

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Leitfaden der praktischen Physik

Kohlrausch, Friedrich

Leipzig [u.a.], 1896

Druck

Druck.

19c. Druckmessung. Manometer.

Druck nennt man die Kraft auf die Flächeneinheit; Anh. 6a.

I. Flüssigkeitssäulen.

Dieselben bilden den Ausgang für alle genaueren Druckmessungen; sie bieten eine im ganzen Meßbereich konstante Empfindlichkeit. Eine Säule von der Höhe h cm und dem spec. Gewicht s stellt den Druck hs gr-Gew./cm² = ghs Dyne/cm² dar; g ist die Schwerbeschleunigung in cm/sec², für 45° Breite = 980,6 (19b; Tab. 8a).

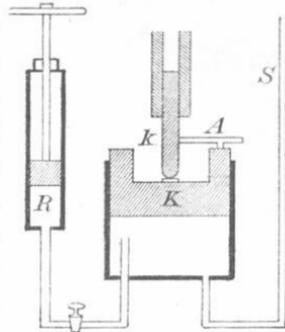
Als Flüssigkeiten werden Quecksilber, Wasser, auch wohl Glycerin ($s=1,26$) am meisten gebraucht. Man erhält aus einer beobachteten Druckhöhe h einer Flüssigkeit vom spec. Gewicht s diejenige h' einer anderen Flüssigkeit s' als $h'=hs/s'$; also um dieselbe Flüssigkeit von der Temperatur t auf t' umzurechnen, $h'=h(1+\alpha(t'-t))$, wenn α der Ausdehnungskoeffizient zwischen t und t' ist (Hg 0,000181; s. 26 III; Tab. 4 u. 9).

Über Korrekturen für Hg wegen Kapillardruck s. Tab. 15. Vgl. auch 20 1 bis 5 und Tab. 11.

Die Höhen werden auf einen hintergestellten Maßstab projiziert, mit dem Auge unter Vermeidung der Parallaxe durch einen Spiegel, oder mit einem parallel verschiebbaren Fernrohr; oder sie werden mit dem Kathetometer gemessen (18a). Abgelesen wird immer die horizontale Tangente des Meniskus, also an Quecksilberflächen der obere, an den übrigen Flüssigkeiten der untere Rand. Die Kuppen sind oft schwierig zu erkennen; eine dicht über der Quecksilberfläche angebrachte Stahlspitze kann dies erleichtern, indem man auf die Mitte zwischen ihr und ihrem Spiegelbild einstellt. Bei dem Ablesen auf einem hintergestellten Maßstab kann bei einer breiten, also in der Mitte ebenen Fläche ebenso die Mitte zwischen einem Teilstrich und seinem Spiegelbild zur Einstellung und zur Schätzung oder Messung des Abstandes der Kuppe vom nächsten Teilstrich benutzt werden (Thiesen).

Große Drucke. Das Quecksilbermanometer aus einem Stück wird oberhalb weniger Atmosphären unhandlich. Man kann dann wohl die Drucke mehrerer Säulen in Uförmigen Röhren durch Wasser aufeinander übertragen und summieren (Thiesen, Z. S. f. Instr. 1, 114. 1881).

Druck-Reduktion durch Kolbenübertragung. Drucke von Hunderten oder Tausenden von Atmosphären muß man bei der Übertragung auf Quecksilber verkleinern. Man benutzt das umgekehrte Princip der hydraulischen Presse. Der große Druck wirkt auf den Kolben k vom kleinen Querschnitt q , welcher die Kraft auf den Kolben K vom großen Querschnitt Q überträgt und unter K den Druck im Verhältnis q/Q reducirt auftreten läßt. Die übertragenden Flüssigkeiten sind Ricinusöl oder bei sehr großen Drucken Melasse.



Die Reibung wird durch drehende Bewegungen vermindert, welche man während der Messung dem Kolben durch einen eingeschraubten Arm A mitteilt. Der weite Cylinder enthält unten Quecksilber, welches mit dem Steigrohr S communicirt.

Die mit Ricinusöl gefüllte Regulirpumpe R läßt den Druck, trotz Austreten von etwas Flüssigkeit an den Kolbenwänden, konstant erhalten.

Näheres bei Amagat, Ann. de chim. et de phys. (6) 29, 68. 1893.

Glasröhren sind für inneren einseitigen Druck über etwa 400 Atm. nicht brauchbar zu machen. Volumänderungen von Gasen oder Flüssigkeiten in solchen Röhren (Piezometern) können, ohne daß dieselben sichtbar sind, durch elektrische Kontakte beobachtet werden, die in die Röhre eingeschmolzen und durch dünnen Platindraht hintereinander verbunden sind. Jedes Herantreten des Sperr-Quecksilbers an einen folgenden Kontakt schaltet Widerstand aus und ist dadurch (70 bis 71b) zu erkennen (Amagat l. c.).

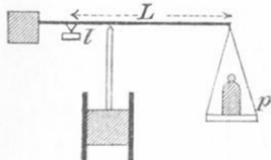
Bei Messungen mit hohen Drucken ist die Kompressionswärme zu beachten und ist also mit der Beobachtung bis zum wieder erfolgten Temperatenausgleich zu warten.

Zur Hervorbringung hoher Drucke (bis 1000 Atm.) dient die Cailletet'sche Pumpe (Ducretet und Lejeune, Paris).

Über die Anordnung von Versuchen mit hohem Druck s. u. a.: Elektr. Leitvermögen: Fink, Wied. Ann. 26, 481. 1885; Zusammendrückbarkeit: Röntgen u. Schneider, ib. 33, 644. 1888; Lichtbrechung: Röntgen u. Zehnder, ib. 44, 24. 1891; Dielektr.-Konstanten: Röntgen, ib. 52, 593. 1894.

II. Wagemanometer.

Der Druck auf den Kolben vom Querschnitt q wird auf einen äquilibrierten Wagebalken mit Wagschale übertragen und durch Gewichte p gemessen. Der Druck ist (Fig.) $= \frac{p}{q} \cdot \frac{L}{l}$.



III. Gasmanometer.

Der Druck wird auf eine abgesperrte Gasmenge in einem kalibrierten Rohr durch eine Flüssigkeit übertragen, welche das Gas nicht absorbiert. Der Druck ist dem Volumen umgekehrt proportional. Veränderliche Druckhöhen der Sperrflüssigkeit lassen sich nötigenfalls leicht in Rechnung setzen. Die Empfindlichkeit der Messung nimmt dem Drucke proportional ab. Für grose Drucke müssen die Abweichungen des Gases vom Mariotte'schen Gesetz bekannt sein.

IV. Metallmanometer.

Der Druck wird durch die Durchbiegung einer Metallmembran oder die Krümmung einer Metallröhre (Bourdon) gemessen, deren Bewegung auf einen Zeiger übertragen ist. Die Aichung erfolgt empirisch mittels des Quecksilbermanometers. Geringe Druck-Variationen können mit einem drehbaren Spiegelchen, welches durch das Manometer bewegt wird, mit Fernrohr und Skala beobachtet werden.

Röntgen, Pogg. Ann. 148, 624; F. K. ib. 150, 423. 1873.

V. Drucklibelle für sehr kleine Drucke (Toepler).

Ein unter sehr stumpfem Winkel $180^\circ - 2\alpha$ geknicktes Glasrohr von etwa 3 mm Weite enthält eine etwa $\frac{1}{4}$ m lange Säule Petroleum oder Xylol vom spec. Gewicht s . Ein einseitiger Druck, welcher eine Verschiebung um l cm bewirkt, ist



gleich $(2s \cdot \sin \alpha) l$ gr-Gew./cm². Den konstanten Faktor $2s \cdot \sin \alpha$ kann man beliebig klein machen.

Oder, wenn der Abstand der beiden Kuppen = a ist, und wenn ein Druck d kompensirt wird durch eine Neigung des Rohres um den Winkel φ , so ist $d = sa \cdot \sin \varphi$. Der Neigungswinkel wird durch die Drehung der Fußschraube an der Libelle hervorgebracht und gemessen.

Mit mikroskopischer Ablesung ist eine Druckänderung von 10^{-8} Atmosphäre noch bemerkbar und selbst die Temperatur drückender Gassäulen scharf zu messen.

Toepler, Wied. Ann. 56, 611. 1895.

20. Atmosphärischer Druck (Barometerstand).

Unter Barometerstand versteht man allgemein die Höhe einer Quecksilbersäule von 0°, welche dem Luftdruck das Gleichgewicht hält. Wegen der Veränderlichkeit der Schwere, die etwa $\frac{1}{2}\%$ betragen kann, fügt man für genaue Zwecke hinzu, daß die auf das Quecksilber wirkende Schwere diejenige unter 45° Breite am Meeresspiegel sein soll. Vgl. 5.

Daß das Barometer luftfrei ist, erkennt man an dem scharfen Klange, mit welchem das Quecksilber bei dem Neigen des Instrumentes oben anstößt. Das Vorhandensein von Wasserdampf über dem Quecksilber ist nur bei größeren Mengen durch den Beschlag zu erkennen, der sich bei dem Neigen an der Glaswand bildet. Kann man durch Nachgießen von Quecksilber oder Tiefereinsenken des Rohres den Raum über dem Quecksilber verkleinern und zugleich die Druckhöhen beobachten, so kann man das Vorhandensein von Luft oder kleinen Dampfmenigen daran erkennen, daß die Druckhöhen sich vermindern.* Vgl. 6.

Am Heberbarometer werden beide Kuppen abgelesen und ihre Höhendifferenz genommen. Am Gefäßsbarometer stellt man den durch eine Stahl- oder Elfenbeinspitze gebildeten Nullpunkt des Maßstabes auf die, am Reflex scharf zu erkennende Berührung mit der unteren Quecksilberfläche ein und liest oben ab (Fortin). Hat aber das Gefäßsbarometer einen feststehenden Maßstab, so sind die beobachteten Schwankungen mit $1 + q/q'$ zu multipliciren, wenn q bez. q' den Querschnitt des Rohres

bez. des Gefäßes bedeuten. Oder es ist die Teilung an derartigen Instrumenten gleich in diesem Verhältnis verkleinert.

Die Ablesung der Kuppe geschieht mit bloßem Auge oder durch Einstellung eines verschiebbaren Index, unter Anwendung eines Spiegels zur Vermeidung der Parallaxe (18, 1), oder mit einer Visirvorrichtung aus gespannten Fäden oder dem Mikroskop. Ein Barometerrohr ohne Maßstab beobachtet man mit dem Kathetometer (18a). Über den Nonius siehe 18.

Wegen der Reibung des Quecksilbers klopft oder neigt man vor der Ablesung.

Barometerablesungen verlangen folgende Korrekturen.

1. Temperatur des Quecksilbers. Das Quecksilber dehnt sich für 1° C. um 0,000181 seines Volumens aus. Ist demnach l der bei der Temperatur t im Barometer abgelesene Barometerstand, so ist der auf 0° reducierte (4, Beispiel Nr. 2)

$$b = l - 0,000181 \cdot lt.$$

Gewöhnlich genügt es, indem man für l in dem Korrekturengliede den Wert 750 mm annimmt, die Korrektur durch Subtraktion von $0,135 \cdot t$ mm anzubringen.

2. Temperatur des Maßstabes. Bei genauen Messungen muß auch die Länge des Maßstabes auf seine Normaltemperatur t_0 reducirt werden, was durch Addition von $\beta(t-t_0)l$ erreicht wird, worin β den Ausdehnungskoeffizienten des Maßstabes (0,000019 für Messing; 0,000008 für Glas) bedeutet.

Wenn wie gewöhnlich die Normaltemperatur des Maßstabes $= 0^{\circ}$, so wird der wegen der Temperaturexpansion vollständig korrigirte Barometerstand

$$b = l - (0,000181 - \beta) \cdot lt.$$

Die gesamte Korrektur des abgelesenen Standes l beträgt also

$$\text{für eine Messingskala} \quad -0,000162 \cdot lt$$

$$\text{für eine Glasskala} \quad -0,000173 \cdot lt,$$

welche Werte in Tab. 11 zu finden sind.

3. Kapillardepression eines Gefäßbarometers. Um diese zu korrigiren, mag man zu dem an der Kuppe des Meniskus abgelesenen Stande den aus Tab. 15 zu dem inneren Durchmesser der Röhre und der Höhe des Quecksilbermeniskus entnommenen Wert hinzufügen (vgl. 6).

4. Spannkraft des Quecksilberdampfes. In höherer Temperatur t bewirkt diese eine kleine Depression (Tab. 14), welche hinreichend genau korrigirt wird, indem man zu dem beobachteten Stande $0,001 t$ mm addirt.

5. Schwere-Reduktion auf 45° . Der Druck einer und derselben Quecksilbersäule an verschiedenen Orten ist der Schwere proportional. Mit dem Ausdruck (19b) $1 - 0,0026 \cdot \cos 2\varphi - 0,0000002 \cdot H$, dessen letztes Glied übrigens nur in sehr bedeutenden Höhen merklich wird, ist ein beobachteter Barometerstand zu multipliciren, um denjenigen zu erhalten, welcher demselben Luftdruck unter 45° am Meeresspiegel entspricht.

Aus dem reducirten Barometerstand b in cm berechnet man den Druck in gr-Gewicht/cm² als $b \cdot 13,596$. Der Druck im absoluten cm-gr-sec-System, d. h. die Kraft in Dynen/cm² oder in [cm⁻¹ · g · sec⁻²] (Anh. 6) ist $b \cdot 13,596 \cdot 980,6 = b \cdot 13332$.

Eine normale Atmosphäre entspricht dem Drucke $76 \cdot 13,596 = 1033$ gr-Gew./cm² oder $76 \cdot 13332 = 1013200$ [cm⁻¹ · g · sec⁻²] oder Dyne/cm².

Die Bemerkungen Nr. 1 bis 5 sind auf jede genaue Druckmessung mit Quecksilbersäulen anzuwenden.

6. Normalbarometer. Die aus der Kapillardepression entstehende Unsicherheit läßt sich vollständig nur durch ein weites Rohr (25 mm) vermeiden, welches die Depression ausschließt. Die Füllung geschieht zur Vermeidung von Luft oder Wasserdampf mit der Quecksilberluftpumpe. Über reines Quecksilber s. 7, 1. Durch Vergleichung eines anderen Instrumentes mit dem Normalbarometer eliminirt man die Depression des ersteren durch Kapillarität und Luft- oder Dampf-Gehalt.

Über Formen von Barometern, deren Luftgehalt stets zu kontrolliren oder zu beseitigen ist, vgl. L. Weber, Z. S. f. Instr. 13, 63. 1893.

7. **Aneroidbarometer** werden durch Vergleichung mit dem Quecksilberbarometer justirt bez. mit einer Korrektionstabelle versehen. Man bringt das Instrument z. B. unter die Luftpumpe, verbindet mit dem Recipienten ein hinreichend weites Glasrohr, in welchem Quecksilber angesaugt wird, und zieht die Höhe der langsam gehobenen Säule von dem äußeren Barometerstande ab; an den abgelesenen Quecksilberdrucken werden die Korrektionen Nr. 1 bis 5 angebracht. Die Temperaturkorrektion eines Aneroids ist empirisch zu bestimmen.

21. Barometrische Höhenmessung.

Die Höhendifferenz zweier Stationen, deren Barometerstand gleichzeitig beobachtet worden oder dem mittleren Werte nach bekannt ist, ergibt sich nach folgenden Regeln. Es seien

b_0 und b_1 die beiden Barometerstände [auf dieselbe Temperatur reducirt und ev. wegen des Dampfdrucks des Quecksilbers (20, 4) oder etwaiger Differenz zwischen beiden Instrumenten korrigirt],

t_0 und t_1 die Lufttemperatur an beiden Orten,

$t = \frac{1}{2}(t_0 + t_1)$ deren Mittel,

h die gesuchte Höhendifferenz in Metern.

I. Für gewöhnlich rechnet man dann

$$h = 18450^{\text{met.}} \cdot (\log b_0 - \log b_1)(1 + 0,0045t),$$

wofür bis zu Höhendifferenzen von etwa 1000 m auch der bequemere genäherte Ausdruck gesetzt werden kann

$$h = 16000^{\text{met.}} \cdot (1 + 0,004t) \cdot (b_0 - b_1)/(b_0 + b_1).$$

II. Unter I wird die Schwere unter 45° Breite am Meere und ein mittlerer Feuchtigkeitsgehalt der Luft vorausgesetzt. Es sei jetzt

φ die geographische Breite,

H die mittlere Meereshöhe der beiden Orte in Metern (der Einfluß wird kaum jemals merklich);

e_0 und e_1 die Spannkraft des Wasserdampfes an den beiden Stationen (28) und zur Abkürzung

$$k = \frac{1}{2}(e_0/b_0 + e_1/b_1).$$

Dann berechnet man die Höhendifferenz

$$h = 18430^{\text{met.}} \cdot (\log b_0 - \log b_1)(1 + 0,00367t) \cdot (1 + 0,0026 \cos 2\varphi + 0,0000002H + \frac{2}{3}k).$$

Die Logarithmen sind die gewöhnlichen Briggischen.

*Reduktion eines Barometerstandes auf Meereshöhe.

Die Korrektion geschieht in der internationalen Meteorologie durch Addition von $b(10^m - 1)$, wo

$$m = \frac{H(1 - \frac{2}{3}e/b)}{(18429 + 67,5t + 0,003H)(1 + 0,0026 \cos 2\varphi)}$$

Hypsometer. Des bequemeren Transportes der Instrumente wegen wird bei Höhenmessungen der Barometerstand

auch aus der Siedetemperatur des Wassers abgeleitet. Die Tabellen 13a u. 13b geben die zusammengehörigen Siedetemperaturen und Barometerstände. Da 1 mm Barometerstand etwa $\frac{1}{25}$ Grad entspricht, so erreicht man nur mit den größten Vorsichtsmaßregeln der Temperaturbestimmung (22) einige Genauigkeit.

Beweis der Formeln. Die Dichtigkeit der Luft ist (15 und 19b), wenn wir $0,0026 \cdot \cos 2\varphi = \delta$, $0,0000002 = \varepsilon$ und $0,00367 = \alpha$ setzen, gleich

$$\frac{0,001293}{1 + \alpha t} \frac{b - \frac{3}{8}e}{760} (1 - \delta - \varepsilon H).$$

Die Dichtigkeit des Quecksilbers von 0° beträgt 13,596. Folglich ist, wenn für die Höhenänderung dH der Barometerstand b sich um db ändert (d. h. dH bez. db die Höhe einer Luft- bez. einer Quecksilbersäule bedeuten, die sich im Gleichgewicht halten),

$$-db = \frac{0,001293}{13,596 \cdot 760} (b - \frac{3}{8}e) \frac{1 - \delta - \varepsilon H}{1 + \alpha t} dH.$$

Hierin sind e und t eigentlich mit H veränderlich, aber nach einem unbekanntem Gesetze. Wir führen für t den konstanten Mittelwert ein und setzen e in ein konstantes Verhältnis zum Barometerstand, $e = kb$. Rechnet man den Zahlenfaktor aus und behandelt die kleinen Größen $\frac{3}{8}k$, δ und εH nach S. 9 als Korrekptionsgrößen, so kann man schreiben

$$-7993000(1 + \alpha t)(1 + \delta + \frac{3}{8}k) \cdot db/b = (1 - \varepsilon H) dH.$$

Wird jetzt integriert, auf der linken Seite von b_0 bis b_1 , auf der rechten von H_0 bis H_1 , so kommt

$$7993000(1 + \alpha t)(1 + \delta + \frac{3}{8}k)(\log \text{nat } b_0 - \log \text{nat } b_1) \\ = (H_1 - H_0) [1 - \frac{1}{2}\varepsilon(H_1 + H_0)].$$

Endlich setzen wir $\log \text{nat } b = 2,3026 \log \text{brigg } b$, behandeln $\frac{1}{2}\varepsilon(H_1 + H_0) = \varepsilon H$ als Korrekptionsglied und erhalten

$$H_1 - H_0 = h = 18400000 \text{mm} \cdot (\log b_0 - \log b_1)(1 + \alpha t)(1 + \delta + \varepsilon H + \frac{3}{8}k).$$

Der Faktor 18400 m ist wegen der bisher vernachlässigten Abnahme der Schwere des Quecksilbers mit der Höhe noch um $\frac{1}{8}\%$, also auf 18430 zu vergrößern. Denn auf 1 m Erhebung beträgt jene $\frac{1}{5000000}$, während der Druck um $\frac{1}{8000}$ abnimmt. Also war die Höhen-Abnahme des Barometerstandes um $\frac{8000}{5000000} = \frac{1}{600}$ zu groß angesetzt.

Die Näherungsformel I ergibt sich, wenn man halbe Sättigung der Luft mit Wasserdampf annimmt, nach 15 Formel 2.

Die Näherungsformel unter I für kleine Höhenunterschiede ist nichts anderes als die obige Differentialformel, welche nach Vernachlässigung von δ , ε und k lautet $-7993000(1 + \alpha t) db/b = dH$. dH ist der Höhenunterschied; für den Unterschied der Barometerstände $-db$ schreiben wir $b_0 - b_1$, setzen den mittleren Stand $\bar{b} = \frac{1}{2}(b_0 + b_1)$, lassen beim Übergange vom mm zum m 3 Nullen fort und runden 7993 zu 8000 ab.

Wärme.

21a. Formen von Thermometern. Allgemeines.

Über Temperaturbäder etc. s. 7, 27.

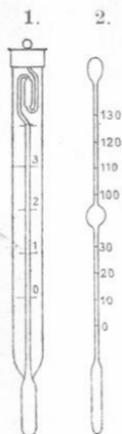
„Luftfreie“ Quecksilberthermometer sind von -39° bis höchstens $+350^{\circ}$ brauchbar; häufig tritt bereits unterhalb 350° ein Zerreißen des Fadens ein. Zum Ablesen bequem sind die „Einschlufthermometer“ mit eingekitteter Skale. Die Kapillare soll nicht platt gedrückt sein, damit keine unregelmäßige Kuppenbildung und kein „toter Gang“ beim Sinken eintritt. Stabthermometer liest man mit dem Fernrohr ab.

Um Luftspuren über das Quecksilber befördern zu können, ohne zu dem Hilfsmittel der Abkühlung durch Kältemischungen, verdampfenden Äther, feste Kohlensäure, bis zur Zusammenziehung des Quecksilbers in die Kugel greifen zu müssen, endigt die Kapillare oben in eine Erweiterung mit verengter Mündung. Die Erweiterung dient oft auch zur Abtrennung eines Teiles von Quecksilber, um dasselbe Instrument in höherer

Temperatur gebrauchen zu können, als seine Skale angiebt. Man vergleicht nachher einen Punkt der Skale mit einem Normalthermometer. Außerdem ist aber der Skalenwert, wenn man a Grade abgetrennt hat, im Verhältnis $1 + 0,00016a$ größer anzunehmen.

Unter dem Namen Beckmann'sches Thermometer ist, besonders bei Gefrierpunktsbestimmungen, die Form 1 gebräuchlich, welche eine sehr weite Teilung hat. — Erweiterungen haben auch wohl den Zweck, die beiden Fixpunkte kontrollieren zu können und doch sehr lange Skalenteile zu haben. In diesem Sinne ist Nr. 2 von 0 bis 30° und von 100 bis 130° brauchbar. Die obere Erweiterung läßt außerdem Quecksilber abtrennen, um die verwendbaren Intervalle von 30° höher legen zu können.

Ein luftfreies Quecksilberthermometer zeigt wegen des



„toten Ganges“ bei sinkender Temperatur weniger sicher als bei steigender. Klopfen mit einem Stückchen Holz vor der Ablesung ist bei genauen Messungen stets anzuraten.

Hochgehende Thermometer enthalten über dem Quecksilber Stickstoff oder Kohlensäure. Mit Hilfe der letzteren werden durch das schwer schmelzbare Jenaer Glas Nr. 59 jetzt Skalen bis 550° ermöglicht, wobei der Druck über dem Quecksilber wegen dessen Dampfspannung 12 Atmosphären übersteigen muß.

Von -39° abwärts dient Alkohol oder Toluol zur Füllung. Letzteres wird vorgezogen, weil es leichter rein (wasserfrei) herzustellen ist, und auch, weil sein Siedepunkt über $+100^{\circ}$ liegt. Gegen Quecksilber aber haben beide Flüssigkeiten die Nachteile erstens größerer Trägheit wegen schlechter Wärmeleitung, zweitens der Benetzung des Glases, welche z. B. auch die Kalibrirung nach der Füllung hindert. Ferner wachsen die Gradlängen beträchtlich mit der Temperatur. Die Teilung kann nach den Ausdehnungsformeln (Tab. 9) geschehen, ist aber durch Vergleich mit dem Luftthermometer zu korrigiren.

Für die Quecksilbergefäße kann zur Erwägung kommen: eine große Oberfläche im Interesse raschen Wärmedurchganges, unter Umständen eine gestreckte Form auch zu dem Zwecke, die Mitteltemperatur eines Raumes anzuzeigen; geringe Wanddicke für Wärmedurchlaß, andererseits nicht zu geringe wegen Zerbrechlichkeit und Einfluß des Druckes und der Neigung (22 C 1). Größere Quecksilbermassen sind wegen der zum Wärmeausgleich nötigen Zeit vorsichtig zu gebrauchen.

In hoher Temperatur achte man auch noch auf etwaiges Abdestilliren von Flüssigkeit.

Ablesung des Thermometers. Feinere Ablesungen werden am besten mit dem Fernrohr gemacht: man richtet das Thermometer durch Visiren nach einem Senkel, Fensterrahmen u. dergl. vertikal und stellt das Fernrohr in der Höhe des abzulesenden Teilstriches auf. Einfacher dient zur Vermeidung der Parallaxe ein hinter das Thermometer angedrücktes Spiegelstreifen. Man hält das Auge so, daß sein Spiegelbild in der Höhe der Quecksilberkuppe liegt. Bei der Ablesung mit einer Lupe bietet auch die Krümmung der in unrichtiger Höhe liegenden Striche ein Mittel zur richtigen Augenstellung.

22. Quecksilberthermometer. Eispunkt und Siedepunkt.

Wissenschaftlich definirt man die Temperatur nach der Ausdehnung eines vollkommenen Gases (Wasserstoff), indem man gleichen Volum- (oder Druck-)Zuwachsen des Gases gleiche Temperatur-Zuwachse zur Seite stellt. Wir rechnen nach Centigraden, d. h. wir nennen die Temperatur des schmelzenden Eises Null und die Siedetemperatur des Wassers bei 760 mm Luftdruck (20) Hundert.

Das Quecksilberthermometer hält nicht ganz gleichen Schritt mit dem Luftthermometer, weil Quecksilber und Glas sich nicht gleichmäfsig ausdehnen¹⁾. Vgl. hierüber 24. Zunächst handelt es sich darum, das Quecksilberthermometer für sich zu berichtigen.

A. Eispunkt.

Man taucht das Thermometer in reinen schmelzenden Schnee oder reines (gewaschenes) fein zerstoßenes, besser geschabtes oder auf einem Reibeisen zerkleinertes Eis, mit destillirtem Wasser zu einem Brei angefeuchtet. Die Quecksilbersäule soll möglichst ganz in das Eis eintauchen; Einschlußthermometer sind bis über den Nullpunkt einzusenken und nur während der Ablesung oben soweit nötig vom Eise zu befreien, nicht etwa herauszuziehen, da hierbei die warme Luft einströmt. Besondere Beachtung verlangt das etwaige Abschmelzen des Eises von der Quecksilberkugel, welches in warmer Umgebung beträchtliche Fehler bewirken kann.

Dem Punkte, auf welchen sich die Quecksilbersäule einstellt, nachdem das Thermometer die Temperatur des Eises angenommen hat, entspricht die Temperatur Null.

Je wärmer die umgebende Luft ist, desto sorgfältiger muß man die obigen Vorsichtsmafsregeln beobachten.

B. Siedepunkt.

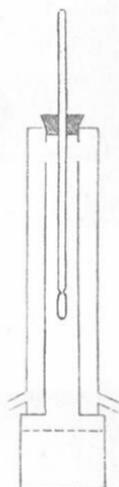
Man bringt das Thermometer in die Dämpfe von Wasser, welches in einem Metallgefäfs oder auch einem Glasgefäfs mit

1) Die physikalisch-technische Reichsanstalt in Berlin aicht eingesandte Thermometer nach dem Luftthermometer, auch mit Rücksicht auf die Depression des Nullpunkts (22 C).

hineingeworfenen Metallstücken kräftig siedet. Die Temperatur des Wasserdampfes ergibt sich aus dem Druck, unter welchem das Wasser siedet, d. h. aus dem nach **20** reducirten Barometerstande mit Hilfe von Tab. 13b. Bis auf $\frac{1}{100}$ Grad richtig kann man zwischen 715 und 770 mm für jeden Barometerstand b die Siedetemperatur t des Wassers auch ohne Tabelle berechnen nach der Formel

$$t = 100^{\circ} + 0,0375^{\circ} \cdot (b - 760).$$

Die Thermometerkugel wird nicht in das siedende Wasser gebracht, sondern etwas über die Oberfläche. Ist das Wasser nicht rein, so muß das Anspritzen des Thermometers verhütet werden. Übrigens soll auch hier möglichst die ganze Quecksilbersäule in Dampf befindlich sein. — Der Ausgang für die Dämpfe muß so weit sein, daß nicht im Innern des Gefäßes ein Überdruck entsteht, oder man mißt diesen Überdruck mittels eines aus dem Innern des Gefäßes kommenden Wassermanometers. Der 14^{te} Teil der gehobenen Wassersäule wird zu dem Barometerstande hinzugezählt. — Die Flamme wird von den nicht benetzten Teilen der Gefäßwände in einiger Entfernung gehalten. — In dem neben gezeichneten Gefäß braucht die Quecksilberkugel nicht dicht über dem Wasser zu stehen. — Die Durchwärmung bedarf besonders bei Einschlußthermometern einige Zeit. Man soll mit der Ablesung warten, bis der Stand unveränderlich ist.



Beispiel. Reducirter Barometerstand (**20**) = 742 mm. Das Thermometer zeigte 99,8. Siedetemperatur (Tab. 13b) = 99,33° (aus der Formel $100 - 0,0375 \cdot 18 = 99,33^{\circ}$). Folglich liegt die Temperatur 100° bei dem Teilstrich $99,8 + 0,67 = 100,47$; Korrektion der Ablesung = -0,47°.

C. Veränderlichkeit der Fixpunkte.

1. Neigung und Druck. Einen kleinen Einfluß auf die Einstellung des Quecksilbers hat bei langen Säulen wegen des Quecksilberdruckes die Lage des Thermometers gegen die Vertikale. Dieser Einfluß ist empirisch zu bestimmen. Findet man, daß das Thermometer dieselbe Temperatur in horizontaler Lage um δ höher angiebt als in vertikaler Lage, so hat die

Korrektion des Thermometers auf vertikale Lage bei einer Neigung um den Winkel φ den Betrag $\delta \cdot \sin \varphi$. Der Faktor δ ist der Höhe der Quecksilbersäule proportional. Auf empfindliche Thermometer hat auch veränderlicher Druck, z. B. die Tiefe des Eintauchens oder der wechselnde Barometerstand einen der Änderung proportionalen Einfluss, den man empirisch ermittelt.

2. Allmähliches Aufrücken der Fixpunkte. Wegen der langsamen Zusammenziehung des geblasenen Glases rücken die beiden festen Punkte neuer Thermometer zunächst aufwärts, und zwar um nahe gleich viel. Das Aufrücken dauert mit verminderter Geschwindigkeit unter Umständen Jahre lang fort und kann mehr als 1° betragen. Durch langes Erwärmen, etwa auf Siedetemperatur, kann man den Proceß beschleunigen.

3. Depression der Einstellung nach Erwärmungen. Da die Ausdehnung des Glases nach jeder Erwärmung des Thermometers eine Nachwirkung hat, welche erst mit der Zeit verschwindet, so läßt jede Erwärmung eine Erweiterung des Gefäßes (Nachwirkungs-Dilatation) und dadurch einen tieferen Stand des Quecksilbers, eine nach der Glassorte und der Größe und Dauer der Erwärmung verschiedene „Depression des Nullpunktes“ zurück. Dieselbe verliert sich anfangs rascher, später langsamer mit der Zeit und kann nach längerer stärkerer Erwärmung nach Wochen noch merkbar sein.

Allgemein beginnt ein erwärmt gewesenes Thermometer in konstanter niederer Temperatur bald langsam zu einem Endwert zu steigen.

Wird das Thermometer nach längerem Verweilen (etwa $\frac{1}{2}$ St.) in siedendem Wasser in Eis gebracht, so nimmt es bald vorübergehend einen tiefsten Stand an. Diesen nennt man wohl den „für 100° maximal deprimirten Nullpunkt“. Derselbe charakterisirt ein Thermometer mit derselben Bestimmtheit wie der Eispunkt, welcher nach sehr langem Verweilen im Eise entsteht; und da der letztere bei Thermometern, welche beträchtlich erwärmt worden waren, eine sehr große Zeit zur Beobachtung in Anspruch nimmt, so kann die Beobachtung des so maximal deprimirten Eispunktes vorzuziehen sein.

Die Anfangsdepression nach langer Erwärmung auf t° läßt sich durch den Ausdruck $at + bt^2$ darstellen; a und b hängen von der Glassorte ab.

Zwischen 0 und 100° ist für mittleres Thüringer Glas (welches Kali und Natron enthält) a , für Jenaer Thermometerglas und das französische Thermometerglas Verre dur (die wesentlich nur 1 Alkali enthalten) b klein gefunden. Nach längerer Erwärmung auf t° beträgt die Depression in Hunderteln Grad für Jena 16 $0,065t + 0,0003t^2$; Jena 59 $0,049t - 0,00015t^2$; Verre dur $0,100t + 0,00009t^2$. (Thiesen, Scheel und Sell, Z. S. f. Instr. 1896, 58.) Für $t=100^{\circ}$ bez. 0,09, 0,03 und $0,11^{\circ}$; gewöhnl. Thür. Glas etwa $0,5^{\circ}$; Jena 122 (alkalifrei) 0,01 bis $0,02^{\circ}$.

4. Aufrücken durch Erhitzen. Verweilen in sehr hoher Temperatur kann unter der Einwirkung des Luftdrucks ein dauerndes, unter Umständen erhebliches Hinaufrücken (bis $+20^{\circ}$) der festen Punkte zur Folge haben. Thermometer für hohe Temperaturen sind vor dem Gebrauch einige Tage lang zu erhitzen und langsam zu kühlen. Öfteres Kontrolliren des Nullpunkts ist stets anzuraten.

D. Definition und Berechnung der Temperatur.

Wir setzen ein richtig kalibriertes Thermometer (23) voraus. Die gewöhnliche Definition der Temperatur läßt das Thermometer in allen Temperaturen zur Ruhe kommen. Nullpunkt ist derjenige Punkt, an welchem die Einstellung nach langem Verweilen im Eise anlangt; von hier bis zu der Einstellung bei längerem Sieden sind 100 Grade und nun wird die Temperaturskala einfach nach gleichen Volumteilen zwischen diesen festen Punkten gerechnet.

Insofern aber der Abstand zwischen dem Siedepunkt (100°) und dem gleich nach diesem bestimmten Nullpunkt konstanter und außerdem leichter zu bestimmen ist, als das eben benutzte Intervall, weil die vorige Operation lange Zeiträume erfordert; weiter, da vorausgegangene andere Temperaturen die folgenden Einstellungen beeinflussen; endlich, da die Depression des Nullpunktes nicht der Temperatur proportional ist, wodurch in der obigen Definition sogar ein kleiner Fehler entsteht, so brauchen feine thermometrische Messungen neuerdings folgende Definitionen (Pernet):

1. Grad ist der 100^{te} Teil der Strecke zwischen dem Siedepunkt und dem gleich nach dem Sieden gefundenen Eispunkt.
2. Die Temperatur t wird immer von demjenigen Nullpunkt gerechnet, welchen man unmittelbar nach der Temperatur-

beobachtung findet oder finden würde. (Der Nullpunkt ist in dieser Definition also eine veränderliche Gröfse.) Vergl. über die Berechnung C 3.

Literatur zu C u. D: Pernet, Thermometrie in Winkelmann, Handbuch II, 2; Guillaume, Traité prat. de la thermométrie, Paris 1889; Thiesen, Grunmach, Wiebe, Weinstein, metronom. Beiträge Nr. 3, 1881; Wiebe, Z. S. f. Instr. 1888, 373; 1890, 207; und Böttcher ib. 1888, 409; Chappuis, Mém. du bur. internat. des poids et mesures 1893, 165; Z. S. f. Instr. 1894, 141; Pernet, Jaeger u. Gumlich, Abh. d. Phys. techn. Reichsanst. Bd. 1; Z. S. f. Instr. 1895, 2, 41, 81 u. 117.

E. Herausragender Faden.

Eine beträchtliche Schwierigkeit genauer Temperaturmessung entsteht in der Regel, sobald gröfsere Strecken des Quecksilberfadens nicht mit in den zu messenden Raum eintauchen. Da der „scheinbare Ausdehnungskoeffizient“ des Quecksilbers im Glase, d. h. der Unterschied der Volum-Ausdehnungskoeffizienten beider Substanzen für gewöhnliches und Jenaer Thermometerglas Nr. 16 0,000156 bez. für Jen. Therm.-Glas Nr. 59 0,000165 oder Verre dur 0,000158 beträgt, so hat man zu der Ablesung t hinzu-

$$0,000156 \text{ bez. } 0,000165 \text{ oder } 0,000158 \cdot a(t - t_0),$$

wenn t_0 die Temperatur, a die in Graden ausgedrückte Länge des herausragenden Fadens ist. Schwierig ist aber die genaue Feststellung der mittleren Temperatur des herausragenden Fadens.

1. Man nimmt ein kleines Hilfsthermometer, dessen Gefäfs etwa in der mittleren Höhe des herausragenden Fadens angebracht ist, oder vielleicht mehrere in verschiedenen Höhen angebrachte, und beurteilt die Temperatur des Fadens aus den Ablesungen am Hilfsinstrument.

Über die Anwendung einer Korrektionsröhre neben dem Thermometer vgl. Guillaume, C. R. 112 I, 87. 1891. Über ein Fadenthermometer hierfür s. Mahlke, Z. S. f. Instr. 1893, 58; 1894, 73.

2. Ein anderes Verfahren ist das folgende (Mousson, Wüllner). Man setzt für den herausragenden Faden die Temperatur des Zimmers, aber als Fadenlänge, welche auf dieser Temperatur sich befindet, nicht die ganze herausragende Länge, sondern man zieht von dieser Länge eine konstante Gröfse α ab, welche sich folgendermaßen bestimmt. Das Thermometer zeige in einem warmen Bade von konstanter Temperatur (etwa dem Siede-

gefäßs S. 101) die Einstellung T , wenn es ganz eingetaucht ist, während es, um A Grade herausgezogen, nach längerer Zeit nur t anzeige. τ_0 sei hierbei die Lufttemperatur. Dann ist

$$\alpha = A - \frac{1}{0,000156} \cdot \frac{T-t}{t-\tau_0}.$$

Das so gefundene α ist also bei dem Gebrauch dieses Thermometers immer von der herausragenden Fadenlänge a abzuziehen und dann die Korrektion nach der ersten Formel, aber mit t_0 als Lufttemperatur zu berechnen.

In höheren Temperaturen bei herausragenden Thermometerteilen auf Abdestillation von Quecksilber achten!

23. Kalibrierung eines Thermometers.

Es kommt vor, daß ein Thermometer wegen des ungleichmäßigen Querschnitts in hohen Temperaturen um 10^0 falsch ist.

Die Korrektionstabelle wird, unter der Voraussetzung einer richtigen Längenteilung und ungefährer Übereinstimmung mit der richtigen Temperatur durch Kalibrierung in Verbindung mit der Bestimmung der Fixpunkte folgendermaßen erhalten. Zur Kalibrierung, d. h. zur Vergleichung der Volumina, welche der Längenteilung entsprechen, dient ein von der übrigen Masse abgetrennter Quecksilberfaden. Vgl. auch **19a**.

Ablösen eines Fadens. Man hält das Thermometer verkehrt und führt einen leichten Stoß gegen das Ende aus. Dann löst sich ein Faden ab, oder es fließt zunächst das ganze Quecksilber, indem es sich in der Kugel von der Wandung löst. Das Abreißen wird meistens durch ein irgendwo dem Glase anhaftendes mikroskopisches Luftbläschen bewirkt, welches sich zu einer größeren Blase ausdehnt. Reißt das Quecksilber in der Kugel, so läßt man durch rasches Aufrichten des Thermometers die dort gebildete Blase in den Eingang der Röhre aufsteigen, was mit einiger Geduld immer gelingt. Dann reißt die Säule im Eingang der Röhre ab.

Der Faden wird etwa um p Grade länger sein, als gewünscht wird. Man erwärmt, während der Faden abgetrennt ist, die Kugel; die Luft wird vor dem ansteigenden Quecksilber fortgeschoben. Darauf läßt man den Faden rasch zu dem übrigen Quecksilber zurückfließen und merkt sich die Ein-

stellung im Augenblick des Zusammenstoßes. Das Luftbläschen bleibt, wenn die beiden Quecksilbermassen in Berührung getreten sind, an dem Punkte der Glasröhre haften, wo der Zusammenstoß erfolgte. Läßt man also um p Grade abkühlen und wiederholt die Neigung und Erschütterung, so reißt jetzt ein Faden von der verlangten Länge ab.

Ist umgekehrt ein Faden um p zu kurz, so vereinigt man ihn mit der übrigen Masse, erwärmt nach der Vereinigung um p , dann reißt die gewünschte Länge ab.

Wenn auch nicht auf das erste Mal, so gelingt es nach einigen Wiederholungen immer, bis auf Bruchteile eines Grades genau Fäden von willkürlicher Länge zu erhalten. Nur für sehr kurze Fäden versagt das Verfahren wohl, so daß man sich dann, wie unten gezeigt wird, durch kombinirte verschiedene Fäden helfen muß.

Einstellung und Ablesung des Fadens. Durch gelindes Neigen und Erschüttern läßt sich das eine Ende des Fadens mit großer Genauigkeit auf einen beliebigen Teilstrich einstellen. Für feinere Beobachtungen, insbesondere mit dem Fernrohr, begnügt man sich mit genäherter Einstellung und schätzt die Zehntel Grade an beiden Enden des Fadens. Daß die Beobachtungen wiederholt werden und durch Mittelnehmen verbessert werden können, ist selbstverständlich.

Zur Vermeidung der Parallaxe legt man eine Spiegelplatte unter und hält das Auge so, daß sein Bild mit dem abgelesenen Teilstrich zusammenfällt; legt man das Thermometer hierbei senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Augen, so braucht man kein Auge bei dem Ablesen zu schließen. Oder man stellt eine Lupe fest auf und verschiebt das Thermometer parallel mit sich selbst. Am genauesten ist die Ablesung mit dem Fernrohr.

Beobachtung und Berechnung. Die Kalibrirung kann man verschieden ausführen. In jedem Falle stelle man vor der Beobachtung den Plan fest, weil man sonst auf verwickelte Rechnungen geführt werden könnte. Eis- und Siedepunkt sollen als Endpunkte verglichener Volumina vorkommen. Beobachtungen nach dem folgenden Schema werden für gewöhnliche Zwecke genügen, um so mehr, da vollständig rektificirte Queck-

silberthermometer nach der Glassorte differieren können. (Vgl. 24 Schluß.)

Das Intervall a , in welchem kalibriert wird, sei in 100 teilbar, also $n = 100/a$ eine ganze Zahl. Wir lösen einen Faden von nahe der Länge a ab. Diesen legen wir folgeweise auf die Strecken von nahe 0 bis a , a bis $2a$ u. s. w. (vgl. über stark fehlerhafte Thermometer die Bemerkung weiter unten). Der Faden nehme die Anzahl Teilstriche ein:

$a + \delta_1$	auf der Strecke	0	bis	a ,
$a + \delta_2$	„ „	„	„	$2a$,
.
$a + \delta_n$	„ „	„	„	$(n-1)a$ „ 100,
				u. s. w.

Ferner liege (22) die Temperatur 0° bei dem T.-Str. p_0 ,

„ „ 100° „ „ „ $100 + p_1$.

Die Größen $\delta_1, \delta_2 \dots$ sowie p_0 und p_1 sind also kleine Zahlen, in Skalenteilen und deren Bruchteilen ausgedrückt, die positiv oder negativ sein können. Setzen wir zur Abkürzung

$$s = 1/n \cdot (p_0 - p_1 + \delta_1 + \dots + \delta_n),$$

(die Summe der δ nur zwischen 0 und 100 genommen!) so ist für den Teilstrich die Korrektur

0	-	p_0
a	$s -$	$p_0 - \delta_1$
$2a$	$2s -$	$p_0 - \delta_1 - \delta_2$
.	.	.
ma	$ms -$	$p_0 - \delta_1 - \delta_2 \dots - \delta_m$.

Oder auch: für den Teilstrich ma ist die Korrektur Δ_m , wenn Δ_{m-1} diejenige für den Teilstrich $(m-1)a$ ist,

$$\Delta_m = \Delta_{m-1} + s - \delta_m.$$

Die unter „Korrektur“ enthaltenen Zahlen geben also, der nebenstehenden Ablesung hinzugefügt, resp. wenn negativ von ihr abgezogen, den Stand, welchen das Thermometer mit richtigem Kaliber, Nullpunkt und Siedepunkt zeigen würde. Vgl. aber noch 22 C und 24.

Für die zwischenliegenden Grade interpoliert man eine Tabelle auf gewöhnlichem Wege, am besten graphisch.

Beweis. Der Faden, n mal aneinandergelegt, nimmt das Volumen von Teilstrich 0 bis 100, vermehrt um $\delta_1 + \dots + \delta_n$ ein. Da aber 0° bei p_0 ,

100° bei $100 + p_1$ liegt, also der Vermehrung des Quecksilbervolumens von Teilstrich 0 bis 100 eine Temperaturzunahme von $100 + p_0 - p_1$ Graden entspricht, so bedeutet das Volumen des Fadens die Temperaturzunahme

$$1/n \cdot (100 + p_0 - p_1 + \delta_1 + \dots + \delta_n) = a + s \text{ (s. oben).}$$

Also entspricht einem Steigen des Quecksilbers

vom T.-Str. 0 bis a	die Temperatur-Zunahme	$a + s - \delta_1$,
„ „ a „ $2a$ „	„ „	$a + s - \delta_2$ u. s. w.
oder vom T.-Str. 0	die Temperatur-Zunahme	
bis a	$a +$	$s - \delta_1$
„ $2a$	$2a +$	$2s - \delta_1 - \delta_2$
„ ma	$ma +$	$ms - \delta_1 - \delta_2 \dots - \delta_m$.

Die Ausdrücke hinter dem Strich würden die Thermometer-Korrekturen sein, wenn der T.-Str. 0 richtig wäre. Da ihm die Temperatur $-p_0$ entspricht, so ist überall noch p_0 abzuziehen.

Beispiel. Ein Thermometer für hohe Temperaturen soll, was für gewöhnliche Zwecke genügt, von 50° zu 50° kalibriert werden; also $n = 100 : 50 = 2$. Ein Faden nahm die Strecken ein

von T.-Str.	0,0 bis 50,9	$\delta_1 = +0,9$
	50,0 „ 100,4	$\delta_2 = +0,4$
	100,1 „ 150,3	$\delta_3 = +0,2$
	149,8 „ 199,6	$\delta_4 = -0,2$ u. s. w.

Der Eispunkt war auf T.-Str. $+0,6$, die Temperatur 100° auf T.-Str. 99,7 gefunden; also $p_0 = +0,6$, $p_1 = -0,3$ und

$$s = 1/n \cdot (p_0 - p_1 + \delta_1 + \delta_2) = \frac{1}{2} (+0,6 + 0,3 + 0,9 + 0,4) = +1,1.$$

Also für Teilstrich beträgt die Korrektur

0	$-0,6$	$= -0,6$
50	$1,1 - 0,6 - 0,9$	$= -0,4$
100	$2,2 - 0,6 - 0,9 - 0,4$	$= +0,3$
150	$3,3 - 0,6 - 0,9 - 0,4 - 0,2$	$= +1,2$
200	$+1,2 + 1,1 + 0,2$	$= +2,5$ u. s. w.

Die für 100 berechnete Korrektur liefert teilweise eine Probe der Richtigkeit der Rechnung.

Thermometer mit größeren Korrekturen. Wie man sieht, setzt die obige Anweisung voraus, daß das zu kalibrierende Thermometer nicht etwa in hohem Grade unkalibrisch ist. Denn wir haben nicht berücksichtigt, daß $\delta_1, \delta_2, \dots$ eigentlich nicht Temperaturgrade, sondern Skalenteile bedeuten; auch nicht, daß manche Strecken von dem Faden nicht bedeckt oder doppelt bedeckt waren. Je unrichtiger das Thermometer wäre, desto weniger würde diese Vereinfachung gestattet sein.

Es wird meist genügen, in einem solchen Falle so zu verfahren: Man bestimmt zuerst Eispunkt und Siedepunkt des

Thermometers. Man nimmt sodann einen Faden nahe von solcher Länge, daß derselbe, n mal aneinander gelegt, die Strecke vom Eispunkt bis zum Siedepunkt genau ausfüllen würde. Man beobachtet ihn endlich, von dem Eispunkt anfangend, in solchen Lagen, daß die nächste sich der vorigen sehr nahe anschließt. Alsdann rechnet man gerade so wie vorhin. Die in der Schlusstabelle gegebenen Korrekturen gelten aber nicht genau für die Teilstriche $0, a, 2a$ etc., sondern für die denselben benachbarten Stellen, von denen bezw. bis zu denen der Quecksilberfaden gegangen war. Die Herstellung einer bequemen Korrektions-tabelle geschieht wieder graphisch.

Kalibrirung durch mehrere abgelöste Fäden. Nicht immer gelingt die Abtrennung eines so kurzen Fadens wie das Intervall a , in welchem kalibriert werden soll. Dann muß man sich mit mehreren Fäden helfen, deren Längen verschiedene Vielfache von a sind. Durch einen Faden von der Länge ka kann man den Skalenraum 0 bis a mit ka bis $(k+1)a$ vergleichen, indem man den Faden zuerst zwischen 0 und ka und dann zwischen a und $(k+1)a$ bringt etc.; denn das Volumen, welches bei der Verschiebung auf der einen Seite frei wird, ist gleich dem auf der anderen Seite neu eingenommenen. Zum Beispiel kann ein Faden von beiläufig 40° Länge dazu dienen, um 0 bis 20 mit 40 bis 60 zu vergleichen.

Um aber alle Teile auf dasselbe Maß zurückzuführen, müssen mehrere Fäden genommen werden, z. B. von der Länge $2a$ und $3a$. Mit denselben führt man die zu vergleichenden Volumina alle auf möglichst kurzem Wege auf ein und dasselbe Intervall zurück, z. B. auf das mittelste und kann dann nach dem oben aufgestellten Schema die Korrektions-tabelle ausrechnen. Ein Beispiel wird dies klar machen.

Beispiel. Ein Thermometer soll zwischen 0 und 100 von 20 zu 20° kalibriert werden, mittels zweier Fäden von 40° resp. 60° Länge. Wir betrachten zunächst die Strecke 40 bis 60 als das Volumen, mit dem wir die übrigen Strecken vergleichen wollen. Wir reduciren also die Beobachtungen auf diejenigen Zahlen, welche ein Quecksilberfaden F geliefert haben würde, der das Volumen von T.-Str. 40 bis 60 gerade ausfüllt. Nach früherer Bezeichnung (S. 107) ist also $\delta_s = 0$.

Nun nehme der ungefähr 40° lange Faden die Strecken ein
 T.-Str. $+0,3$ bis $40,0$ $20,7$ bis $60,0$.

Der Faden F' würde also gereicht haben

von T.-Str. $+0,3$ bis $20,7$; also $\delta_1 = +0,4$.

Gerade so führt man durch Beobachtung von 40 bis 80 und 60 bis 100 die Strecke 80 bis 100 auf F' zurück. Man finde $\delta_5 = -0,7$.

Jetzt nehmen wir einen Faden von 60° Länge, legen ihn zwischen 0 und 60 , sowie 20 und 80 . Dadurch wird 60 bis 80 auf 0 bis 20 reducirt, und da letztere Strecke bereits mit 40 bis 60 verglichen worden ist, auch auf den Faden F . Die eingenommenen Strecken seien T.-Str. $0,0$ bis $60,2$ und $20,0$ bis $79,6$; so ist 0 bis 20 gleich $60,2$ bis $79,6$. Der Faden F' aber ist um $0,4$ länger als 0 bis 20 , würde also von $60,2$ bis $80,0$ gereicht haben, also $\delta_4 = -0,2$.

Endlich sei ebenso durch Beobachtungen zwischen 20 bis 80 und 40 bis 100 gefunden $\delta_2 = +0,3$.

Ferner sei die Temperatur 0° und 100° bei T.-Str. $+0,1$ und $100,8$ gefunden, also $p_0 = +0,1$, $p_1 = +0,8$.

Die Anzahl der zwischen 0 und 100 verglichenen Strecken ist $n = 5$. Hieraus berechnen wir (S. 107)

$$s = \frac{1}{5} (+0,1 - 0,8 + 0,4 + 0,3 + 0,0 - 0,2 - 0,7) = -0,18.$$

Die Korrektionstabelle wird unter Benutzung der Formel

$$\Delta_m = \Delta_{m-1} + s - \delta_m$$

Teilstrich	Korrektion
0	-0,10
20	-0,10 - 0,18 - 0,4 = -0,68
40	-0,68 - 0,18 - 0,3 = -1,16
60	-1,16 - 0,18 + 0,0 = -1,34
80	-1,34 - 0,18 + 0,2 = -1,32
100	-1,32 - 0,18 + 0,7 = -0,80.

Die letzte Zahl ist eine Probe für die Richtigkeit der Rechnung.

Thermometer für Kalorimeter. Bei diesen kommt höchstens die Strecke 11 bis 28 in Betracht. Um diese einfach zu erhalten, bestimmt man an einem Normalthermometer mit Fäden von 50° bez. $33,3^\circ$, deren Länge durch zwei-, bez. dreimaliges Ansetzen zwischen 0 und 100 ermittelt ist, die Punkte 50 , $33,3$ und $16,7^\circ$. Mit diesen Punkten wird dann das kalorimetrische Thermometer im Bade verglichen. Durch einen Faden von $11,1^\circ$ ermittelt man an ihm selbst noch die Punkte $11,1$, $22,2$ u. $27,8$. Die meisten kalorimetrischen Versuche kann man so leiten, daß die Temperaturen den eben bestimmten Punkten nahe liegen.

Über feinere Kalibrirungsmethoden vgl. z. B. v. Oettingen, Über die Korrektion des Thermometers, Dorpat 1865; Thiesen, Carl. Rep. 15, 285. 1879; Marek ib. S. 300.

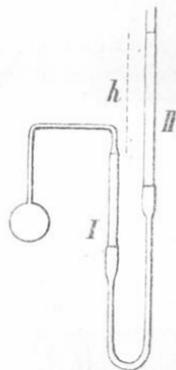
Vergleichung zweier Thermometer. Ein Thermometer läßt sich auch durch Vergleichung mit einem Normalthermometer korrigieren. Beide Instrumente werden, die Kugeln dicht nebeneinander, in ein größeres Gefäß mit Flüssigkeit gebracht, welches, etwa mit Filz, gegen Wärmeabgabe möglichst geschützt ist. Den Gang der Temperatur eliminirt man durch Wiederholung jeder Gruppe von Ablesungen in umgekehrter Reihenfolge. Vor jeder Ablesung wird gerührt. In hohen Temperaturen wird die Vergleichung auf diesem Wege leicht ungenau. Eine grössere Sicherheit als das Flüssigkeitsbad bietet eine siedende Flüssigkeit (Tab. 16a), am besten in einem Gefäß mit Rückflusskühler (7, 27), in welche man beide Thermometer einführt. Vgl. auch 22 E.

Über Bäder für sehr hohe und niedrige Temperaturen s. auch 7, 27.

24. Luftthermometer.

Das Normalinstrument, auf welches strenge Temperaturmessungen bezogen werden müssen, ist das Luftthermometer. Ein vollkommenes Gas (Wasserstoff und nahe auch die trockene Luft) dehnt sich bei konstantem Druck für jeden Grad Temperatur-Zuwachs um 0,00367 (Wasserstoff 0,00366) seines Volumens bei 0° aus. In demselben Verhältnis wächst bei konstantem Volumen der Druck.

Das einfachste Luftthermometer (Modell von Jolly) beruht auf letzterem Satze. Ein mit trockener Luft gefüllter Glasballon von etwa 50 cbcm Inhalt steht durch ein Kapillarrohr mit einer vertikalen Glasröhre I in Verbindung, in welcher die Luft über Quecksilber abgegrenzt wird. Durch die Erhöhung oder Vertiefung des Quecksilberstandes in einem mit I durch einen Gummischlauch kommunizierenden Rohre II kann man die Oberfläche in I bis zu einer nahe an der Mündung des Kapillarrohres befindlichen Marke „einstellen“. Die Verhältnisse sind so zu wählen, daß auch bei den niedrigsten Temperaturen der Schlauch überall unter innerem Überdruck steht, weil anderenfalls leicht Luft einsickert.



Erstes Verfahren. Um das Instrument zu graduiren, umgibt man die Kugel mit schmelzendem Eise (22A), stellt das Quecksilber ein und beobachtet den Barometerstand b_0 und die Höhe h_0 der Kuppe in II über derjenigen in I. Setzen wir $b_0 + h_0 = H_0$, wo h_0 negativ ist, wenn das Quecksilber in II tiefer steht. Alle b und h werden auf dieselbe Temperatur, z. B. auf 0° reducirt (20).

Hat die Kugel eine andere zu messende Temperatur t bei dem Barometerstand b und der wieder „eingestellten“ Quecksilberhöhe h , so ist, wenn $b + h = H$,

$$t = \frac{H - H_0}{0,00367 \cdot H_0 - 3\beta \cdot H}$$

Ist der Ausdehnungskoeffizient der Glassorte (7, 5; 26II) nicht bekannt, so mag man $3\beta = 0,000025$ setzen. Bis zu etwa 60° kann dann hinreichend genau gerechnet werden $t = 275 \cdot (H - H_0) / H_0$.

Darf man nicht, wie hier geschehen ist, das Volumen der Kapillarröhre bis zur Einstellungs-marke (v') gegen dasjenige des Ballons (v) vernachlässigen, so ist obiges t zu multipliciren, wenn t' die Zimmertemperatur, mit

$$1 + \frac{v'}{v} \frac{H}{H_0} \frac{1}{1 + 0,00367 \cdot t'}$$

Das Verhältniß $v':v$ wird durch Auswägen mit Quecksilber gefunden.

Als Probe der Formel für t dient die Messung der Siedetemperatur des Wassers (Tab. 13b).

Beweise. Die Luftmenge bleibt konstant. Ist v das Volumen des Ballons bei 0° , d_0 die Dichtigkeit der Luft für 0° und 760 mm, so ist die Luftmenge, wenn wir $0,00367 = \alpha$ setzen,

$$\begin{array}{cc} \text{bei } 0^\circ \text{ und } H_0 & \text{bei } t \text{ und } H \\ \frac{d_0 H_0}{760} \left(v + \frac{v'}{1 + \alpha t'} \right), & \frac{d_0 H}{760} \left(\frac{v(1 + 3\beta t)}{1 + \alpha t} + \frac{v'}{1 + \alpha t} \right). \end{array}$$

Durch Gleichsetzung beider Ausdrücke und Multiplikation beider Seiten mit $(1 + \alpha t)/v$ kommt

$$H_0(1 + \alpha t) \left(1 + \frac{v'}{v} \frac{1}{1 + \alpha t'} \right) = H \left(1 + 3\beta t + \frac{v'}{v} \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'} \right),$$

$$\text{oder } t \left(\alpha H_0 - 3\beta H - \frac{v'}{v} \frac{\alpha}{1 + \alpha t'} (H - H_0) \right) = (H - H_0) \left(1 + \frac{v'}{v} \frac{1}{1 + \alpha t'} \right).$$

Schreibt man die linke Seite $t(\alpha H_0 - 3\beta H) \left(1 - \frac{v'}{v} \frac{\alpha}{1 + \alpha t'} \frac{H - H_0}{\alpha H_0 - 3\beta H} \right)$

und vernachlässigt in dem Faktor der kleinen Größe v'/c das im Nenner vorkommende $3\beta H$ gegen αH_0 , so entsteht (Formel 7, S. 9)

$$t = \frac{H - H_0}{\alpha H_0 - 3\beta H} \left(1 + \frac{v' H}{v H_0} \frac{1}{1 + \alpha t} \right),$$

wie zu beweisen war.

Zweites Verfahren. Dasselbe ist von genauen Werten für die Ausdehnungskoeffizienten und das Volumen der Kapillare weniger abhängig, weil (vgl. die Formel) der Faktor $(H_1 - H_0)/H_0$ bis $+150^\circ$ kleiner als $\frac{1}{5}$ bleibt. Man bestimmt Eispunkt und Siedepunkt des Instrumentes. Werden H_0 und H_1 als Druckhöhen für 0° und für die Temperatur t_1 des siedenden Wassers gefunden, so entspricht einer Druckhöhe H die Temperatur t

$$t = t_1 \frac{H - H_0}{H_1 - H_0} \left[1 - \frac{H_1 - H}{H_0} \left(\frac{3\beta}{0,00367} + \frac{v'}{v} \frac{1}{1 + 0,00367 \cdot t} \right) \right].$$

Sehr tiefe Temperaturen sind mit (trockenem!) Wasserstoff zu bestimmen; über sehr hohe vgl. 25a.

Über die Behandlung des Luftthermometers s. u. A. Chappuis, Trav et Mém. du Bur. internat. 6, 1888; Wiebe und Böttcher, Z. S. f. Instr. 10, 16 u. 233. 1890.

Quecksilber- und Luftthermometer. Das Quecksilber dehnt sich, verglichen mit der Luft, nicht genau gleichförmig aus.

Das Volumverhältnis ist, wenn t nach dem Luftthermometer gemessen wird, $v_t/v_0 =$

nach Regnault	$1 + 0,000179 \cdot t + 0,0,25 \cdot t^2$
„ Recknagel	$1 + 0,0001802 \cdot t + 0,0,094 \cdot t^2 + 0,0,105 \cdot t^3$
„ Wüllner	$1 + 0,0001812 \cdot t + 0,0,116 \cdot t^2 + 0,0,1021 \cdot t^3$
„ Thiesen, Scheel und Sell	$1 + 0,0001816 \cdot t + 0,0,078 \cdot t^2$

Letztere Formel ist für Wasserstoff-Temperaturen von 0 bis 100° geprüft.

Den Ausd.-Koeffizienten von mittlerer Temperatur auf 0° in Teilen von v_0 wird man hiernach gleich 0,0001815 setzen. Die relative Ausdehnung für 1° in Teilen des augenblicklichen Volumens ist bis über 200° wenig veränderlich $= 0,000181$. Dies drückt sich in der oft bequemeren Formel aus $\log(v_t/v_0) = 0,0000785 \cdot t$ (Bosscha).

Nach diesen Formeln das Quecksilberthermometer auf das Luftthermometer zurückzuführen ist leider nicht möglich, weil auch das Glas sich ungleichmäÙig ausdehnt und zwar nach der Sorte sehr verschieden. Fast alle Quecksilberthermometer geben, wenn Nullpunkt und Siedepunkt sowie das Kaliber richtig, bez. die Korrekturen nach 22, 23 eingeführt sind, zwischen 0 und 100° etwas zu große Werte. Bis 150° bleiben die Abwei-

chungen in der Regel kleiner als $0,5^{\circ}$, bis 250° können sie 4° , bis 350° 10° betragen.

Auch in dieser Beziehung geben die Jenaer Thermometergläser gute Resultate.

Wenn der Unterschied eines rektifizirten Quecksilberthermometers gegen das Luftthermometer bei 50° gleich Δ beobachtet ist, so kann man bis 120° den Unterschied δ für die Temperatur t nach Bosscha mit ziemlicher Annäherung berechnen als $\delta = t(100 - t) \cdot \Delta / 2500$.

Für die Jenaer Thermometergläser ist die Korrektion auf das Luftthermometer nach Wiebe, Z. S. f. Instr. 1890, 245 und Grützmaker ib. 1895, 250 und für Verre dur nach Chappuis

Temp.	-20°	0°	$+20$	40	60	80	100	120	140	160	180	200°
Glas Nr. 16	$+0,15^{\circ}$	\pm	$-,08$	$-,11$	$-,10$	$-,05$	\pm	$+,05$	$+,09$	$+,10$	$+,06$	$-,04^{\circ}$
„ 59		\pm	$-,03$	$-,03$	$-,01$	\pm	\pm	\pm	$-,06$	$-,18$	$-,39$	$-,71^{\circ}$
„ 122		\pm	\pm	$+,01$	$+,01$	$+,01$	\pm					
Verre dur	$+0,17$	\pm	$-,08$	$-,11$	$-,09$	$-,05$	\pm					
Temp.	200°	220	240	260	280	300°						
Glas Nr. 16	$-0,04$	$-,21$	$-,46$	$-,82$	$-1,30$	$-1,90^{\circ}$						

25. Elektrische Temperaturmessung.

Dieselbe ist besonders von Bedeutung, wenn die große Masse oder der Umfang eines Quecksilberthermometers hinderlich ist; außerdem in den höchsten und niedrigsten Temperaturen, wo die übrigen Mittel versagen (25a). Die Empfindlichkeit der elektrischen Methoden kann sehr weit getrieben werden.

I. Thermo-Element (Seebeck).

Benutzt wird die durch Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen zweier Metalle auftretende elektromotorische Kraft. Man lötet zwei gleich lange, z. B. Eisen- und Neusilber-Drähte aneinander und mit den anderen Enden an Kupferdrähte. Bringt man die erstere Lötstelle an den Punkt, dessen Temperatur gesucht wird, und erhält die beiden anderen Lötstellen zusammen auf einer bekannten Temperatur (etwa durch Eis auf 0°), so entsteht eine elektromotorische Kraft. Letztere wird gemessen, indem man die Enden der Kupferdrähte mit einem Galvanometer verbindet.

Zu den gebräuchlichen folgenden Thermo-Elementen ist die zu erwartende el. Kraft für 1° Temp.-Differenz in Mikrovolt (63 I) gesetzt:

Bi-Sb 100; Konstantan-Fe 53; „Patentnickel“ (d. h. die Legirung der deutschen Nickelmünzen)-Fe 45; Konstantan-Cu 40; Ni-Fe 32; Patentnickel-Pt 28; Neusilber-Fe 25; Ni-Cu 22; Pt-Fe 17; 5% IrPt-Pd 12; 10% Rhod. Pt oder 10% IrPt-Pt 10.

Für kleinere Temperaturdifferenzen kann Proportionalität der Stromstärke mit Temperaturdifferenz angenommen werden. Man braucht also nur einmal die Stromstärke bei bekannter Differenz zu messen, um aus jeder Beobachtung die Temperatur abzuleiten. Man nimmt ein Spiegelgalvanometer (66) von mäßigem Widerstande. Es ist gut, nur Kupferklemmen anzuwenden.

Für größere Differenzen wird empirisch eine Tabelle konstruiert, indem die Ausschläge für einige Temperaturen beobachtet werden. Hieraus interpoliert man durch Rechnung oder auf graphischem Wege eine Tabelle zum Gebrauch.

II. Widerstands-Thermometer („Bolometer“¹⁾) (Will. Siemens).

Der elektrische Widerstand von Metallen wächst mit der Temperatur, am stärksten bei reinen Metallen, insbesondere Eisen, Nickel, reinem Platin, wo der Temperaturkoeffizient (relative Änderung für 1°) 0,004 erreichen kann. Bei der Schärfe und Einfachheit der elektrischen Meßmethoden hat das Verfahren große Vorteile.

Man schaltet den Meßdraht mit einem gleichen Draht oder mit einem gleichen Rheostatenwiderstand in die Wheatstone'sche Brücke oder das Differentialgalvanometer (71b oder 71a; s. auch 72, Telephon).

Der Widerstand werde gefunden bei den bekannten Temperaturen t_0 und t_1 (z. B. 0 und 100°) gleich w_0 und w_1 , bei einer zu messenden Temperatur t gleich w , dann ist in den Grenzen eines merklich konstanten Temp.-Koeffizienten

$$t = t_0 + (t_1 - t_0) \cdot (w - w_0) / (w_1 - w_0).$$

Für weitere Grenzen bestimme man zunächst bei den bekannten Temperaturen t_0 t_1 t_2 die Widerstände w_0 w_1 w_2 . Schreiben wir

$$w_1 - w_0 = \gamma_1 \quad w_2 - w_0 = \gamma_2 \quad t_1 - t_0 = \tau_1 \quad t_2 - t_0 = \tau_2 \quad \text{und}$$

1) Die gebräuchliche Bezeichnung Bolometer paßt eigentlich nur auf die Messung strahlender Wärme (47b).

$$a = \frac{\tau_1 \gamma_2^2 - \tau_2 \gamma_1^2}{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_2 - \gamma_1)} \quad b = \frac{\tau_2 \gamma_1 - \tau_1 \gamma_2}{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_2 - \gamma_1)},$$

so bedeutet der Widerstand w die Temperatur

$$t = t_0 + a(w - w_0) + b(w - w_0)^2.$$

In noch weiteren Grenzen, wenn auch diese Formel nicht genügt, stellt man durch Beobachtung bei einer Anzahl von Temperaturen die letzteren als Funktion der Widerstände in einer Kurve dar, welcher die zu irgend einem Widerstande gehörige Temperatur entnommen werden kann.

Wenn die Temperatur t_0 eines Vergleichsdrahts aus demselben Material wie der Meßdraht wenig schwankt, so zählt man am einfachsten alle Temperaturen stets von t_0 an und addirt t_0 zu den so berechneten zu messenden Temperaturen. Den jedesmaligen Widerstand des Vergleichsdrahtes nimmt man als Einheit an.

Für das Temperaturbad kann bei kleinen Widerständen und kleinen Stromstärken reines Wasser dienen, wenn Platin gebraucht wird. Sicherer ist eine nicht leitende Flüssigkeit (Petroleum). Schwach werden die Ströme auch zu dem Zwecke genommen, Stromwärme zu vermeiden, welche besonders bei unsymmetrischen Verhältnissen beider Drähte Fehler bringt.

Die Meßwiderstände werden z. B. auf Glimmerplättchen aufgewickelt; Zuleitungsdrähte nimmt man, soweit sie mit erwärmt werden, am besten aus demselben Metall, nur dicker.

Über strahlende Wärme s. 47 b.

25 a. Messung hoher Temperaturen (Pyrometrie).

I. Luft-Pyrometer.

Fast bis zur Rotglut kann zum Gefäß außer Platin schwer schmelzbares Glas dienen. Glühend ist auch Platin unbrauchbar, weil es Flammengase durchläßt und Sauerstoff kondensirt. Bis etwa 1450° ist außen glasiertes Porzellan brauchbar, über 1200° allerdings nur, wenn der innere Druck vom äußeren nicht zu sehr abweicht. Die in hoher Temperatur für die Dichtung nötige Glasur erweicht bei etwa 1200°. In ganz hohen Temperaturen sind deshalb außen glasierte Gefäße (Innen-Glasur ist wegen Verdampfung unzulässig) unter Überdruck von außen zu halten, damit nicht die Glasur von innen durchbrochen wird.

Der schädliche Raum in der Kapillare bringt in hoher Temperatur grössere Korrekturen. Man kann dieselben durch den Kompensator eliminieren, ein Luftthermometer ohne Ballon (Deville und Troost), welches dicht neben dem eigentlichen Thermometer im gleichen Raume geheizt wird und also die Temperatur im schädlichen Raume messen läßt. Oder man mißt das Temperaturgefälle mit einem längs der Kapillare verschiebbaren Thermolement.

Verdrängungsverfahren (Regnault, V. Meyer). Aus einem Gefäß mit zwei Kapillaren wird die Luft bei der zu messenden Temperatur durch ein Gas (Kohlensäure, Chlorwasserstoff) verdrängt und über einer Flüssigkeit, welche das verdrängende Gas absorbiert, aufgefangen und gemessen. Ist das auf Trockenheit, auf 0° und den atmosphärischen Druck umgerechnete (15) Volumen der ausgetretenen Luft $=v_0$, das Volumen des Gefäßes $=v$, so war die Temperatur des letzteren $=273(v-v_0)/v_0$.

II. Elektrische Pyrometer.

Widerstand (25 II). Platin läßt sich bis etwa 1200° benutzen: weiter hinauf wird die Sublimation des Platins zu stark. Schwierigkeit bietet die Isolation, da die meisten Isolatoren im Glühzustande anfangen zu leiten. Flammengase ändern den Widerstand dauernd; sie müssen durch glasierte Porzellanröhren ferngehalten werden.

Thermolement (25 I). Besonders Platin gegen Platin-Rhodium (10% Rh; Le Chatelier) oder Platin-Iridium (10% Ir; Barus) sind bis gegen den Schmelzpunkt des Platins brauchbar. Man isoliert elektrisch durch ein über den einen Draht geschobenes unglasirtes Porzellan- oder Thonrohr und gegen Flammengase durch ein über das Ganze geschobenes glasiertes Porzellanrohr.

Die Aichung¹⁾ geschieht mit dem Luftthermometer, am einfachsten, indem man den Widerstand oder die Lötstelle in dem Luftgefäße anbringt. Oder man benutzt bekannte Schmelzpunkte (Pb 325° , Al 625° , Ag 970° , Au 1070° , Pd. 1580° ; Tab. 16 a), am einfachsten durch Einfügung eines 5 mm langen Drahtstücks

1) Die Phys.-Techn. Reichsanstalt prüft Thermolemente.

des bekannten Metalles in die Lötstelle; die thermoelektrische Kraft im letzten Augenblick vor dem Durchschmelzen wird beobachtet.

Ebenso lassen Schmelzpunkte von Metallen sich bestimmen. Oxydierbare Metalle sind durch einen Wasserstoffstrom zu schützen.

Langer und Meyer, Pyrochem. Unters., Braunsch. 1885. C. Barus, Die physik. Behandl. und die Messung hoher Temp., Leipzig 1892. (Enthält eine vollständige Übersicht und die Literatur über Pyrometrie.) Callendar, Über Widerstandspyrometer, Phil. Trans. 178, S. 161. 1887; 182, S. 119. 1891. Holborn und Wien, Wied. Ann. 47, 107. 1892 und 56, 360. 1895.

26. Bestimmung des Wärme-Ausdehnungskoeffizienten.

Linearen Ausdehnungskoeffizienten β nennt man die Verlängerung eines Stabes von der Länge Eins, kubischen 3β die Volumzunahme des Volumens Eins bei der Temperaturerhöhung um 1° . Für Flüssigkeiten wird die Ausdehnung stets nach Volumen gerechnet.

I. Durch Längenmessung.

Wenn ein Stab von der Länge l sich bei der Temperaturerhöhung t um λ verlängert, so ist $\beta = \lambda/lt$.

Die geringen Ausdehnungen werden gewöhnlich auf einen Kontakthebel übertragen. r sei der Abstand des Kontaktpunktes von der Drehaxe, α der Drehungswinkel, dann ist $\lambda = r \sin \alpha$, vorausgesetzt, daß bei einer der beiden Temperaturen der Hebelarm zur Stabrichtung senkrecht ist.

Der Drehungswinkel wird mit Spiegel und Skale (48; z. B. Anordnung von Edelmann) gemessen. Man richtet das Fernrohr auf den Fußpunkt der vom Spiegel auf die Skale gefällten Senkrechten, deren Länge = A Sk.-T. sei. Der Ausschlag durch die Temperaturänderung betrage e Skalenteile, so ist $\alpha = \frac{1}{2} \text{arc } \text{tge}/A$. Für ein kleines α kann man setzen $\sin \alpha = \frac{1}{2} \text{tg } 2\alpha$, also ist in diesem Falle $\lambda = \frac{e}{2} \frac{r}{A}$. Vgl. auch 48, 49 und das Beispiel in 3.

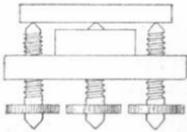
Größeren Temperaturunterschieden ist die Ausdehnung nicht mehr genau proportional. Man setzt dann die Länge bei der Temperatur t

$$l = l_0(1 + \beta t + \beta' t^2)$$

und bestimmt die beiden Koeffizienten β und β' aus mindestens drei Beobachtungen. Vgl. 3.

Über einen Apparat für kürzere Stäbe von Fuefs s. Glatzel, Pogg. Ann. 177, 497. 1877.

II. Durch Lichtinterferenz (Fizeau).

Die Ausdehnung wird in Lichtwellenlängen gemessen; man untersucht Platten von mäfsiger Dicke, welche zwei parallele Flächen haben, von denen die obere a polirt sein mufs. Diese verschiebt sich bei der Ausdehnung nach einer fast parallelen in kleinem Abstände darüber befindlichen ebenfalls planen Unterfläche b einer Glasplatte hin.  Homogenes Licht, welches an a und b gespiegelt wird, erscheint dem darüber befindlichen Auge mit Newton'schen Interferenzstreifen, welche sich bei der Verkürzung der Zwischenschicht um n Wellenlängen um $2n$ Streifenbreiten verschieben. Die Verschiebung wird durch ein Mikroskop an Marken gemessen, welche an der oberen Fläche angebracht sind. Die Änderung der Wellenlänge in der Luftschicht durch die Erwärmung (Tab. 20) und etwa durch Luftdruck-Schwankungen wird in Rechnung gesetzt.

Körper, welche keine spiegelnde Fläche haben, kann man untersuchen, indem man auf dieselben eine dünne Platte von bekannter Ausdehnung (Quarz) legt.

Die Ausdehnung der Stahlschrauben, welche die obere Platte tragen, mufs bekannt sein und in Rechnung gesetzt werden. Man bestimmt dieselbe nach der nämlichen Methode, an der polirten Oberfläche des Stahl-Tischchens selbst oder mit Hilfe einer auf dasselbe gelegten Quarzplatte.

Über homogene Lichtquellen s. 37d, daselbst auch die Bemerkung über das periodische Undeutlichwerden der Fransen von Natriumlicht. Die Wellenlängen s. in Tab. 19a.

Der Ausdehnungskoeffizient des Quarzes für die Temperatur t ist (Benoit) in der Richtung der Axe $0,0,0716 + 0,0,080 \cdot t$
senkrecht zur „ $0,0,1325 + 0,0,116 \cdot t$.

Fizeau, Pogg. Ann. 119, 87. 1863; 123, 515. 1864; 128, 564. 1866. Benoit, Trav. et Mém. du bur. internat. I. 1881 u. VI. 1888; Pulfrich, Z. S. f. Instr. 1893, S. 365, 401 u. 437 über das Fizeau'sche Dilatometer der Zeifs'schen Werkstätte; vgl. besonders daselbst auch die Bemerkungen über die Ermittlung der gewanderten Streifenzahl.

III. Durch Wägung.

Mit Quecksilber. Am häufigsten entsteht für Glassorten das Bedürfnis einer Kenntnis des Ausdehnungskoeffizienten. Man wägt einen in eine Spitze ausgezogenen Ballon bei zwei verschiedenen Temperaturen mit Quecksilber (19). Zur Füllung taucht man die Spitze des vorher erwärmten Ballons ein, worauf beim Erkalten Quecksilber aufgesaugt wird. Dies wiederholt man, indem zuletzt das Quecksilber zum Sieden gebracht wird, bis zur vollständigen Füllung. Endlich läßt man den Ballon unter Quecksilber bis zu einer niedrigen Temperatur t abkühlen. Die Wägung des so ganz gefüllten Ballons ergebe das Nettogewicht p des Quecksilbers. Alsdann erwärmt man bis zur Temperatur t' , wobei eine gewisse Quecksilbermenge ausfließt, und bestimmt wieder das Gewicht p' . Dann berechnet sich der kubische Ausdehnungskoeffizient des Glases

$$3\beta = 0,0001815 \frac{p'}{p} - \frac{1}{t'-t} \frac{p-p'}{p}.$$

Beweis s. f. S.

Mit Wasser. Wägt man bei zwei Temperaturen t und t' mit luftfreiem Wasser, so ist

$$3\beta = \frac{1}{t'-t} \left(\frac{p'}{p} \frac{Q}{Q'} - 1 \right) \text{ oder } = \frac{1}{t'-t} \left(\frac{p'}{p} \frac{v'}{v} - 1 \right),$$

wo die Dichtigkeiten Q und Q' oder die Volumina des Wassers v und v' zu t und t' aus Tab. 4 oder 5 genommen werden.

Um 100^0 herum hat im Verhältnis zu 4^0 das Wasser das Volumen $1,04327 + 0,00080(t-100)$.

Weil die Ausdehnung des Quecksilbers und in höherer Temperatur mehr noch die des Wassers diejenige der festen Körper weit übertrifft, so wird eine äußerst genaue Bestimmung der Temperatur verlangt.

Aus Dichtigkeitsbestimmungen. Sind die Dichtigkeiten s und s' eines Körpers für die Temperaturen t und t' hinreichend genau bekannt, so ist der Ausdehnungskoeffizient $3\beta = (s/s' - 1)/(t' - t)$.

IV. Ausdehnung von Flüssigkeiten.

1. Ein Glasgefäß — mit ausgezogener Spitze oder in der Form der Figuren S. 55 — halte bei gewöhnlicher Temperatur t

das Flüssigkeitsgewicht p , bei der höheren Temperatur t das Gewicht p' . Wenn 3β der kubische Ausdehnungskoeffizient des Glases (s. v. S. und 7, 5), so ist der mittlere Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit zwischen t und t' gleich

$$\alpha = 3\beta \frac{p'}{p} + \frac{1}{t'-t} \frac{p-p'}{p'}$$

Denn wenn v und v' das spezifische Volumen der Flüssigkeit für t und t' bezeichnen, so ist $\alpha = (v'/v - 1)/(t' - t)$. Nun ist offenbar $p'/p = [1 + 3\beta(t' - t)]v/v'$, also $v'/v = p/p' + 3\beta(t' - t)p/p'$, woraus diese und auch die Formel unter III sich leicht ergibt.

2. Man wäge einen Glaskörper bei zwei Temperaturen t und t' in einer Flüssigkeit. Wenn p und p' die Auftriebe, so gilt dieselbe Formel.

3. Ein Glasgefäß mit einem angeblasenen engen, geteilten Rohr (Dilatometer genannt) wird bis in das Rohr mit der Flüssigkeit gefüllt und die Einstellung der Säule bei den Temperaturen t bez. t' beobachtet. Sind die abgelesenen Volumina v bez. v' , so hat man als mittleren Ausdehnungskoeffizienten

$$\alpha = 3\beta \frac{v'}{v} + \frac{1}{t'-t} \frac{v'-v}{v}$$

Das Gefäß kalibriert man mit Quecksilber, die Strecken des Rohres desgleichen mit Quecksilberfäden, die man wägt (vgl. 19 und 19a). Noch einfacher ist es, zuerst eine Flüssigkeit von bekannter Ausdehnung in dem Apparat zu untersuchen und daraus die Volumenverhältnisse abzuleiten.

26a. Schmelzpunkt oder Gefrierpunkt.

So heißt diejenige Temperatur, bei welcher feste und flüssige Teile des Körpers nebeneinander bestehen können (Tab. 16a). Gemische mehrerer Körper, wie die meisten Fette, Paraffin, Glas haben im allgemeinen keinen scharfen Schmelzpunkt, sondern ein Temperaturintervall, innerhalb dessen sie erweichen. — Erstarrungstemperaturen sind meistens unsicher und können beträchtlich unter den Schmelztemperaturen liegen.

Schmelzpunkt eines Körpers. Die Ausführung einer Bestimmung ist nach der Natur des Körpers, besonders nach der Höhe des Schmelzpunktes sehr verschieden. Z. B. kann man in einem ausgezogenen Glasröhrchen eine kleine Menge geschmolzener Substanz aufsaugen und darin erstarren lassen. Der

starre Zustand wird sich von dem flüssigen meist durch eine Trübung des Tropfens unterscheiden. Man bringt das Röhrchen mit einem Thermometer in ein Bad (Becherglas mit Wasser, Petroleum, Paraffin etc.), welches man unter Umrühren langsam erwärmt, und beobachtet die Temperatur, bei welcher der Tropfen sich klärt oder beweglich wird. Die erste Beobachtung wird nur zur Orientirung dienen.

Sicherer ist die Anwendung größerer Mengen. Dieselben erwärmt man allmählich zusammen mit einem Thermometer. Bei dem Schmelzen bleibt die Temperatur einige Zeit lang stationär.

Über hohe Temperaturen s. 25 a. Man kann den Körper in einem Tiegel schmelzen, in welchen von oben oder durch den Boden ein mit einem dünnen Porzellanrohr geschütztes Thermo-element eingeführt wird. Bei richtig regulirter Heizung bleibt die Stromstärke während des Schmelzens einige Zeit konstant. Siehe auch in 25 a die thermoelektrische Methode für Metalldrähte.

Gefrierpunkt von Lösungen. Der Gefrierpunkt eines Lösungsmittels erniedrigt sich durch Auflösung eines Stoffes proportional der molekularen Konzentration der Lösung, solange die letztere nicht zu stark wird (Rüdorff, Coppet, Raoult). Ist p die in Grammen gemessene gelöste Menge in 1000 g des Lösungsmittels, M das chemische Molekulargewicht des gelösten Stoffes, so nennt man $p/M = \mu$ die in 1000 g gelöste Anzahl von Gramm-Molekülen und die Erniedrigung τ des Gefrierpunkts ist also

$$\tau = G \cdot \mu = G \cdot p/M \quad \text{oder} \quad M = G \cdot p/\tau.$$

Der Faktor G , die „molekulare osmotische Arbeit“, ist von der Art des gelösten Stoffes unabhängig, hat jedoch für jedes Lösungsmittel einen besonderen Wert. G ist theoretisch (van't Hoff) durch die Schmelztemperatur t und die Schmelzwärme α (Tab. 16a) des Lösungsmittels gegeben als

$$G = 0,00198(273 + t)^2/\alpha,$$

z. B. für Wasser $= 0,00198 \cdot 273^2 : 79,9 = 1,85$. Außerdem ist G empirisch bestimmt. Einige Werte sind

	Wasser	Benzol	Essigsäure	Ameisensäure	Nitrobenzol
theoretisch	$G = 1,85$	5,1	3,6	2,7	6,95
empirisch	$G = 1,83$	5,1	3,8	2,8	7,07
Gefrierpunkt	$\tau = 0,0^\circ$	5,3 ⁰	16,5 ⁰	8,6 ⁰	3 ⁰
Schmelzwärme	$\alpha = 79,9$	30	46	57	22

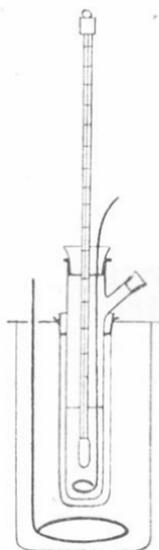
Die Gefrierpunkte des angewandten Lösungsmittels und der Lösung sind mit dem nämlichen Thermometer zu bestimmen, da es auf kleine Differenzen ankommt.

Man kann also Molekulargewichte aus der Gefrierpunktniedrigung ableiten. Es ist aber zu beachten, daß viele Körper, worunter insbesondere die Elektrolyte (Salze, Alkalien, Säuren), von diesem Gesetz ausgeschlossen sind. Die wirkliche Erniedrigung τ ist bei wässrigen Lösungen von Elektrolyten größer als die aus der Formel mit dem chemischen Molekulargewicht berechnete τ_0 . Man erklärt dies durch die Annahme, daß solche Moleküle in der Lösung zerfallen, „dissociirt“ sind (Arrhenius). Den „Dissociationsgrad“ (vgl. 16) berechnet man für eine Spaltung:

$$\text{in 2 Moleküle als } \frac{\tau}{\tau_0} - 1, \quad \text{in } n \text{ Moleküle als } \frac{1}{n-1} \left(\frac{\tau}{\tau_0} - 1 \right).$$

Eine genaue Messung verlangt beträchtliche Vorsichtsmaßregeln besonders in Wasser als Lösungsmittel. Man bestimmt den Gefrierpunkt durch allmähliche Abkühlung der Lösung, mit einem empfindlichen Thermometer unter stetem Umrühren. Die Temperatur pflegt dabei zunächst ohne Erstarrung unter den Gefrierpunkt zu sinken; beginnt die Ausscheidung, so steigt die Temperatur plötzlich auf den Gefrierpunkt, der nun abgelesen wird.

Das Ausfrieren des Lösungsmittels erhöht die Konzentration der Lösung. Diese Änderung läßt sich aus der dem Gefrieren vorausgegangenen Unterkühlung Δ unter den Gefrierpunkt schätzen. Ist α die Schmelzwärme, c die spezifische Wärme des Lösungsmittels, so ist durch das Ausfrieren die Lösung nahe im Verhältnis $1 + c\Delta/\alpha$ konzentrierter geworden. Dauerte das Ausfrieren bis zur Beobachtung längere Zeit, so wird die Korrektur größer. Man kann dann den Gang des allmählichen Niedergangs des Gefrierpunkts noch eine Zeit lang beobachten und auf den ersten Augenblick zurückrechnen.



Die nebengezeichnete Anordnung von Beckmann erleichtert die Messung. Ein innerer Cylinder enthält die durch einen Seiten-

ansatz eingegossene Lösung, einen Rührer und das Thermometer. Von dem Quecksilberfaden des letzteren kann man je nach dem Gefrierpunkt des angewandten Lösungsmittels geeignete Mengen abtrennen (22). Die Erniedrigung wird von der Einstellung des Quecksilberfadens in dem gefrierenden reinen Lösungsmittel gezählt. Die aufzulösende Substanz wird durch den Seitenansatz eingeführt. Jener Cylinder ist durch eine Luftschicht in einem etwas weiteren umgebenden Cylinder von der Kältemischung etc. getrennt, in welche man den weiteren Cylinder einsetzt. Die Temperatur der Kältemischung soll nicht zu weit (3°) unter der Gefriertemperatur liegen, da man die letztere sonst im allgemeinen zu tief, aber wenn sich ein Eiscylinder an den Wänden bildet, auch wohl zu hoch findet.

Vgl. u. A. Beckmann, Z. S. f. physik. Chem. 2, 638 u. 715. 1888; über Vorsichtsmafsregeln: Loomis, Wied. Ann. 51, 500. 1894; besonders auch Nernst u. Abegg, über Korrekturen für Körper, bei denen das Ausfrieren langsam stattfindet, Z. S. f. physik. Ch. 15, 681. 1894. Über den Gang der Depression in konzentrierteren Lösungen, Abegg ib. 15. 209.

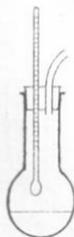
27. Siedepunkt einer Flüssigkeit.

Siedepunkt nennt man die Temperatur der Dämpfe, welche aus der unter dem Druck von 760 mm Quecksilber von 0° (20) siedenden Flüssigkeit aufsteigen.

Über die Thermometer-Korrektion wegen herausragenden Fadens s. 22 E.

Der Siedepunkt muß von dem zufälligen Barometerstande b (20) auf 760 mm reducirt werden. Liegt bereits eine Tabelle über die Siedepunkts-Änderung mit dem Druck für die Flüssigkeit oder für eine nahe liegende Mischung vor, so korrigirt man hiernach. Andernfalls benutzt man die Erfahrung, daß die Siedetemperatur vieler Flüssigkeiten um 760 mm herum sich gleich stark ändert, nämlich um $0,038^{\circ}$ oder $\frac{3}{80}^{\circ}$ auf 1 mm Hg, zu einer wahrscheinlichen Korrektion und fügt also zu dem beobachteten Siedepunkt hinzu $\frac{3}{80} \cdot (760 - b)$.

Flüssigkeitsgemische müssen mit Rückflusskühler untersucht werden (7, 27).



Das Thermometer tauche nur in den Dampf der Flüssigkeit, außer bei Lösungen, in welche es eintauchen muß. — Gleichmäßiges Sieden wird durch Stückchen Platinblech befördert, freilich nicht lange; vollkommener wirkt ein durch den Gefäßsboden durchgeschmolzener Platindraht.

Siedepunkt einer Lösung. Durch Auflösung eines Stoffes, der selbst nicht verdampft, erhöht sich der Siedepunkt des Lösungsmittels, solange die Lösung verdünnt bleibt, proportional der molekularen Konzentration. In 1000 gr des Mittels seien gelöst p gr des Körpers, also $p/M = \mu$ gr-Moleküle, wenn M das Molekulargewicht des Körpers. Dann beträgt die Erhöhung τ des Siedepunkts (Raoult)

$$\tau = S \cdot \mu \quad \text{oder} \quad \tau = S \cdot p/M.$$

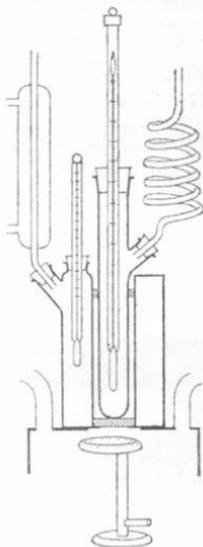
S ist für jedes Lösungsmittel konstant. Es berechnet sich theoretisch (van't Hoff) aus der Siedetemperatur t und der Verdampfungswärme λ des Lösungsmittels (Anh. 7; Tab. 16a)

$$S = 0,00198(273 + t)^2/\lambda.$$

z. B. für Wasser = $0,00198 \cdot 373^2 : 536 = 0,51$. S läßt sich empirisch bestimmen, indem man einen Stoff auflöst, über dessen Molekulargröße in dem Lösungsmittel kein Zweifel besteht. Für einige Mittel siehe S in Tab. 16a.

Über den Einfluß der Dissociation, besonders in wässriger Lösung vgl. S. 123.

Zur Ausführung der Bestimmung wird oft die Anordnung von Beckmann gebraucht. Der Mantel aus Glas oder Porzellan enthält nur Lösungsmittel; das innere Gefäß eine abgewogene Menge Lösungsmittel, deren Siedepunkt zuerst bestimmt wird. Abgewogene Mengen des Körpers werden mit Pipetten oder in Stücken oder zu Pastillen geprefst durch die Seitenöffnung eingeführt. Der untere Teil des Siedegefäßes enthält Glaskugeln, um das Sieden zu erleichtern und um mit wenig Flüssigkeit auszureichen. Häufig ist ein Platindraht durch den Boden geschmolzen. Das Gefäß steht auf Asbestpappe, wird auch oben durch einen Asbestring gehalten. Für hochsiedende Flüssigkeiten genügt der spiralförmige Luftkühler.



Geheizt wird gleichzeitig der Mantel und das Siedegefäß mit 2 kleinen Bunsenflammen oder einem Ringbrenner. Der nach unten hohle Heizkasten mit Abzugsrohren (höher als gezeichnet) besteht aus Asbest.

Beckmann, Z. S. f. phys. Ch. 8, 223, 1891; 15, 661, 1894; 18, 473. 1895.

27a. Dampfspannung.

Die Dampfspannung eines Körpers wird in der Höhe einer Quecksilbersäule von 0° (20, 1) angegeben, welcher die Spannung das Gleichgewicht hält. Unter Dampfspannung schlechtweg versteht man diejenige des gesättigten Dampfes. Um dieselbe sicher zu bekommen, ist ein Überschufs von Flüssigkeit der verdampfenden Substanz anzuwenden.

Man stellt ein Toricelli'sches Vacuum her, indem man ein etwa meterlanges, 10 mm weites, einseitig geschlossenes Glasrohr mit trockenem Quecksilber (7, 1) fast ganz füllt, die anhängenden Luftbläschen mittels der an der Rohrwand gleitenden größeren Luftblase oder vollkommener durch Auskochen beseitigt und das alsdann ganz gefüllte Rohr mit dem Finger verschlossen in Quecksilber umstürzt. An einer Millimeter-Teilung hinter oder auf dem Rohr oder mit dem Kathetometer (18a; 19c) liest man die Höhe H der Quecksilbersäule ab. Dieselbe muß dem Barometerstande nahe gleich sein. Man bringt in das Vacuum die luftfreie Substanz im Überschufs, indem man dieselbe unten, eine Flüssigkeit mit einem Spritzchen, einführt und aufsteigen läßt (bei stark verdampfenden Substanzen das Rohr vorher neigen, bis das Quecksilber oben anstößt, sonst wird das Rohr zertrümmert!).

Besser nimmt man ein Rohr mit einer Verengung und eingeschliffenem Stöpselchen, welches letztere vielleicht aus einem Thermometer besteht. (Fig.) Der Stöpsel wird durch Aufgießen von ein wenig Quecksilber gedichtet, ev. auch mit einem Schmiermittel, welches von der Flüssigkeit nicht angegriffen wird, z. B. Fett oder Vaseline. Man gießt die zu untersuchende Flüssigkeit in den Trichter und lüftet den Stöpsel vorsichtig, bis das Quecksilber und so viel Flüssigkeit eingetreten ist, daß ein Teil unverdampft bleibt, gießt aber alsbald wieder etwas Quecksilber auf.



Die Höhe H' der Quecksilbersäule wird wieder abgelesen. $H - H'$ ist die Dampfspannung des Körpers.

Etwaige Änderungen des Barometerstandes zwischen den beiden Höhenbestimmungen werden an H korrigirt. — Zu H' ist zuzuzählen erstens $h \cdot s / 13,6$, wo s das spezifische Gewicht und h die Höhe der nicht verdampften Flüssigkeit auf dem Quecksilber ist; zweitens in höherer Temperatur die Spannkraft des Quecksilberdampfes selbst nach Tab. 14. — Man liest immer oben am Quecksilbermeniskus ab. Da die Kapillarspannung des Quecksilbers durch den Flüssigkeitstropfen geändert wird und da dieser ebenfalls eine Kapillarspannung besitzt, so verlangen genaue Messungen, besonders bei geringen Spannungen, ein weites Rohr (15 bis 20 mm; vgl. 20, 3).

Je kleiner das „Vacuum“ ist, desto größer werden Fehler aus einem Rest Luft. — Vor der Ablesung soll man durch vorübergehendes Tieferstellen oder Neigen des Rohres neue Flüssigkeitsteile an die Oberfläche bringen.

Flüssigkeiten von größerem Dampfdruck kann man in dem geschlossenen Schenkel eines aufrecht stehenden Heberrohres untersuchen. Die Dampfspannung ist gleich dem äußeren Luftdruck \pm Höhendifferenz des Quecksilbers in beiden Schenkeln. Wird in höherer Temperatur beobachtet, so ist die Quecksilberhöhe diesbezüglich zu korrigiren.

Siedeverfahren. Sieden (27) liefert die Temperatur, für welche die Dampfspannung gleich dem äußeren Druck ist. Sieden unter anderem als atmosphärischem Drucke wird durch ein an den Dampfraum angeschlossenes größeres Luftvolumen von regulirbarer Dichtigkeit („künstliche Atmosphäre“) unter Anwendung eines Rückfluskkühlers (7, 27) ermöglicht.

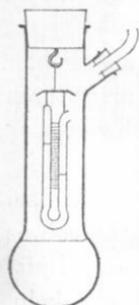
Lösungen. Deren Gesetz (Babo, Wüllner, Raoult) lautet: löst man in einer Flüssigkeit, die selbst die Dampfspannung e hat, einen nicht flüchtigen Stoff, etwa ein Salz, so wird die Spannung vermindert um eine Größe $\varepsilon = e \cdot \mu / (\mu + \mu')$, wenn μ und μ' die in einem Quantum der Lösung enthaltene Molekülzahl des gelösten Körpers und des Lösungsmittels bedeuten. D. h. wenn die Lösung die Menge p des Körpers und p' der Flüssigkeit enthält und die entsprechenden Molekulargewichte M und M' heißen, so ist $\mu = p/M$ und $\mu' = p'/M'$. Die Dampf-

druckerniedrigung von Lösungen kann also ebenfalls zur Ermittlung von Molekulargewichten dienen nach der Regel: es seien p Gewichtsteile eines Körpers in p' Teilen einer Flüssigkeit gelöst. Die Dampfspannung der Flüssigkeit sei e (Tab. 13 bis 14), diejenige der Lösung sei um ε kleiner. Dann verhalten sich die Molekulargewichte

$$\frac{M}{M'} = \frac{p}{p'} \frac{e - \varepsilon}{\varepsilon}.$$

Für konzentriertere Lösungen entstehen Abweichungen. Ferner gelten für Elektrolyte die Bemerkungen von S. 123.

Sieverfahren. Die Änderung der Dampfspannung einer Lösung kann man folgendermaßen bestimmen.



Man füllt ein „abgekürztes Barometer“ von mindestens 10, besser 15 mm Weite mit Quecksilber, bringt in den geschlossenen Schenkel eine nicht zu kleine Menge der Lösung und hängt das Ganze in einen Raum, der durch einen starken Dampfstrom des siedenden Lösungsmittels geheizt wird. Der Höhenunterschied der Quecksilbersäule in beiden Schenkeln giebt die Änderung der Dampfspannung des Lösungsmittels an. Korrekturen s. S. 127.

Beispiel. Lösung von $p = 20$ g Rohrzucker in $p' = 100$ g Wasser. Unterschied der beiden Quecksilberhöhen = 7,5 mm, während im geschlossenen Rohr über dem Quecksilber die 17% Zuckerlösung 11 mm hoch stand. Deren spec. Gewicht bei 100° gleich 1 gesetzt, kommen zu den 7,5 mm noch $11/13,4 = 0,82$ mm hinzu. Es ist also $\varepsilon = 8,32$. Der Barometerstand, auf Quecksilber von 100° umgerechnet, war $e = 747$ mm, also ist

$$M = M' \frac{p}{p'} \frac{e - \varepsilon}{\varepsilon} = 18 \frac{20}{100} \frac{747 - 8,3}{8,32} = 320. \text{ In Wirklichkeit } C_{12}H_{22}O_{11} = 342.$$

Über die Benutzung des Siedepunktes der Lösung selbst zur Ermittlung ihrer Dampfdruck-Erniedrigung s. 27.

Über die statischen Methoden vgl. noch z. B. Lehmann, Molekularphysik II. 144. 1889; für Lösungen Dieterici, Wied. Ann. 50, 47. 1893.

28. Bestimmung der Luftfeuchtigkeit (Hygrometrie).

Die zu ermittelnden Größen können sein

1. die Dichtigkeit des Wasserdampfes in der Luft, d. h. das Gewicht des in 1 cbcm Luft enthaltenen Wassers in gr. Weil diese Zahl sehr klein ist, pflegt man sie mit 1000000 multi-

placirt anzugeben, wodurch man also den Wassergehalt von 1 cbcm Luft in gr ausgedrückt erhält. Diese Gröfse heifst in der Meteorologie die absolute Feuchtigkeit der Luft; wir bezeichnen sie mit f .

2. Die relative Feuchtigkeit, oder der Sättigungsgrad, d. h. das Verhältnis des wirklich vorhandenen Wassergehaltes zu demjenigen, bei welchem die Luft mit Wasser gesättigt wäre. Diese Gröfse ergibt sich aus der absoluten Feuchtigkeit f und der Lufttemperatur, zu welcher man aus Tab. 13 das Maximum f_0 des möglichen Wassergehaltes entnimmt, als f/f_0 .

3. Die Spannkraft e des Wasserdampfes oder der Dunstdruck.

Wird die Spannkraft in mm Quecksilber gemessen, so hängen Spannkraft e , absolute Feuchtigkeit f und Lufttemperatur t durch die Formeln zusammen

$$e = 0,943 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t) \cdot f, \quad f = 1,060 \cdot \frac{e}{1 + 0,00367 \cdot t},$$

so dafs die Bestimmung von t und e oder f immer ausreicht.

Dampfdichte des Wassers = 0,623; also wiegt 1 cbcm Dampf, da derselbe in gewöhnlicher Temperatur das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz befolgt (15),

$$0,623 \cdot \frac{1293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \frac{e}{760} = \frac{1,060 \cdot e}{1 + 0,00367 \cdot t} \text{ gr.}$$

Bequem für das Gedächtnis ist, dafs (Tab. 13) e in mm und f in g/cbcm einander nahe gleich sind. Ausserdem entfernen sich die Werte in mittlerer Temperatur (von 6 bis 30°) im Falle der Sättigung nicht weit von der in Centigraden ausgedrückten Temperatur selbst.

I. Taupunkt-Hygrometer (Daniell, Regnault).

Man bestimmt den Taupunkt, d. h. die Temperatur τ , bei welcher die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. In Tab. 13 findet man den zugehörigen Wassergehalt f von 1 cbcm Luft, sowie die Spannkraft e des bei der Temperatur τ gesättigten Wasserdampfes; und zwar ist die so entnommene Spannkraft ohne weiteres die in der Atmosphäre vorhandene. Die Dichtigkeit verlangt eine Korrektion, weil die Luft in der Nähe des Instrumentes abgekühlt und dadurch verdichtet worden ist. Der aus der Tabelle zu τ entnommene Wassergehalt ist also zu

grofs und mufs, da der Dampf sich erfahrungsmäfsig ausdehnt, wie ein permanentes Gas, multiplicirt werden mit

$$\frac{1 + 0,00367 \cdot \tau}{1 + 0,00367 \cdot t} = \frac{273 + \tau}{273 + t},$$

wenn t die Lufttemperatur bedeutet.

Man stellt das Instrument so auf, dafs die glänzende Fläche dem Auge volles Himmelslicht oder das Licht einer Kerze spiegelt. Dann läfst man durch Verdampfen von Äther die Temperatur der glänzenden Fläche sinken, bis man eine Trübung bemerkt. Sofort unterbricht man das Verdampfen des Äthers; die Temperatur steigt, und man beobachtet den Stand des Thermometers, bei welchem der Niederschlag zu verschwinden anfängt. Nach einigen orientirenden Versuchen gelingt es leicht, diese beiden Temperaturen einander auf einen kleinen Bruchteil eines Grades zu nähern. Das Mittel aus beiden ist der Taupunkt τ der Luft. Mit dem Regnault'schen Hygrometer sucht man eine solche Regulirung des Wasserabflusses aus dem Aspirator zu bewirken, dafs zeitweilig ein Niederschlag entsteht und verschwindet. — Man sehe darauf, dafs die von dem Körper, vom Atmen u. s. w. herrührende Feuchtigkeit möglichst von der Taufäche entfernt bleibe.

II. August's Psychrometer.

Die atmosphärische Feuchtigkeit wird aus der Geschwindigkeit bestimmt, mit welcher Wasser in der Luft verdampft, welche Geschwindigkeit wiederum aus der Abkühlung eines befeuchteten Thermometers erkannt wird. Ist nämlich

t die Lufttemperatur (Temperatur eines trockenen Thermometers),

t' die Temperatur des feuchten Thermometers,

e' die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes bei t' , wie dieselbe aus Tab. 13 entnommen wird,

b der Barometerstand in mm,

so erhält man die wirkliche Dampfspannung e , je nachdem

$$e = \begin{matrix} e' \\ \text{25} \end{matrix} - 0,00080 \cdot b \cdot (t - t') \quad \text{bez. unter } 0^0 \quad \text{liegt,} \\ \text{bez. } - 0,00069 \cdot b \cdot (t - t').$$

Aus e berechnet sich die absolute Feuchtigkeit f aus der Formel S. 129).

Obige Konstanten gelten für Beobachtungen in freier, mäßig bewegter Luft. In ruhender Luft sind gröfsere Zahlen einzusetzen, die für ein geschlossenes kleines Zimmer um 50% steigen können. Man stellt bei Zimmerbeobachtungen durch Bewegung des feuchten Thermometers (Pendelschwingungen) die Bedingungen der Konstante 0,00080 her.

Bei den mancherlei Fehlerquellen, denen diese Bestimmungsweise unterworfen ist, genügt es häufig, für b einen mittleren Barometerstand anzunehmen. Setzt man $b = 750$, so wird

$$e = e' - 0,60(t - t') \quad \text{bez.} \quad - 0,52(t - t') \quad \text{unter Null.}$$

Genähert kann man auch f nach der Formel

$$f = f' - 0,64(t - t')$$

berechnen, worin man für f' den aus Tab. 13 zu t' entnommenen Wert setzt. Stellt man in einem mäßig grofsen geschlossenen Zimmer Beobachtungen an einem ruhenden Psychrometer an, so wird man die Spannkraft des Wasserdampfes etwa gleich $e' - 0,8(t - t')$ setzen können.

Beispiel. $t = 19,50^\circ$, $t' = 13,42^\circ$; $b = 739$ mm. Man findet zu t' in Tab. 13 $e' = 11,44$ mm. Davon ist abzuziehen $0,00080 \cdot 739 \cdot 6,08 = 3,59$ mm, also ist die Dampfspannung $e = 7,85$ mm. Hierzu berechnet sich für $19,5^\circ$ nach S. 129 $f = \frac{1,060 \cdot 7,85}{1 + 0,00367 \cdot 19,5} = 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cbcm}}$. Die relative Feuchtigkeit ist $7,8/16,7 = 0,47$.

$$\text{Die genaue Regnault'sche Formel } e = e' - \frac{0,480 \cdot b(t - t')}{610 - t'}$$

bez. unter Null 689 statt 610, giebt nur in besonders hohen Temperaturen merklich andere Werte als unser Ausdruck.

Aspirations-Psychrometer (Afsmann). Temperaturbeobachtungen der Luft werden durch Strahlung gefährdet, besonders im Freien. Deswegen sind die Thermometerkugeln hier von einem polirten doppelten Metallschutzrohr umgeben, durch welches mittels eines Uhrwerk-Ventilators ein Luftstrom mit etwa 2 m/sec Geschwindigkeit gesaugt wird. Man berechnet $e = e' - 0,00066 \cdot b(t - t')$. Auch für nicht meteorologische Zwecke kann die Anwendung eines Thermometers mit Ventilation wertvoll sein.

Afsmann, Z. S. f. Instr. 1892, 1.

III. Absorptionshygrometer. Ganz direkt verfährt man, wenn man ein gemessenes Volumen der Luft durch eine mit

Stückchen Chlorcalcium, oder Bimsstein mit konzentrierter Schwefelsäure, oder wasserfreier Phosphorsäure gefüllte Röhre saugt und die durch die Absorption des Wassers eintretende Gewichtszunahme bestimmt.

IV. Hygroskopische Körper. Deren Gestalt (Krümmung, Länge, Torsion) hängt von der Luftfeuchtigkeit ab. Die Graduierung der Skale, welche die relative Feuchtigkeit in Procenten anzugeben pflegt, geschieht empirisch. Von Zeit zu Zeit wird der Sättigungspunkt des Instrumentes in einem mit Wasserdampf ganz gesättigten Raume geprüft. Bei der Aufbewahrung in feuchter Umgebung sollen die Instrumente sich besser konstant halten, als in trockener.

29. Spezifische Wärme, Mischungsverfahren. Wasser-Kalorimeter.

Einheit der Wärmemenge oder Kalorie. Als solche pflegt man die Wärmemenge zu setzen, welche die Masseneinheit Wasser (1 g oder 1 kg; Gramm- oder Kilogramm-Kalorie) um 1° erwärmt. Diese Menge hängt aber von der Temperatur selbst ab. Lange Zeit ist nach dem Vorgang von Regnault in seinen grundlegenden Arbeiten als Norm die Erwärmung des Wassers von 0° auf 1° angenommen. Mißt man nun wie gewöhnlich mit Wasser von Zimmertemperatur, so muß man also die gefundenen Zahlen auf die Wärmekapazität des Wassers zwischen 0 und 1° umrechnen. Nun ist aber das hierfür nach Regnault angenommene Verhältnis durch spätere Untersuchungen ganz zweifelhaft geworden.

Daher sind verschiedene andere Vorschläge gemacht worden und gegenwärtig werden folgende Einheiten gebraucht:

1. Die Wasser-Kalorie von 0 auf 1°.
2. Die Wasser-Kalorie etwa von 15 auf 16°, bequem deswegen, weil das Mischungsverfahren mit Wasser von Zimmertemperatur zu arbeiten pflegt.
3. Die mittlere Kalorie, der 100te Teil der Wärmemenge, welche die Masseneinheit Wasser von 0 auf 100° erwärmt. Auf die letztere kann man nämlich das Eisschmelzungsverfahren am bequemsten zurückführen, welches zur Zeit wohl am genauesten arbeitet.

4. Eis-Kalorie. Man kann die Erwärmung des Wassers als Grundlage fallen lassen und direkt die zum Schmelzen der Masseneinheit Eis notwendige Wärmemenge als Eis-Kalorie einführen. Diese ist = 79,9 mittleren Kalorien.

5. Von allen Annahmen wird der Gebrauch des Eis-Kalorimeters frei, wenn man als Einheit diejenige Wärmemenge nimmt, welche so viel Eis schmilzt, daß durch die Volumverminderung 1 g Quecksilber von 0° in das Kalorimeter eintritt. Diese Kalorie würde 64,8 mittlere Wasser-Grammkalorien enthalten (31).

6. Mechanische Kalorie. Die wissenschaftliche Einheit würde diejenige Wärmemenge sein, welche der Arbeitseinheit äquivalent ist. Die letztere ist in dem absoluten cm-g-sec-System die Arbeit, welche 1 g an einem Orte, wo die Schwerkbeschleunigung = 1 cm/sec² wäre, um 1 cm hebt. Diese absolute mechanische Kalorie würde nahe gleich dem 42000000ten Teile der mittleren Wasser-Grammkalorie sein. (Vgl. Anh. 7.)

Nr. 1, 2, 3 sind die praktisch gebräuchlichsten Kalorien. Ihr Größenverhältnis zu einander läßt sich zur Zeit nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit angeben. Aus den unten für verschiedene Temperaturen angegebenen spec. Wärmen des Wassers¹⁾,

1) Die Beobachtungen von Baumgartner und Münchhausen sind von Pfandler und Wüllner berechnet. Aus den Beobachtungen Regnaults hat Bosscha die abgeänderten Zahlen gefolgert. Dieterici stützt sich auf Rowlands Bestimmungen des mechanischen Wärmeäquivalents. Die spec. Wärme des Wassers wäre

nach	bei	0	10	20	30	40	60	80	100°	
Regnault	1,0000	1,0005	1,0012	1,0020	1,003	1,006	1,009	1,013		Pogg. Ann. 79, 254
Bosscha	1,0000	1,0022	1,0044	1,0066	1,009	1,013	1,018	1,022		„ Jub. 549
Baumgartner	1,0000	1,0031	1,0062	1,0092				1,031		Wied. Ann. 8, 652
Henrichsen	1,0000	1,0036	1,0079	1,0131	1,019	1,033	1,051	1,072		„ 8, 91
Münchhausen	(1,0000)		1,0085	1,0127	1,017	1,025				„ 10, 289
Rapp	1,0000	0,986	0,979	0,974	0,972	0,981	1,006	1,050		Diss. Zürich 1883
Velten	1,0000	0,988	0,979	0,975	0,973	0,975	0,980	0,985		Wied. Ann. 21, 47
Dieterici	1,0000	0,9943	0,9893	0,9872	0,993	1,006	1,018	1,031		„ 33, 441
Bartoli und Stracciati	1,0000	0,9949	0,9928	0,9952						Catania 1892
Johanson	1,0000	1,001	1,017	1,029	1,039					Beibl. 1892. 508
Griffiths	(1,000)	0,997	0,995	0,993						„ 1894. 322
Lüdin	1,0000	0,9942	0,9916	0,9915	0,993	0,999	1,005	1,003		Diss. Zürich 1895

Bei Lüdin s. eine Litteratur-Zusammenstellung und Kurven für den Gang der spec. Wärme des Wassers.

bezogen auf diejenige bei 0° als Einheit, würde man folgern, daß die spec. Wärme des Wassers von 0° bis 20° oder 30° ein wenig abnimmt, dann bis 100° allmählich steigt. Nach den Zahlen würde man unter Bevorzugung der neueren Bestimmungen vorläufig die Wasser- 0° -Kalorie Nr. 1 etwa um $\frac{1}{2}\%$ größer annehmen dürfen als die Wasser-Zimmertemperatur-Kalorie Nr. 2 und ungefähr gleich der mittleren Kalorie von 0 bis 100° .

Spezifische Wärme eines Körpers ist die Wärmemenge oder Anzahl von Kalorien, welche seine Masseneinheit (gr oder kg, je nach der Definition der Kalorie) um 1° erwärmt. Da die Wärmekapazität der Körper nicht ganz konstant ist, sondern im allgemeinen mit der Temperatur mehr oder weniger zu wachsen pflegt, so muß die Temperatur angegeben sein, für welche die Zahl gilt. Bei dem Mischungsverfahren mißt man gewöhnlich die Wärmeabgabe zwischen 100° und 16° . Dann wird also die mittlere spec. Wärme zwischen diesen Temperaturen gefunden.

Das Produkt aus spec. Wärme und Atom- bez. Molekulargewicht eines Körpers heißt seine Atom- bez. Molekularwärme. Die Atomwärme der festen Elemente ist, mit größeren Abweichungen z. B. für C, B, Si, ungefähr = 6,3.

I. Feste Körper.

Der zu untersuchende Körper wird gewogen, auf eine gemessene Temperatur T erwärmt und mit einer gewogenen Wassermenge von der Temperatur t gemischt. τ sei die gemeinschaftliche Endtemperatur des Körpers und des Wassers. Ist dabei

M das Gewicht des Körpers,

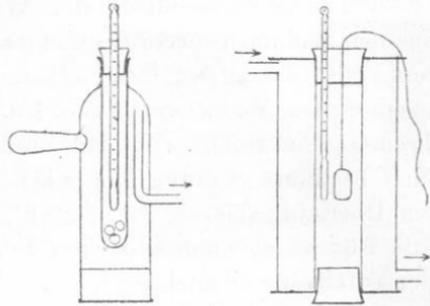
m das Gewicht des Wassers, vermehrt um den Wasservwert der übrigen Teile des Kalorimeters (siehe unten),

so findet sich die mittlere spezifische Wärme C des Körpers zwischen τ und T aus der Formel

$$C = \frac{m}{M} \frac{\tau - t}{T - \tau}$$

Denn $m(\tau - t)$ ist die Wärmemenge, welche das Wasser bekommt; $CM(T - \tau)$ ist die Menge, welche der Körper abgibt, und beide Mengen sind identisch.

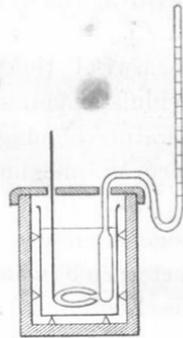
Die anfängliche Erwärmung des Körpers wird in einem durch siedendes Wasser oder durch Dämpfe von siedendem Wasser äußerlich geheizten, gegen Luftwechsel sorgfältig geschützten Raume (nach Regnault, Neumann, Pfaundler) hervorgebracht und muß fortgesetzt werden, bis das darin befindliche Thermometer eine stationäre Temperatur anzeigt. Der erhitzte Körper wird



nach Entfernung des Verschlusses aus dem ersten Apparat durch Umkehren, aus dem zweiten durch Herablassen am Faden rasch in das Wasser des Kalorimeters gebracht.

Kalorimeter. Das Gefäß besteht aus polirtem, thunlichst dünnem Blech (Messing, Silber) und steht auf einer die Wärme schlecht leitenden Unterlage, etwa Korkschnitten oder gekreuzten Fäden, in einer Schutzhülle. Ein Deckel ist zweckmäßig, um Verdunstungsfehler zu vermeiden. Während der Beobachtung wird gerührt. Über Thermometer-Korrektion s. S. 110.

Ist Wasser nicht anwendbar, so nimmt man eine andere Flüssigkeit (z. B. Terpentinöl, Anilin, Toluol) von bekannter spezifischer Wärme (Tab. 16), mit welcher die Menge multiplicirt wird.



Wasserwerte. Die Wärmemenge, welche einen Körper um 1° erwärmt, heißt sein Wasserwert. Derselbe ist gleich seiner Masse, multiplicirt mit der spezifischen Wärme. Zu der Masse des Wassers im Kalorimeter ist zu addiren der Wasserwert des Gefäßes, des Rührers und des Thermometers. Die ersteren beiden werden berechnet (Tab. 16).

Der Wasserwert des Thermometers wird empirisch bestimmt. Man erwärmt dasselbe etwa durch Eintauchen in erhitztes Quecksilber oder auch über der Flamme, um beiläufig 30° , taucht es rasch in eine gewogene, kleine Wassermenge und beobachtet deren Temperaturerhöhung. Diese, multiplicirt mit

der Masse des Wassers, dividirt durch die Temperaturabnahme des Thermometers, giebt dessen Wasserwert.

Oft wird es genügen, den Wasserwert des Thermometers aus dem Volumen v ccm des eintauchenden Theiles des Thermometers als $0,46 \cdot v$ zu berechnen (Pfaundler). 1 ccm Quecksilber hat nämlich den Wasserwert (Tab. 1 u. 16) $13,6 \cdot 0,034 = 0,46$, und 1 ccm Glas hat zufällig nahe denselben Wert, nämlich $2,5 \cdot 0,19 = 0,47$. Man bestimmt v durch Einsenken in ein kalibriertes Rohr oder ein Überlaufgefäß.

Für m ist dann in obiger Formel einzusetzen die Summe der so ein für allemal bestimmten Wasserwerte der festen Theile des Kalorimeters, vermehrt um das Nettogewicht des zur Füllung gebrauchten Wassers.

Wärmeverluste. Der unvermeidliche Wärmeaustausch des Kalorimeters mit der Umgebung wird nach Rumford dadurch eliminirt, daß man die Anfangstemperatur t um ungefähr ebensoviel tiefer als die Zimmertemperatur nimmt, wie die Schlußtemperatur τ höher sein wird. Die zu erwartende Temperaturerhöhung kann durch einen Vorversuch, oder wenn die spec. Wärme ungefähr bekannt ist, durch Rechnung näherungsweise bestimmt werden. Damit dieser Kunstgriff wenigstens angenähert genüge, dürfen die Temperaturänderungen im Kalorimeter eine mäfsige Gröfse (5^0) nicht übersteigen. Auch muß die Zeit, welche zum Übergang der Wärme aus dem Körper in das Wasser nötig ist, klein sein, weswegen man den Körper, besonders wenn derselbe die Wärme nicht gut leitet, in kleinen Stücken anwendet, die etwa auf einen Faden aufgezogen oder in ein Körbchen gefüllt werden, dessen Wasserwert einfach in Rechnung gesetzt wird.

Einwurfsfreier verfährt man so: Die Anfangstemperatur t des Kalorimeters sei so tief, daß die Endtemperatur τ auch noch ein wenig unter derjenigen der Umgebung bleibt. Dann beobachtet man also immer mit steigendem Thermometer, was an sich zuverlässiger ist und wobei der „tote Gang“ sich heraushebt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß man nun die Beobachtung der Endtemperatur τ länger fortsetzen und sich überzeugen kann, daß nicht noch Wärme im Körper steckt. Das ganze Verfahren ist dann das folgende.

5 bis 10 min lang vor dem Einbringen des heißen Körpers beobachtet man das Thermometer etwa alle Minuten und leitet daraus und aus der Lufttemperatur den Temperaturgewinn per Minute und Grad Temperaturüberschufs der Umgebung ab. Das Einbringen des Körpers geschieht nach der Uhr, und man beobachtet nun das steigende Thermometer etwa von 20 zu 20 sec. Hieraus wird der zu korrigierende Temperaturgewinn so berechnet, wie das Beispiel angiebt. Während der ganzen Zeit wird gleichmäßig gerührt.

Ist das Kalorimeter offen, so geht durch Verdunstung etwas Wärme verloren, wodurch das Verfahren einer Ergänzung durch Beobachtung des Temperaturganges nach der Erwärmung bedürftig wird. Ausführliche Anweisungen über die Verbesserungen der Resultate wegen Wärmeverlust siehe z. B. Müller-Pfaundler Physik II, S. 297; Wüllner Exp.-Physik II, 5. Aufl. S. 453, 1896.

Beispiel. 1. Wasserwert des Gefäßes und des Rührers. Beide Teile waren von Messing und wogen zusammen $\mu = 19$ g. Die spezifische Wärme des Messings ist $\gamma = 0,094$, also der Wasserwert $\mu\gamma = 19 \cdot 0,094 = 1,8$ g.

2. Wasserwert des Thermometers. Das Thermometer wurde auf 45° erwärmt und in ein kleines Gefäß mit 20 g Wasser von der Temperatur $16,25^\circ$ gebracht. Diese Temperatur stieg dadurch auf $17,10^\circ$. Der Wasserwert beträgt also $20 \cdot (17,10 - 16,25) / (45 - 17,1) = 0,6$ g.

3. Der zu bestimmende Körper wog $M = 48,3$ g.
Die Wassermenge wog netto 74,0 g, also $m = 74,0 + 1,8 + 0,6 = 76,4$ g.
Die Temperatur des erhitzten Körpers $T = 99,7^\circ$.
Die Anfangstemperatur des Wassers $t = 12,05^\circ$.
Die gemeinschaftliche Endtemperatur $\tau = 17,46^\circ$.

Hieraus würde man finden $C = \frac{76,4}{48,3} \cdot \frac{17,46 - 12,05}{99,7 - 17,46} = 0,1041$.

4. Korrektion wegen Wärmeaustauschs. Umgebungstemp. = $18,0^\circ$.

Vorher	Uhr	25 min	26	27	28	29	30 min	Mittel
	Kalorimeter	11,54°	11,65	11,75	11,88	11,96	12,05	11,80°

Auf 30 min 0 sec wurde der heiße Körper eingebracht und nun beobachtet:

Uhr	30'	20''	40''	31'	20''	40''	32'	20''	40''	33'
Therm.	12,05°	14,7	15,9	16,8	17,2	17,3	17,4	17,44	17,45	17,46°

In der Vorperiode war die Mitteltemperatur $11,8^\circ$ um $6,2^\circ$ unter der Umgebungstemperatur. Dabei stieg das Thermometer in 5 min um $12,05 - 11,54 = 0,51^\circ$. Folglich beträgt der Temperatur-Gewinn pro Grad Überschufs $0,51 / (5 \cdot 6,2) = 0,0164^\circ/\text{min}$.

Nachher war in der	1 ^{ten}	2 ^{ten}	3 ^{ten}
die Mitteltemperatur	= 14,9	17,2	17,4°
unter der Umgebung um $\Theta =$	3,1	0,8	0,6°
Also Temp.-Gewinn $0,0164 \cdot \Theta =$	0,051	0,013	0,010, zusammen 0,07°.

Das beobachtete $\tau = 17,46^\circ$ ist also um $-0,07^\circ$ zu korrigiren, giebt τ korrig. $= 17,39^\circ$, und hiermit aus obiger Formel C korrig. $= 0,1027$.

Die Mitteltemperatur für die Korrektion kann ebensogut gleich aus allen Beobachtungen genommen werden. Bei sehr genauen Bestimmungen stellt man den Gang der Temperatur graphisch dar und entnimmt daraus die Temperaturen etwa für 5 15 25 sec etc.

II. Flüssigkeiten.

1. Die spezifische Wärme einer Flüssigkeit läßt sich gerade wie oben ermitteln, wenn man die Flüssigkeit in ein Gefäß eingeschlossen hat, sie mit demselben erhitzt und in ein Wasserkalorimeter einsenkt. Der Wasserwert des Gefäßes wird in Rechnung gesetzt.

2. Verfügt man über eine gröfsere Flüssigkeitsmenge, so füllt man mit ihr das Kalorimeter, erhitzt einen gewogenen, die Wärme leicht abgebenden Körper (Körbchen mit Kupferstücken) von bereits bekannter spezifischer Wärme und verfährt wie oben. Bedeuten

M, T, C Gewicht, Temperatur und spezifische Wärme des erhitzten Körpers,

t die Anfangstemperatur der Flüssigkeit,

τ die Endtemperatur,

m das Nettogewicht der Flüssigkeit,

w den Wasserwert der festen Teile des Kalorimeters,

so ist die gesuchte spezifische Wärme c der Flüssigkeit, und zwar die mittlere zwischen t und τ ,

$$c = C \frac{M T - \tau}{m \tau - t} - \frac{w}{m}.$$

3. Als Erhitzungskörper kann bequem eine Glaskugel mit einigen 100 g Quecksilber dienen, welche ein enges Steigrohr mit einer hoch (80°) und einer niedrig gelegenen (25°) Marke hat. Man erhitzt im Quecksilberbade oder vorsichtig über der Flamme bis über die höhere Marke, läßt dann abkühlen und senkt im Augenblick der Einstellung auf diese Marke den Erhitzungskörper in die Flüssigkeit ein. Wenn, unter Umrühren, die niedrige Marke erreicht ist, hebt man den Körper heraus und beobachtet nun wieder die Temperatur der Flüssigkeit. (Andrews; Marignac; Pfaundler.)

m, w, t, τ mögen die obigen Bedeutungen behalten; ein

gleicher Versuch, bei welchem man denselben Erhitzungskörper in eine Wassermenge m' in demselben Gefäß bringt, ergebe die Erwärmung des Wassers von t' auf τ' , dann ist offenbar

$$c = \frac{1}{m} \left[(m' + w) \frac{\tau' - t'}{\tau - t} - w \right].$$

Denn es ist $(cm + w)(\tau - t) = (m' + w)(\tau' - t')$.

29a. Spezifische Wärme. Galvanische Methode (Pfaundler).

Zwei Flüssigkeitsmengen werden in gleichen Gefäßen durch denselben elektrischen Strom (63) erwärmt, welcher gleiche Widerstände aus Platin- oder besser Platin-Silberdraht in den Flüssigkeiten durchfließt. Zweckmäßig wählt man die beiden Mengen so, daß die zu erwartenden Temperaturzunahmen ungefähr gleich sind. Man nehme dann die Anfangstemperaturen um ebensoviel niedriger als die Zimmertemperatur, wie die Schlußtemperaturen höher sein werden. Hierdurch wird die Wärmeabgabe während des Versuchs sowie die Änderung des Drahtwiderstandes durch die Temperatur einigermaßen eliminiert.

Die Flüssigkeitsmenge m samt dem Wasserwert w ihres Gefäßes und Thermometers erwärme sich von t auf τ , die andere Menge m' samt zugehörigem Wasserwert w' der festen Teile von t' auf τ' , dann ist $(cm + w) : (c'm' + w') = (\tau' - t') : (\tau - t)$, also

$$c = \frac{1}{m} \left[(c'm' + w') \frac{\tau' - t'}{\tau - t} - w \right].$$

c' wird = 1, wenn die Flüssigkeit m' Wasser ist.

Etwaige Ungleichheiten der beiderseitigen Verhältnisse eliminieren sich am einfachsten durch Vertauschen der Flüssigkeiten und Mittelnehmen aus den beiden gefundenen Resultaten.

Fehlerquellen sind darin gegeben, daß die Temperatur der Drähte, also auch ihr Widerstand, durch verschieden rasche Wärmeabgabe verschieden sein kann und daß ein Teil des Stromes von dem Drahte ab durch die Flüssigkeit gehen könnte. Reines Wasser leitet sehr wenig; ein Abfließen des Stromes ist nicht zu fürchten, wenn die Spannung im Drahte unter 2 Volt bleibt (63 I). Man nehme die Widerstände nicht zu groß. In leitenden Flüssigkeiten können Glasspiralen mit Quecksilber gebraucht werden. Das Widerstandsverhältnis R/R' der beiden Drähte läßt sich während des Versuches durch Abzweigung

(71 II und 71a) ermitteln, oder auch indem die Drähte als Zweige einer Wheatstone'schen Brücke (71b) angeordnet werden. Man hat dann $(\tau' - t')/(\tau - t)$ mit R/R' zu multipliciren.

Vgl. Müller-Pfaundler Lehrbuch der Physik, 8. Aufl. II. 2. S. 311. Pfaundler, Wien. Sitz. Ber. 1891. 352.

30. Spezifische Wärme. Erhaltungsmethode. (Dulong u. Petit.)

Man vergleicht die Zeiten, in denen Körper unter denselben Umständen sich um gleichviel abkühlen. Höchstens bei Flüssigkeiten oder bei gut leitenden festen Körpern können brauchbare Resultate entstehen.

Ein kleines erwärmtes Gefäß aus dünnem polirtem Metall mit einem Thermometer und der eingegossenen oder gepulvert fest eingestampften Substanz kühlt sich in einem luftleeren Metall-Behälter ab. Die Umgebung ist durch eine größere Wassermenge oder schmelzendes Eis auf konstanter Temperatur erhalten. Beträchtliche Mengen Flüssigkeit kann man auch in einem geschlossenen Metallgefäße in der Luft beobachten.

Es sei der Gang des Temperatur-Überschusses über die Umgebung bei der Füllung mit zwei verschiedenen Substanzen beobachtet worden. m und M seien die eingefüllten Mengen, M etwa Wasser, also $C=1$, w der Wasserwert des Gefäßes mit dem Thermometer (S. 135), z und Z die Abkühlungszeiten von demselben Anfangs- zu demselben Endüberschuss, am besten der erste Überschuss 2 bis 3mal so groß als der letzte, c und C die beiden spezifischen Wärmen, so gilt $(mc + w) : (MC + w) = z : Z$, also

$$c = 1/m \cdot [(MC + w)z / Z - w].$$

Die erste Zeit nach der Erwärmung läßt man vor der Beobachtung verstreichen. Am besten werden jedesmal die Temperaturen von etwa 20 zu 20 sec notirt, mit der Zeit als Abscisse, der Temperatur als Ordinate in einer Kurve dargestellt, und daraus die Zeiten entnommen, welche gleichen Anfangs- und Endwerten entsprechen. Aus einem Paare von Beobachtungsreihen läßt sich so eine Anzahl von Bestimmungen ableiten, aus denen ein Mittel genommen wird. Siehe auch 3 III.

Man kann auch in zwei möglichst kongruenten Gefäßen beide Versuche gleichzeitig ausführen. Wiederholt man sie noch

unter Auswechslung der Flüssigkeiten und nimmt die Mittel der erhaltenen Zeiträume für jede Flüssigkeit, so wird die Ungleichheit der Gefäße eliminiert.

31. Spezifische Wärme. Eis-Kalorimeter.

Altes Verfahren. (Lavoisier und Laplace.) Man bringt den auf die Temperatur t erwärmten Körper vom Gewicht m in trockenes Eis von 0° , welches sich selbst in einer Umgebung von schmelzendem Eise befindet. Wird durch den Körper das Gewicht M geschmolzen, so ist seine spezifische Wärme, in mittleren Wasserkalorien (S. 132) gemessen,

$$c = \frac{M \cdot 79,9}{m \cdot t}.$$

79,9 Kal. beträgt die Schmelzwärme der Masseneinheit Eis.

Um die geschmolzene Menge einigermaßen genau zu bestimmen, sind wegen der Adhäsion des Wassers am Eise große Mengen des Körpers nötig.

Für eine genäherte Bestimmung dient auch ein Eisstück von ebener Oberfläche mit einer Höhlung, in welche der erhitzte Körper eingelegt wird. Während dessen Abkühlung bedeckt man die Platte mit einem ebenen Eisdeckel. Nachher wird das geschmolzene Wasser mit einem kalten Schwämmchen ausgetupft und gewogen. (Black.)

Eiskalorimeter von Bunsen.

Hier wird die geschmolzene Menge aus der Volumen-Abnahme bestimmt, welche beim Schmelzen des Eises eintritt. Einer Kontraktion um v ccm entspricht nämlich die Schmelzung von $v \cdot 11,03$ g Eis. Ist v dadurch bewirkt, daß m g eines Körpers sich von t auf 0° abkühlen, so ist also die spec. Wärme des Körpers

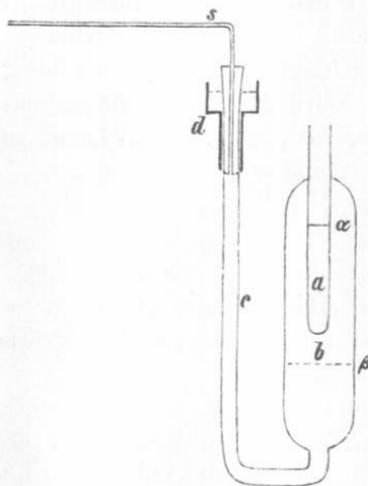
$$c = \frac{v \cdot 11,03 \cdot 79,9}{m \cdot t} = \frac{v \cdot 881}{m \cdot t}.$$

1 g Eis hat nach Bunsen das Volumen 1,0908 cbcm, dagegen 1 g Wasser von 0° 1,0001 cbcm. Wenn das Volumen sich um 1 cm^3 vermindert, so ist also eine Eismenge $1/0,0907 = 11,03$ g geschmolzen.

Das Bunsen'sche Kalorimeter besteht aus den aus Glas zusammengeblasenen Teilen a , b und c ; d ist ein aufgekitteter eiserner Aufsatz. b , c und d sind bis zu den punktierten Linien mit ausgekochtem Quecksilber gefüllt. Über letzterem befindet

sich in b ausgekochtes Wasser; das Eis in demselben wird vor dem Versuche mittels einer in a eingefüllten Kältemischung gebildet.

Zum Gebrauch wird das Instrument an d in einem Halter befestigt, mit reinem schmelzendem Eis oder Schnee umgeben, und das kalibrierte Skalenrohr s durch einen in d eingesetzten



langen Kork eingedrückt, bis das Quecksilber hinreichend weit über der Teilung steht. Noch besser ist ein doppelt durchbohrter Glashahn, an dessen Spitze das Messrohr angeschmolzen ist, unter einem kleinen Behälter mit Quecksilber. Nachdem das Gefäß a bis a mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt worden ist, welche den zu untersuchenden Körper nicht auflöst, erhitzt man denselben (Fig. zu 29), läßt ihn in a hineinfallen (wobei ein Baum-

wollenpfropf auf dem Grunde des Probirröhrchens dessen Beschädigung verhindert) und verschließt a mit einem Kork. Das Quecksilber in s geht zurück und nimmt einen stationären Stand ein. Beträgt das Sinken e Skalenteile und ist das Volumen eines Teiles $= A$, so ist $v = A \cdot e$.

Kalibrierung des Rohres. Man erhält A , indem man das Gewicht μ gr eines Quecksilberfadens bestimmt, der n Skalenteile einnimmt. Wenn τ die Temperatur bei dieser Messung, so ist (19) $A = \mu(1 + 0,00018\tau)/(n \cdot 13,596)$ cm³. Setzt man nun $v = Ae$ in die Gleichung für c ein und schreibt

$$13,596/881 = 0,01544,$$

so findet man den Wärmewert K eines Skalenteils in gr-Kalorien

$$K = \frac{\mu}{n} \frac{1 + 0,00018\tau}{0,01544} \text{ und dann einfach } c = K \frac{e}{mt}.$$

Empirische Bestimmung von K . Ein leichtes Glas- kügelchen (0,5 bis 1 cbcm), bis auf einen kleinen Ausdehnungsraum mit einer gewogenen Wassermenge gefüllt, mit etwas Platin beschwert, wird zur Temperatur t erhitzt (S. 135) und

eingbracht. w sei die Summe der Wasserwerte (über Glas s. 7, 5), e' die erfolgende Skalenverschiebung, dann ist $K = wt/e'$.

Wägungsverfahren. Anstatt den Quecksilberfaden im Rohre abzulesen, taucht man das ganz gefüllte, geeignet gebogene Rohr in ein Gefäß mit Quecksilber ein und bestimmt die bei dem Einbringen des warmen Körpers eingesaugte Quecksilbermenge durch Differenzwägung des Gefäßes. 0,01544 g Quecksilber entsprechen der Gramm-Kalorie.

Geringe Verunreinigungen des Schnees oder Eises, womit das Kalorimeter umhüllt ist, genügen, um den Quecksilberstand allmählich zu verschieben. Man beobachtet die Bewegung und setzt dieselbe für die Beobachtungszeit in Rechnung.

Oder man setzt durch Probiren mittels Druckvermehrung, indem man die Mündung des Quecksilbers hebt, den Gefrierpunkt des inneren Wassers so weit herunter, daß das Wandern des Fadens aufhört (Dieterici). Das angesetzte Kapillarrohr ist zu diesem Zwecke zweimal gebogen, so daß man den vorderen horizontalen Teil mit der Ablese-skale oder die Mündung mit dem Gefäß höher oder tiefer stellen kann.

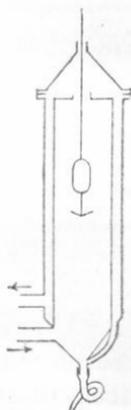
Vgl. Bunsen, Pogg. Ann. 141, 1. 1870; Dieterici, Wied. Ann. 33, 418. 1888; 38, 1. 1889; Schuller und Wartha ib. 2, 359. 1877, wo auch über die Bestimmung chemischer Verbindungswärmen gehandelt wird.

31 a. Spezifische Wärme. Dampf-Kalorimeter (Joly; Bunsen).

Der Körper m befindet sich, an einer Wage mit einem feinen Drahte aufgehängt, in einem Raum, in welchen man plötzlich durch ein weites Rohr Dämpfe von siedendem Wasser einleitet. Die auf dem Körper kondensirte Wassermenge w wird gewogen. Der Masseneinheit entsprechen 536 Kalorien. Die spezifische Wärme ist also, wenn der Körper die Anfangstemperatur t_0 hatte und T die Temperatur des Wasserdampfs ist (Tab. 13 a),

$$c = \frac{w}{m} \frac{536}{T - t_0}.$$

Der neben dem Aufhängedraht entweichende Dampf wird durch die Wasserluftpumpe oder einen erwärmten Schornstein mittels eines Rohres von der

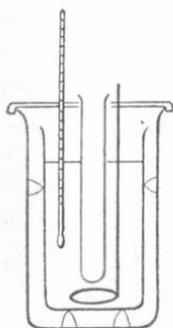


mit einem durchbohrten Gipspfropf ausgekleideten Öffnung abgesaugt. Gegen Abtropfen von Wasser schützt ein unten an dem Körper befestigtes dünnes Platinblech, dessen eigener Wasserwert von mc abgerechnet wird (29; Tab. 16). Vor der Wägung wird der Dampfstrom gemäfsigt, welcher sonst das scheinbare Gewicht beeinträchtigt.

Die Methode mufs mit grofser Umsicht gehandhabt werden, scheint dann aber sehr genaue Werte liefern zu können. — Vgl. Joly, *Proceed. Roy. Soc.* 41, 352. 1886; 47, 218. 1889; Bunsen, *Wied. Ann.* 31, 1. 1887.

31b. Thermochemische Messungen.

Zur Bestimmung der Wärmetönung bei chemischen Vorgängen eignet sich oft das Eiskalorimeter, in welchem man die auf 0° vorgekühlten Körper den chemischen Procefs vollziehen läfst. Ein einfacherer Apparat ist z. B. der folgende (Nernst). Innerhalb eines weiteren Glases ruht auf Korkschnitten ein gegen ein Liter fassendes Becherglas. Durch einen Holzdeckel



gehen ein empfindliches Thermometer, ein Rührer und ein dünnwandiges Reagirglas, in welchem die Reaktion vor sich geht. Will man Verdünnungs- oder Lösungswärmen messen, so kommt die Substanz, eventuell fein gepulvert, in den Reagircylinder, dessen Boden nach erfolgtem Temperatúrausgleich durchstoßen wird. Man operirt mit kleinen Temperaturänderungen.

Aus den letzteren wird die entwickelte Wärmemenge in folgender Weise berechnet (29 I).

Die Flüssigkeitsmenge m im Becherglas habe die spec. Wärme c , der eingebrachte Körper m' habe c' ; die Summe der Wasserwerte von Becherglas, Reagirglas, Rührer und Thermometer sei $=w$ (S. 135), die Temperatur steige von t auf τ , dann beträgt die entwickelte Wärmemenge $(cm + c'm' + w)(\tau - t)$. Vorsichtsmafsregeln und Korrekturen wegen Wärmeaustausch treten ebenso herein wie S. 136.

Nernst, *Theor. Chemie* p. 468. 1893.

Absorptionswärmen von Gasen bestimmt man im Princip ähnlich wie oben, aber anstatt im Becherglase in einem Glaskolben, ähnlich der Spritzflasche, durch welchen das

Gas in die Flüssigkeit tritt. Die Gasmenge kann durch Volummessung, durch Wägung der Flasche vor und nach dem Versuch auf einer empfindlichen Wage, oder durch chemische Analyse bestimmt werden.

Schmelzwärme. Eine geschmolzene Menge m des Körpers von der Temperatur t werde in das Eiskalorimeter (31) gebracht. Der Schmelzpunkt sei $=\tau$ (größer als Null), die spec. Wärmen im flüssigen und festen Zustand seien bekannt gleich c und c' . Die geschmolzene Menge Eis sei $=M$. Die Schmelzwärme ist dann $\kappa = 79,9 M/m - ct + (c - c')\tau$. Liegt der Schmelzpunkt unter 0° , so kann man den Körper fest in das Eiskalorimeter einführen und ähnlich rechnen.

Statt $79,9 M$ kann man setzen $881v$, wenn v die Volumänderung durch das Schmelzen bedeutet (31).

Verdampfungswärme. Eine Dampfmenge m von der Siedetemperatur t schmelze bei ihrer Kondensation und Abkühlung auf 0° die Eismenge M . Die spezifische Wärme der Flüssigkeit sei $=c$. Dann berechnet sich die Dampfwärme $\lambda = 79,9 M/m - ct$. Die Verdichtung des Dampfes geschieht in einem Schlangenrohr mit einem kleinen Kühlgefäß am Ende. Die Messung ist großen Fehlerquellen unterworfen.

Über einen kleinen Dampfärmemesser mit Wasserkalorimeter s. Berthelot, Thermochem. Mess. S. 63.

Kalorimetrische Bombe. Dieselbe enthält stark verdichteten Sauerstoff und dient zur Bestimmung der Verbrennungswärme. Der eingebrachte Körper wird durch einen galvanisch glühenden Draht entzündet. Die entwickelte Wärmemenge ergibt sich aus der Temperaturerhöhung eines Wasserbades, in welchem die Bombe sich befindet (29 I), wobei der Wasserwert der Bombe zu demjenigen des Kalorimeters zu addiren ist.

Genauere Vorschriften: Thomsen, Thermochem. Unters. Leipzig 1882—1886; Berthelot, Thermochem. Messungen, übers. v. Siebert, Leipzig 1893.

32. Wärmeleitvermögen.

Vergleichung des Wärmeleitvermögens zweier Stäbe. Wärmeleitungs-Vermögen oder -Koeffizient k ist die Wärmemenge, welche in der Zeiteinheit durch den Querschnitt Eins hindurchfließt, wenn senkrecht zu diesem Querschnitt das Temperaturgefälle Eins stattfindet, d. h. wenn auf der Strecke 1

die Temperaturänderung $= 1$ ist. k geteilt durch Dichtigkeit \times spec. Wärme nennt man Temperaturleitungs-Koeffizient. Ein von Despretz zuerst gebrauchtes Verfahren, welches aber große Umsicht erfordert, wenn es zu brauchbaren Resultaten führen soll, ist das folgende.

Wir setzen die beiden Stäbe von gleichem Querschnitt voraus und geben ihnen dieselbe Oberflächenbeschaffenheit durch Poliren und galvanische Versilberung oder Vernickelung. Die beiden Enden eines Stabes werden auf verschiedene Temperatur gebracht, etwa indem man das eine Ende mit siedendem Wasser und das andere mit schmelzendem Eis umgibt. Weniger gut mag man das eine Ende in der Luft lassen, das andere durch eine sehr konstant brennende Lampe erhitzen. Der mittlere Teil des Stabes, an welchem die nachfolgenden Temperaturbeobachtungen angestellt werden, ist durch Schirme vor Strahlung von den Wärmequellen geschützt.

Die Temperaturverteilung wird mit der Zeit stationär. Nachdem dies eingetreten ist, werden an drei gleichweit voneinander abstehenden Punkten I, II und III die Temperaturen des Stabes gemessen. Die Temperaturüberschüsse über die umgebende Luft mögen sein u_1 , u_2 und u_3 . Setzen wir $\frac{1}{2}(u_1 + u_3)/u_2 = n$.

Dasselbe Verfahren auf den anderen Stab angewandt ergebe an drei ebensoweit abstehenden Punkten die Temperaturüberschüsse U_1 , U_2 und U_3 und $\frac{1}{2}(U_1 + U_3)/U_2 = N$.

Dann verhalten sich die Leitvermögen k und K

$$\frac{K}{k} = \left[\frac{\log(n + \sqrt{n^2 - 1})}{\log(N + \sqrt{N^2 - 1})} \right]^2.$$

Beweis. Im stationären Zustand empfängt jedes Längenelement dx des Stabes in der Zeiteinheit durch Leitung so viel Wärme, wie es an die Umgebung abgibt. Die letztere Menge ist $a \cdot u \cdot dx$, wenn a das auf die Längeneinheit des Stabes bezogene „äußere Leitvermögen“ vorstellt. Erstere Menge ist $k \cdot q \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} dx$. a und der Querschnitt q sind für beide Stäbe gleich. Die Gleichsetzung beider Ausdrücke liefert die Differentialgleichung $\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{a}{kq} \cdot u = \alpha^2 \cdot u$, wenn $\frac{a}{kq} = \alpha^2$ bezeichnet wird. Das allgemeine Integral der Gleichung ist: $u = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x}$, wo C_1 und C_2 zwei von der Erwärmung der Endflächen abhängige Integrationskonstanten

bedeuten. Nennt man u_1, u_2, u_3 die Temperaturen für drei je um die Länge l auseinanderliegende Querschnitte, so findet man durch Einsetzen von $x, x+l$ und $x+2l$ für x in obige Gleichungen nach Elimination von C_1 und C_2 die Beziehung $e^{\alpha l} + e^{-\alpha l} = (u_1 + u_3)/u_2 = 2n$ (siehe oben). Hieraus folgt

$$e^{\alpha l} = n + \sqrt{n^2 - 1} \quad \text{oder} \quad \alpha^2 l^2 = \frac{a}{kq} l^2 = \left[\log \text{nat} (n + \sqrt{n^2 - 1}) \right]^2.$$

Dieselbe Gleichung mit K und N für den zweiten Stab aufgestellt und in die erstere dividirt liefert den zu beweisenden Ausdruck.

Die Temperaturen bestimmt man mit Thermoelementen (25), deren eine Lötstelle in feine Bohrungen der Stäbe eingesenkt wird, während die anderen Verbindungen in der umgebenden Luft liegen. Es genügt auch wohl, die Thermoelemente, welche aus ganz feinen zusammengelöteten Drähten (Neusilber — Eisen) bestehen, mit der Lötstelle oben und durch Gewichtchen beiderseitig beschwert über den Stab zu hängen.

Vgl. noch Wiedemann und Franz, Pogg. Ann. 89, 497. 1853.

Absolutes Wärmeleitvermögen. Kennt man das äußere Wärmeleitvermögen a eines Stabes, so folgt aus der letzten Gleichung in obigem Beweise

$$k = \frac{a}{q} \frac{l^2}{[\log \text{nat} (n + \sqrt{n^2 - 1})]^2},$$

(q = Querschnitt, l = Abstand der gemessenen Punkte des Stabes). Eine rohe Bestimmung von a/q kann folgendermaßen ausgeführt werden. Man erwärmt den Stab gleichmäßig, legt ihn ebenso hin wie vorher und beobachtet mit dem Thermoelement zu mehreren Zeiten $t', t'' \dots$ die zugehörigen Temperaturüberschüsse $u', u'' \dots$. Die letzteren sollen von derselben Größenordnung gewählt werden, wie die $u_1, u_2 \dots$ oben. Nennt man noch s die Dichtigkeit, c die spezifische Wärme des Stabes (Tab. 1 und 16), so ist

$$\frac{a}{q} = cs \frac{\log \text{nat} u' - \log \text{nat} u''}{t'' - t'}.$$

Denn wenn in dem Zeitelement dt die Temperatur sich um du ändert, so ist die hierbei von der Längeneinheit des Stabes abgegebene Wärmemenge einerseits $= audt$, andererseits $= -qcs du$. Daraus folgt $qcs \cdot du/u = -a \cdot dt$ und das Integral dieser Gleichung $qcs \log \text{nat} u = C - at$. Also ist: $qcs (\log \text{nat} u' - \log \text{nat} u'') = a(t'' - t')$ q. e. d.

Die genaue absolute Messung des Wärmeleitvermögens eliminirt die äußere Wärmeleitung z. B. durch periodische Er-

wärmungen eines Stab-Endes oder macht sich durch Beobachtungen in den allerersten Zeiten nach der plötzlichen einseitigen Erwärmung eines Körpers davon unabhängig. Die Aufgabe gehört zu den schwierigsten.

Vgl. Angström, Pogg. Ann. 114, 513. 1861 und 123, 628. 1864; Heinrich Weber, ebd. 146, 257; Kirchhoff und Hansemann, Wied. Ann. 9, 1. 1880; F. Weber, ebd. 10, 103. 1880; Lorenz, ebd. 13, 422. 1881.

Vgl. Tab. 10.

Wärmestrahlung siehe 47 b.