchen umgewandelt werden. Dies geht u. a. daraus hervor, daß die strahlende Wärme auch durch den sog. leeren Raum geht, in dem ja keine Wärmeleitung stattfindet, und daß die Schicht zwischen Wärmequelle und erwärmtem Körper ganz kalt sein kann. So ist z. B. auf hohen Bergen die Temperatur des Bodens bedeutend höher als die der Luft. Die Wärmestrahlen unterscheiden sich von den Lichtstrahlen durch ihre größere Wellenlänge; sie entsprechen hauptsächlich dem ultraroten Teile des Spektrums [§ 135]. Zum Studium der Wärmestrahlen benutzt man u. a. den LESLIE'schen Würfel, d. i. ein hohler, mit heißem Wasser usw. gefüllter Blechwürfel, dessen eine Seite mit Ruß geschwärzt, die zweite weiß angestrichen, die dritte blank poliert, die vierte rauh gemacht ist.

Die Fähigkeit, Wärme auszustrahlen (Emissionsvermögen), ist im allgemeinen um so größer, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung und je rauher die Oberfläche ist; auch die Natur der Körper ist von Einfluß. Wenn Wärmestrahlen auf einen Körper fallen, so werden sie entweder zurückgeworfen (reflektiert), oder sie dringen in ihn ein. In letzterem Falle werden sie entweder verschluckt (absorbiert), oder sie gehen unverändert durch. Gewöhnlich findet alles dieses zusammen statt, jedoch eins vornehmlich. Je nachdem Körper Wärmestrahlen ungehindert hindurchlassen oder aber sie absorbieren, wobei sie selbst erwärmt werden, heißen sie diatherman¹ (wärmedurchlässig), oder atherman (wärmeundurchlässig). Trotz der nahen Verwandtschaft zwischen Licht und Wärme sind nun keineswegs alle durchsichtigen Körper auch in hohem Grade diatherman und umgekehrt. Am meisten diatherman ist Steinsalz, sehr wenig z. B. Alaun und Wasser. Ferner ist z. B. die Diathermanität des durchsichtigen Bergkristalls gleich der des wenig durchsichtigen Rauchtropfens. Wie man nun Licht in verschiedene Farben zerlegen kann, die durch Körper in verschiedenem Maße gehen, so kann auch Wärme durch ein Steinsalzprisma in Strahlen von verschiedener Wellenlänge zerlegt werden. Wie nun durchsichtige farbige Körper nur gewisse Lichtstrahlen durchlassen, ist auch die Durchlässigkeit mancher Körper für die verschiedenen Arten von Wärmestrahlen verschieden. Man nennt diese Eigenschaft Wärmefärbung oder Thermochrose². KIRCHHOFF zeigte, daß ein Körper die Strahlen am stärksten absorbiert, die er selbst am stärksten aussendet, wenn er wärmer ist als seine Umgebung. Hierauf soll bei

¹ διά durch, θερμη Wärme. — ² χρώμα Farbe.

der Optik näher eingegangen werden, ebenso wie auf die Erscheinungen der Brechung, Polarisation und Interferenz der Wärmestrahlen, welche genau den Verhältnissen beim Lichte entsprechen.

Optik.

A. Ursprung und Ausbreitung des Lichtes.

§ 106. **Natur des Lichtes.** Unter Licht versteht man einmal die subjektive Empfindung der Helligkeit, welche durch verschiedene Reize des Sehnerven und der Sehzentra, z. B. durch Elektrizität, Blutdruckschwankungen usw. hervorgebracht wird, dann aber besonders — im physikalischen Sinne ausschließlich — das Agens selbst, welches diese Empfindung unter normalen Verhältnissen auslöst. Über die Natur dieses letzteren bestehen verschiedene Ansichten. Nach der Emanations- oder Emissionstheorie¹ NEWTONS ist das Licht ein äußerst feiner Stoff, der von den leuchtenden Körpern ausgesandt wird. Nach der jetzt fast allgemein angenommenen Undulationstheorie² von HUYGENS entsteht es ebenso wie Wärme durch außerordentlich schnelle Schwingungen der Körpermoleküle, die durch transversale Ätherschwingungen fortgepflanzt werden [vgl. § 105]. Die moderne elektromagnetische Lichttheorie ist in § 218 erwähnt.

§ 107. **Lichtquellen.** Die Verwandtschaft zwischen Wärme und Licht zeigt sich z. B. darin, daß durch genügende Wärmezufuhr Körper leuchtend werden. So wird ein Platindraht durch Erhitzen rot- und schließlich weißglühend. Auch das elektrische Glühlicht ist durch vermehrte Wärmeentwicklung des elektrischen Stromes zu erklären. So ist auch verständlich, daß die größte Wärmequelle, die Sonne, zugleich die stärkste Lichtquelle vorstellt. Alle derartigen Körper, deren Moleküle also so schnell schwingen, daß die von ihnen ausgehenden Ätherwellen (400—800 Billionen in 1 Sekunde) als Licht empfunden werden [vgl. § 135], heißen selbstleuchtend. Von Himmelskörpern gehören außer der Sonne nur noch die Fixsterne dazu, während z. B. die Planeten nur dadurch sichtbar sind, daß sie das Sonnenlicht reflektieren. Besonders stark wird die Lichtentwicklung, wenn mit der Erwärmung auch eine lebhaft oxydation (Verbrennung) Hand in Hand geht. Brennende Gase haben übrigens nur ein geringes Leuchtvermögen, das aber durch suspendierte feste Partikelchen bedeutend erhöht wird. So beruht die Helligkeit einer Gas-

¹ *emano* ausfließen, *emitto* aussenden. — ² *undulatus* wellenförmig.