

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Lehrbuch der praktischen Physik

Kohlrausch, Friedrich

Leipzig [u.a.], 1910

Druck

Druck.

36. Druckmessung. Manometer.

Den Begriff Druck gebraucht man für einen Zustand, wo Kräfte stetig verteilt sind. In ruhenden flüssigen, sei es tropfbaren oder gasförmigen Mitteln erfährt jedes Flächenelement (df), unabhängig von seiner Richtung, im Innern sowohl wie an der Wand, eine zu ihm senkrechte Druckkraft (dk). Druckgröße an einem Orte ist der Quotient dk/df daselbst, oder, bei gleichmäßiger Druckverteilung, die auf die Flächeneinheit kommende Kraft. — Über den Druck in festen Körpern vgl. 55 b.

Als Grundlage dient die Messung durch Flüssigkeitshöhen; diese bieten eine im ganzen Meßbereich konstante Empfindlichkeit.

I. Flüssigkeitsmanometer.

Eine Säule von der Höhe h cm und dem spez. Gewicht s stellt den Druck sh gr-Gew./cm² oder in CGS-Einheiten (Anh. 7; 8) $= gsh$ Dyne/cm² dar; g ist die Fallbeschleunigung in cm/sec².

Gebäuchlich sind Quecksilber und Wasser. Auch wohl H₂SO₄ (1,83) oder Glycerin (1,26); konzentriert sind beide stark hygroskopisch.

Der Druck von 76 cm Quecksilber von 0°, streng genommen unter der Schwere in 45° geogr. Breite, heißt eine Atmosphäre. Diese entspricht also einem Drucke von $13,596 \cdot 76 = 1033,3$ gr-Gew./cm². Für Druckmessung hat man $g_{45} = 980,66$ cm/sec² angenommen¹⁾, also ist 1 Atm. $= 980,66 \cdot 1033,3 = 1013300$ Dyne/cm². Unter 50° Breite ($g = 981,1$) gilt 1013800 für 760 mm Hg von 0° dargestellt.

Man erhält aus einer beobachteten Druckhöhe h einer Flüssigkeit vom spez. Gewicht s die Höhe h' einer anderen Flüssigkeit s' , welche denselben Druck gibt, als $h' = h \cdot s/s'$. Eine bei der Temperatur t gemessene Quecksilberdruckhöhe h wird also auf t' umgerechnet durch Multiplikation mit dem Faktor $1 + 0,000182(t' - t)$, der hier gleich s/s' ist; vgl. S. 102.

Ablesung. Man projiziert auf einen hintergestellten Maßstab, mit dem Auge unter Vermeidung der Parallaxe durch einen Spiegel, oder mit einem parallel verschiebbaren Fernrohr; oder man mißt mit dem Kathetometer (22). Abgelesen wird immer die horizontale Tangente des Meniskus, also an Quecksilberflächen der obere, an den übrigen Flüssigkeiten der

1) Sonst pfl egt man 980,60 anzunehmen.

untere Rand. Zum scharfen Erkennen der Kuppe schirmt man von oben kommendes Licht ab, oder bringt ein Ölpapier mit schrägen Strichen hinter der Kuppe an (Röntgen); kann man dicht über, bez. unter der Oberfläche eine Spitze anbringen, so stellt man auf die Mitte zwischen ihr und ihrem Spiegelbild ein.

Bei dem Ablesen auf einem hintergestellten Maßstab kann an 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.



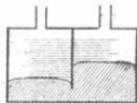
Vgl. Thiesen, ZS f. Instr. 1886, 89.

In einem offenen Schenkel ist, wenn im geschlossenen stets eine bestimmte Höhe innegehalten wird (vgl. Luftthermometer), oft ein verschiebbarer Maßstab mit Spitze zu gebrauchen, die zur Berührung eingestellt wird. Der Nullpunkt der Teilung findet sich aus der Einstellung bei beiderseitig gleichem Druck. Schema s. Fig.

Kapillar-Korrektion. Die Oberfläche hat gewöhnlich nicht eine so große Breite, daß ihr höchster (bez. tiefster) Teil eben ist; dann kommt zu dem Gewichtsdruck der Kapillardruck der Krümmung an der Kuppe; die abgelesene Höhe ist zu niedrig (bez. zu hoch). Die Korrektion wächst mit abnehmender Rohrweite. In kommunizierenden gleichen Röhren hebt sie sich bei beiderseitig gleicher Benetzung und Kapillarkonstante natürlich heraus. — Die „Kapillardepression“ des Quecksilbers läßt sich wegen der Veränderlichkeit des Randwinkels nicht als bloße Funktion der Rohrweite darstellen. Ist aber außer der Rohrweite die Höhe des Meniskus bekannt, so kann man die Depression, freilich mit der nicht unbeträchtlichen Unsicherheit, die aus Veränderungen der Kapillarkonstante selbst erwächst, aus Tab. 18a entnehmen. Bei einer Rohrweite von 15 mm beträgt sie höchstens 0,1 mm. Vgl. auch 37, 1 bis 5.

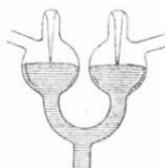
Formeln für die „Kapillarerhebung“ in benetzten Röhren s. 58 I.

Kleine Druckunterschiede. 1. Die beiden Drucke werden auf verschiedene Oberflächenteile einer Flüssigkeit in einem geschlossenen, oben durch eine Scheidewand geteilten Gefäß übertragen, welches vorn und hinten durch ebene Glasplatten geschlossen ist. Die Hinterwand ist horizontal durchlaufend geteilt. Die Oberflächen seien so groß, daß ihre Mitten merklich eben sind.



Man bestimmt mittels Mikroskops die beiden Höhen aus dem Abstände direkt gesehener Teilstriche von ihren Spiegelbildern. Unsymmetrien werden durch Vertauschen der Drucke eliminiert. — Thiesen u. Scheel, Wiss. Abh. d. P. T. Reichsanst. III, 12 u. 76. 1900; ZS f. Instr. 1901, 177.

2. Man benutzt zwei Spitzen in kommunizierenden, etwa 25 mm weiten Druckkammern; man stellt durch eine mit Spiegel und vertikaler Skale (25) gemessene Neigung des Systems immer auf die Berührung beider Quecksilberflächen mit den Spitzen ein. Als bewegliche Verbindungen dienen Kundt'sche Glasfedern (8, 24). Zum Zwecke der Regulierung der mittleren Niveauhöhe steht das Quecksilber (wie bei der Quecksilberluftpumpe oder dem Luftthermometer; 8, 24 u. 42) durch einen Schlauch in Verbindung mit einer freien Oberfläche, die man heben oder senken kann; die Feineinstellung geschieht mittels einer Klemmschraube am Schlauch. — Rayleigh, Phil. Trans. (A) 196, 208. 1901; ZS f. phys. Ch. 37, 716. 1901.

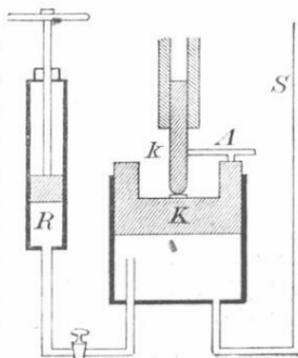


3. Von den beiden (Quecksilber-)Oberflächen wird die eine durch mikrometrische Höhenverstellung eines äußeren Niveaus mit einer konstanten Platinspitze in Kontakt gebracht; auf die andere wird eine Schraubenmikrometerspitze (vgl. 8, 24) eingestellt. — Hering, Ann. d. Ph. 21, 320. 1906. — Vgl. auch VII.

Große Drucke. Quecksilbermanometer gewöhnlicher Form für eine größere Anzahl von Atmosphären werden an Hauswänden usw. befestigt. — Tragbaren Instrumenten gibt man eine gebrochene Form, in welcher die Drucke mehrerer Säulen in U-förmigen Röhren durch Wasser usw. aufeinander übertragen und summiert werden.

Vgl. hierüber Thiesen, ZS f. Instr. 1881, 114. — Bis 100 Atm. Kamerlingh Onnes, Commun. Phys. Lab. Leiden Nr. 44. 1898. — Das 300 m hohe offene Manometer am Eiffelturm besteht aus einem $4\frac{1}{2}$ mm weiten Stahlrohr. Zum Ablesen dienen seitlich angesetzte je 3 m lange Glasröhren, die, außer beim Ablesen, durch Doppelhähne abgesperrt sind. Vgl. Cailletet, Comptes rendus 112, 764. 1891. — Die mittlere Temperatur einer Säule wird am besten nach dem elektrischen Widerstande (43 II) eines an das Rohr gebundenen Drahtes (Nickel) beurteilt; Holborn u. Henning, Ann. d. Ph. 26, 833. 1908.

Druckreduktion durch Kolbenübertragung. Um Drucke von Hunderten oder Tausenden von Atmosphären bei der Übertragung auf Quecksilber zu verkleinern, benutzt man das umgekehrte Prinzip der hydraulischen Presse. Der große Druck wirkt auf den Kolben k (Querschnitt q), der die Kraft auf den Kolben K (Querschnitt Q) überträgt und unter K den Druck im Verhältnis q/Q reduziert auftreten läßt. Die übertragenden und zugleich dichtenden Flüssigkeiten sind Rizinusöl oder bei sehr großen Drucken Melasse.



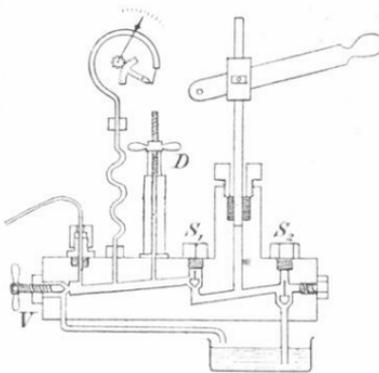
Die Reibung wird durch drehende Bewegungen vermindert, die man während der Messung dem Kolben durch einen eingeschraubten Arm *A* mitteilt. Der weite Cylinder enthält unten Quecksilber, welches mit dem Steigrohr *S* kommuniziert. Die mit Rizinusöl gefüllte Regulierpumpe *R* läßt den Druck, trotz Austreten von etwas Flüssigkeit an den Kolbenwänden, konstant erhalten. — Näheres bei Amagat, Ann. chim. phys. (6) 29, 68. 1893; Wagner, Ann. d. Ph. 15, 906. 1904.

Versuche mit hohen Drucken. Bei Messungen ist die Kompressionswärme (**55b**) zu beachten und also mit der Beobachtung bis zum wiedererfolgten Temperatenausgleich zu warten.

Gase usw., die dem Druck zu unterworfen sind, werden gewöhnlich über Quecksilber beobachtet, welches anderseitig, mittels einer Wasserstrecke, durch die Kapillare (s. unten) mit der Pumpe verbunden ist. Bei mäßigem Druck kann ein dickwandiges Glasrohr in die Luft ragen.

Glasröhren sind für inneren einseitigen Druck über höchstens 400 Atm. nicht brauchbar zu machen und müssen höher hinauf in Metallcylindern beiderseitig gedrückt werden. Volumänderungen von Gasen oder Flüssigkeiten in solchen Röhren (Piezometern) können dann, ohne daß die Röhren sichtbar sind, vermöge elektrischer Kontakte beobachtet werden, die in die Röhre eingeschmolzen und durch dünnen Platindraht hintereinander verbunden sind. Jedes Herantreten des Sperrquecksilbers an einen folgenden Kontakt schaltet Widerstand aus und ist dadurch (**90 bis 93**) zu erkennen (Amagat l. c.).

Cailletet'sche Pumpe, Ducretet & Lejeune, Paris. Bis 300 Atm. kann der Pumpkolben gebraucht werden, dann die (in Wirklichkeit seitlich angebrachte) Druckschraube *D*.



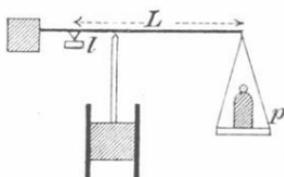
Alle Dichtungsschrauben sind sehr fest anzuziehen. Sorgfältig sauber müssen die kleinen Hartkautschukventile gehalten werden. — Ventilschraube *V* dient zum Abspannen des Druckes. Als Füllung kann destilliertes Wasser gebraucht werden; bei längerem Nichtgebrauch ist die Pumpe durch Lüften der Schraube *S*₁ zu entleeren und bis zum Austrocknen offen zu lassen.

Die Kupfer- (oberhalb 700 Atm. besser Stahl-)Kapillare links gibt den Druck weiter. — Man kittet mit Marineleim, bis 100 At. auch Siegelack. Änderungen der Konstruktion bei Petavel, Phys. ZS 1908, 74.

Über die Anordnung von Versuchen mit hohem Druck s. außer **55b** u. a.: Elektr. Leitvermögen: Fink, Wied. Ann. 26, 481. 1885; Lussana, Cim. (4) 12, 237. 1900. — Lichtbrechung: Röntgen u. Zehnder, ib. 44, 24. 1891. — Dielektr.-Konstanten: Röntgen, ib. 52, 593. 1894; — ϵ_p/ϵ_0 : P. P. Koch, Ann. d. Ph. 27, 311. 1908. — Auch das Preisverzeichnis von Ducretet & L. —

Eine Übersicht über Meßmethoden: Wiebe, ZS f. komprim. u. flüss. Gase 1, 8ff. 1897. — Firmen: z. B. Dreyer, Rosenkranz & Droop, Hannover; Schäffer & Budenberg, Magdeburg; Stückrath, Friedenau.

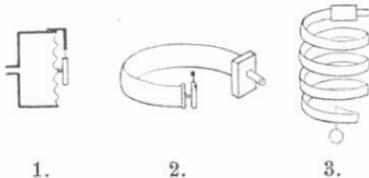
II. Wage(-Kolben)manometer. Der Druck auf den Kolben vom Querschnitt q wird auf einen äquilibrierten Wagebalken mit Wagschale übertragen und durch Gewichte p gemessen. In der Figur mit Hebelübertragung ist der Druck $= \frac{p}{q} \cdot \frac{L}{l}$. — Eine Manschette aus Goldschlägerhaut dichtet den lose eingeschliffenen Kolben; drehende Bewegungen vermindern die Reibung. Man mittelt die Ablesungen bei steigendem und fallendem Druck.



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 oder Temperaturwechsel lassen sich nötigenfalls leicht in Rechnung setzen. Die Empfindlichkeit der Messung nimmt dem Drucke proportional ab. Für große Drucke müssen die Abweichungen des Gases vom Mariotte'schen Gesetz bekannt sein.

Präzisionsmanometer bis 64 Atm. bei Kamerlingh Onnes, Commun. Phys. Lab. Leiden Nr. 50. 1899.

IV. Metallmanometer. Der Druck wird durch die Durchbiegung einer Metallmembran oder die Krümmung einer Metallröhre (Bourdon) gemessen, deren Bewegung auf einen Zeiger übertragen ist. Der zu messende Druck kann von innen oder von außen wirken. Die Eichung erfolgt empirisch mittels des Quecksilbermanometers. Geringe Druckvariationen können mittels eines drehbaren Spiegelchens, welches durch Kontakt mit dem Manometer bewegt wird (1 u. 2) oder sich mit dem Ende einer mehrfach gewundenen Bourdon'schen Röhre dreht (3), mit Fernrohr und Skale beobachtet werden.



1. Röntgen, Pogg. Ann. 148, 580. 1873; 2. F. K., ib. 150, 423. 1873; 3. Barus, ZS f. Instr. 1896, 253. Über elast. Nachwirkung (55c) vgl. z. B. Wagner, Ann. d. Ph. 15, 936. 1904. — Anwendung auf kleine Druckunterschiede bei Dieterici, Wied. Ann. 50, 55. 1893; 62, 624. 1897.

V. Elektrische Widerstandsmanometer. Nur für sehr hohe Drucke. Die kleine Änderung des Widerstandes von Manganindrähten durch den Druck (etwa $+0,000002$ auf 1 Atm.) verläuft bis 3000 Atm. nahe linear. Bei Messung des Widerstandes in der Wheatstone'schen Brücke (93 I) wird von 500 Atm. aufwärts eine Genauigkeit auf $1/1000$ als erreichbar angegeben, porenfreies Metall und Temperaturgleichheit vorausgesetzt.

Lisell, Öfv. K. Vetensk. Akad. 55, 697. 1898; Beibl. 1899, 393; ausführl. Dissert. Upsala 1902.

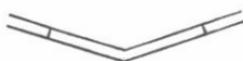
VI. Ausflußmanometer. Mittels einer durch ein Kapillarrohr hinausgedrückten Flüssigkeitsmenge nach dem Poiseuille'schen Gesetz (58 a); vgl. Perot C. R. 145, 1157. 1907.

VII. 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 spez. 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 p kompensiert wird durch eine Neigung des Rohres um den Winkel φ , so ist $p = sa \cdot \sin \varphi$. Der Neigungswinkel wird durch die Drehung der Fußschraube an der Libelle hervorgebracht und gemessen.

Mit mikroskopischer Ablesung ist eine Druckänderung von 10^{-8} Atm. noch bemerkbar und selbst die Temperatur drückender Gassäulen scharf zu messen. A. Toepler, Wied. Ann. 56, 611. 1895.

VIII. Messung sehr kleiner Gasdrucke (Arago). Man verkleinert das Volumen in gemessenem Verhältnis; der Druck steigt in gleichem Verhältnis. Die Ausführung, z. B. an einer Quecksilberluftpumpe, zeigt die Figur (häufig nach McLeod benannt). Das an die obere Birne ange setzte Rohr ist in mm geteilt und außerdem relativ zu dem bis an den Punkt P gerechneten Volumen der Birne kalibriert. Hebung der unteren Birne mit Quecksilber schließt durch dessen Ansteigen die Luft der oberen ab und drängt sie in das Meßrohr. Der Höhenunterschied gegen das Quecksilber im ebenfalls geteilten Verbindungsrohr gibt den Drucküberschuß des komprimierten Gases gegen das ursprüngliche, der, durch das jeweilige Volumverhältnis geteilt, den ursprünglichen Druck darstellt. 1000 malige Vergrößerung läßt diesen auf wenige Zehntausendtel mm messen; vollkommenes vorgängiges Trocknen vorausgesetzt!



An modernen Quecksilberpumpen kann man mittels des gebogenen Verbindungsrohres am Rezipienten (Fig. zu 8, 24) oft eine ähnliche Anordnung improvisieren.

Über eine handliche Form s. Reiff, Phys. ZS 8, 124. 1907.

Weitere Methoden für kleine Gasdrucke: 1. Mittels des Crookes'schen Radiometers (Lichtmühle); vgl. Dewar, Proc. R. S. (A) 79, 529. 1907. — 2. Mittels der Temperatur, welche ein elektrisch geheizter Leiter unter dem Zusammenwirken von Stromwärme und Wärmeabgabe erreicht, z. B. aus der Hitzdrahtausdehnung: Pirani, Verh. D. Ph. Ges. 1906, 686; Berndt (Siemens u. Halske), ib. 1907, 249. — 3. Vermittelt eines durch Wechselstrom geheizten Thermoelementes: Voege, Phys. ZS 7, 498. 1906. — 4. Aus dem Widerstand eines schmalen Bolometerstreifens: Warburg, Leithäuser und Johansen, Ann. d. Ph. 24, 25. 1907. — 5. Aus den Lichterscheinungen in Geißlerschen Röhren. — Vgl. auch kleine Drucke unter I und VII.

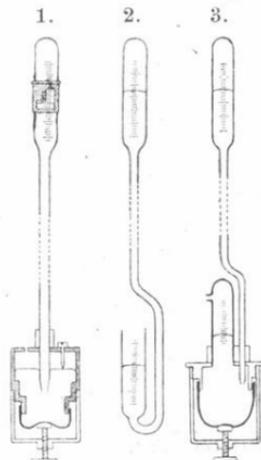
37. Atmosphärischer Druck (Barometerstand).

Eine genaue Messung des Luftdrucks wird, außer für meteorologische Zwecke, u. a. verlangt bei Höhenmessungen, für die Kenntnis der Dichtigkeit der Luft, dann bei der Bestimmung von Dampfdichten, Dampfspannungen, Siedepunkten, Thermometerprüfung.

Unter Barometerstand versteht man die Höhe einer Quecksilbersäule von 0°, die dem Luftdruck das Gleichgewicht hält. Für genaue Zwecke fügt man hinzu, daß die auf das Quecksilber wirkende Schwere diejenige unter 45° Breite am Meeresspiegel sein soll; vgl. 5. Die Korrektion kann 1,8 mm erreichen. — Als mittlerer („normaler“) Barometerstand am Meeresspiegel gilt 760 mm; vgl. S. 131.

Luft oder Wasserdampf über dem Quecksilber erniedrigen durch ihren eigenen Druck den Stand. Die Abwesenheit von Luft erkennt man an dem scharfen Klange, mit welchem das Quecksilber bei dem Neigen des Instrumentes oben anstößt. Schwieriger zu erkennen ist das Vorhandensein von Wasserdampf, welcher sich nur bei größeren Mengen durch einen Beschlag bemerklich macht, der sich bei dem Neigen an der Glaswand bildet.

Kann man durch Heben des Quecksilbers usw. das Vakuum über dem Quecksilber verkleinern und zugleich die Druckhöhe beobachten, so läßt sich eine vorhandene kleine Luft- oder Dampfmenge daran erkennen, daß die Höhe sich vermindert, und der Einfluß kann vermittelt Messung dieser Depression in Rechnung gesetzt werden. Das Wild-Fuess'sche Heberbarometer (Skizze in Fig. 3) läßt diesen Zweck durch Hinaufdrücken des Quecksilbers, in welches die beiden Schenkel eintauchen,



mittels des Lederschlauchs erreichen. Eine etwas andere Konstruktion hat einen mit Schraube komprimierbaren Lederdeckel.

Am Heberbarometer (Fig. 2) liest man beide Kuppen ab und nimmt ihre Höhendifferenz. — Am Gefäßbarometer (Fortin, Fig. 1) 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. Hat ein Gefäßbarometer diese Höhenverstellung nicht, so sind die beobachteten Schwankungen mit $1 + q/q'$ zu multiplizieren, wenn q bez. q' den Querschnitt des Rohres bez. des Gefäßes bedeuten. Häufig 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 (21, 1); oder mit einer Visiervorrichtung aus gespannten Fäden, oder dem Mikroskop. Ein Barometerrohr ohne Maßstab beobachtet man mit dem Kathetometer (22). Über den Nonius siehe 21.

Wegen der Reibung des Quecksilbers klopft oder neigt man vor der Ablesung. Vorteilhaft ist, auch wegen der Kapillarität, bei dem Heberbarometer das Quecksilber in beiden Schenkeln vor dem Ablesen ansteigen zu lassen (Fig. 3 v. S.).

Barometerablesungen verlangen folgende Korrekturen:

1. Temperatur des Quecksilbers. Das Quecksilber dehnt sich für 1° C. um 0,000182 seines Volumens aus. Ist demnach l der bei der Temperatur t des Barometers abgelesene Barometerstand, so ist der auf 0° reduzierte (4, Beispiel Nr. 2)

$$b = l - 0,000182lt.$$

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

Wenn wie gewöhnlich die Normaltemperatur $t_0 = 0$ ist, so beträgt also die gesamte Temperaturkorrektur $-(0,000182 - \beta)lt$. Der Zahlenfaktor wird für Messing 0,000163, für Glas 0,000174. — Tab. 8 erspart das Ausrechnen.

Bei dem gewöhnlichen Barometerstande kommt auf 1° nahe $\frac{1}{8}$ mm und es wird oft genügen, vom beobachteten Stande $\frac{1}{8}t$ mm abzuziehen.

3. Kapillardepression eines Gefäßbarometers. Um diese zu korrigieren, mag man zu dem an der Kuppe des Meniskus abgelesenen Stande den aus Tab. 18a zu dem inneren Durchmesser der Röhre und der Höhe des Quecksilbermeniskus entnommenen Wert hinzufügen (vgl. 6 und S. 132).

4. Spannkraft des Quecksilberdampfes. In höherer Temperatur bewirkt diese eine kleine Depression (Tab. 15), die aber erst oberhalb 40° 0,01 mm erreicht.

5. Schwere-Reduktion auf 45° . Der Druck einer Quecksilbersäule ist der Schwere am Orte proportional. Mit dem Ausdruck (35) $1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,0000002 H$, dessen letztes Glied übrigens nur in großen Höhen merklich wird, ist ein beobachteter Barometerstand zu multiplizieren, um den Stand zu erhalten, welcher demselben Luftdruck unter 45° am Meeresspiegel entspricht.

Aus dem reduzierten Barometerstande b in cm berechnet man den Druck in gr-Gewicht/cm² als $b \cdot 13,596$; in CGS-Einheiten, d. h. in Dynen/cm² oder in [cm⁻¹·gr·sec⁻²] (Anh. 8) als $b \cdot 13,596 \cdot 980,66 = b \cdot 13333$; vgl. 36 I.

Die Bemerkungen Nr. 1 bis 5 gelten für jede genaue Druckmessung mit Quecksilbersäulen.

6. Normalbarometer. Die aus der Kapillardepression entstehende Unsicherheit läßt sich nur durch ein weites Rohr (25 mm und für äußerste Genauigkeit noch weiter) vermeiden, welches die Depression ausschließt. Die Füllung geschieht zur Vermeidung von Luft oder Wasserdampf mit der Quecksilberluftpumpe. Über reines Quecksilber s. 8, 1. — Durch Vergleichung eines anderen Instrumentes mit diesem Normalbarometer bestimmt man die Korrekturen des ersteren empirisch.

Über Formen von Barometern, deren Luftgehalt stets zu kontrollieren oder zu beseitigen ist, vgl. L. Weber, ZS f. Instr. 13, 63. 1893. Über das Wild-Fueß'sche Barometer Wiss. Abh. d. P. T. Reichsanst. I, 93. 1894. — Barographen, die den Luftdruck registrieren, sind an Aneroidbarometer angeschlossen oder sie benutzen die Variation des Gewichtes der gehobenen Quecksilbersäule (Sprung), vgl. z. B. Scheel, ZS f. Instr. 1895, 133.

Aneroidbarometer werden durch Vergleichung mit dem Quecksilberbarometer justiert bezw. mit einer Korrekstabelle versehen. Man bringt das Instrument z. B. unter die Luftpumpe und verbindet mit dem Rezipienten ein hinreichend weites Glas-

rohr, in welches Quecksilbersäulen angesaugt werden. Nachdem man dann wegen der elastischen Nachwirkung, welche den Messungen rasch wechselnder Drucke mit dem Aneroid als Fehlerquelle anhaftet, längere Zeit gewartet hat, liest man das Aneroid, die gehobene Säule und den äußeren Barometerstand ab. Die letzteren beiden, auf 0^0 reduzierten Höhen, von einander abgezogen, geben den der Einstellung des Aneroids zugehörigen Barometerstand. — Die Temperaturkorrektur eines Aneroids ist empirisch zu bestimmen. — Über Einflüsse der elastischen Nachwirkung s. 55c. Ihre Elimination ist schwierig.

Variometer für Luftdruck. Zu Messungen dauernd brauchbar sind die unter 36 IV beschriebenen Spiegelinstrumente, wenn die Mündung verlötet ist. Die Temperatureinflüsse auf die Elastizität der Wände und des Luftgehalts lassen sich größtenteils dadurch kompensieren, daß die Luft bis auf einen geeigneten kleinen Rest ausgepumpt wird.

Sehr empfindlich mißt die Schwankungen auch eine, durch einen Tropfen (Petroleum, Toluol) in einer geteilten Röhre abgesperrte, größere Luftmenge, solange ihre Temperatur konstant erhalten wird. Vgl. v. Hefner-Alteneck, Wied. Ann. 57, 468. 1896. — Ferner M. Toepler, Ann. der Ph. 12. 787. 1903 über die Anwendung der unter 36 VII beschriebenen Drucklibelle.

38. Barometrische Höhenmessung (Halley, Laplace).

Mit wachsender Höhe nimmt der hydrostatische Druck der Luft ab. Bei dem Ansteigen vermindert sich die Quecksilbersäule, welche dem Luftdruck das Gleichgewicht hält, um eine Länge, die sich zu dem Höhenunterschiede verhält, wie das spez. Gewicht der Luft zu dem des Quecksilbers, unter gewöhnlichen Umständen also wie 0,0012:13,6 oder ungefähr wie 1:11000; d. h. auf 11 m Anstieg sinkt das Barometer um etwa 1 mm. — Da die Luft ein dem Barometerstande selbst proportionales, also mit der Höhe kleiner werdendes spez. Gewicht hat, so nimmt der Barometerstand nicht gleichmäßig mit der Höhe ab, sondern in geometrischer Progression. Folglich muß der Logarithmus des Barometerstandes mit wachsender Höhe gleichmäßig abnehmen, denn ein Logarithmus ändert sich gleichmäßig, wenn die Zahl sich in geometrischem Verhältnis ändert; $\lg ax = \lg x + \lg a$. — Vgl. auch die Ableitung folg. S. — Anleitung, Tafeln usw. z. B. bei Liznar, die barometrische Höhenmessung, 1903.

I. Der Höhenunterschied h zwischen benachbarten Stationen, an denen gleichzeitig die Barometerstände b_0 und b_1 bestehen, ist proportional $\lg b_0 - \lg b_1$, und zwar beträgt h in Metern:

$$h = 18400 (1 + 0,004t) (\lg b_0 - \lg b_1),$$

wofür bis zu Höhendifferenzen von etwa 1000 m auch der be-

quemere genäherte Ausdruck gesetzt werden kann

$$h = 16000 (1 + 0,004 t) \cdot (b_0 - b_1) / (b_0 + b_1).$$

t bedeutet die mittlere Temperatur der Luftsäule.

In diesen Formeln ist halbe Sättigung der Luft mit Wasserdampf und die für 45° geltende Schwere angenommen. Die Logarithmen sind die gewöhnlichen briggischen.

II. Um die Veränderlichkeit der Schwere und der Luftfeuchtigkeit zu berücksichtigen, bezeichnen wir mit

φ die geographische Breite,

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

e_0 und e_1 die Spannkraft des Wasserdampfes an den beiden Stationen (47) und setzen zur Abkürzung

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

Dann berechnet man die Höhendifferenz

$$h = 18430 (\lg b_0 - \lg b_1) (1 + 0,00367 t) \cdot (1 + 0,0026 \cos 2\varphi + 0,0000002 H + \frac{3}{8} k).$$

Beweis der Formeln. Man geht von einer so kleinen Höhenänderung dH aus, daß innerhalb dieser Höhe die Dichtigkeit der Luft λ als konstant angenommen werden darf. Sie beträgt (18 u. S. 127), wenn wir $0,0026 \cdot \cos 2\varphi = \delta$, $0,0000002 = \varepsilon$ und $0,00367 = \alpha$ setzen,

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

Die Dichtigkeit des Quecksilbers von 0° ist $= 13,596$. Folglich gilt, wenn zu dH die Änderung $-db$ des Barometerstandes gehört, $13,596 \cdot (-db) = \lambda \cdot dH$, und man hat

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

Hierin ändern sich eigentlich, in unbekannter Weise, t und e mit der Höhe; wir setzen die aus den beiden Endstationen erhaltenen Mittelwerte von t und von $e/b = k$ ein. Rechnet man dann den Zahlenfaktor aus und behandelt die kleinen Größen $\frac{3}{8}k$, δ und εH nach S. 9 als Korrektionsgrößen, so kann man schreiben

$$-7991000 (1 + \alpha t) (1 + \delta + \frac{3}{8}k) \cdot db/b = (1 - \varepsilon H) dH.$$

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

$$7991000 (1 + \alpha t) (1 + \delta + \frac{3}{8}k) (\lg \text{nat } b_0 - \lg \text{nat } b_1) = (H_1 - H_0) [1 - \frac{1}{2} \varepsilon (H_1 + H_0)].$$

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

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

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 18 Formel 2.

Die unter I für kleine Höhenunterschiede gegebene Formel ist nichts anderes als die obige Differentialformel, welche mit Mittelwerten von δ und k wird $-7990000(1 + \alpha t) db/b = dH$; dH ist der Höhenunterschied. Für den Unterschied der Barometerstände $-db$ schreiben wir $b_0 - b_1$, setzen den mittleren Stand $b = \frac{1}{2}(b_0 + b_1)$, lassen beim Übergange vom mm zum m 3 Nullen fort und erhöhen 7990 wegen der Schwerekorrektion um $\frac{1}{600}$ auf rund 8000.

Sehr große Höhen. Ballonhöhen von vielen tausend Metern sollen nach der vollständigen Formel zu klein ausfallen und zutreffender ohne individuelle Rücksicht auf Temperatur usw. als $h = 18590 (\lg b_0 - \lg b_1)$ berechnet werden. Maillard, C. R. 136, 1427. 1903; ZS f. Instr. 1904, 123.

Hypsometer. So nennt man einen leicht transportablen Apparat, der die Siedetemperatur des Wassers sehr genau bestimmen läßt; Tabelle 14a gibt die zusammengehörigen Siedetemperaturen und Barometerstände. Da 1 mm Barometerstand etwa $\frac{1}{25}$ Grad entspricht, so werden große Vorsichtsmaßregeln der Temperaturbestimmung (40 II) verlangt. Neuerdings ist aber die Sicherheit der Messung bis auf etwa $\pm 0,02$ mm des Barometerstandes gesteigert worden.

Vgl. z. B. Grützmaker, ZS f. Instr. 1897, 193; Mohn, Videnskabs-selsk. Skrifter I, Math. nat. Kl., Kristiania 1899 Nr. 2; Meteor. ZS 25, 193. 1908; Hecker, Best. der Schwerkraft auf d. Atlant. Ozean etc. Berlin 1903.

Reduktion eines Barometerstandes auf Meereshöhe. Die internationale Meteorologie korrigiert einen für die Höhe H geltenden Barometerstand b auf Meereshöhe, indem sie zu $\lg b$ die Größe addiert:

$$\frac{H(1 - \frac{3}{8}e/b)}{(18429 + 67,5t + 0,003H)(1 + 0,0026 \cos 2\varphi)}$$