universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Lehrbuch der praktischen Physik

Kohlrausch, Friedrich

Leipzig [u.a.], 1910

Wägung und Dichtigkeitsbestimmung

urn:nbn:at:at-ubi:2-6442

Wägung und Dichtigkeitsbestimmung.

10. Wage und Wägung.

Die Wägung ermittelt die Masse eines Körpers. Als Einheit gilt das Gramm, die Masse eines Kubikcentimeters[1]) Wasser von + 4°.

Genau wie die Massen verhalten sich die durch die Erde auf sie ausgeübten Anziehungskräfte, die „Gewichte im leeren Raum". In der Luft verliert der Körper durch den hydrostatischen Auftrieb ein Gewicht gleich dem Gewicht der verdrängten Luftmenge. Da feste und tropfbare Körper mindestens 600 mal schwerer sind als Luft, so bleiben hier die relativen Fehler durch den Luftauftrieb kleiner als 1/600. Über die Reduktion der Wägung auf den leeren Raum vgl. **13**.

Die folgenden Vorschriften schließen sich an die gleicharmige Hebelwage in der zur chemischen Analyse gebräuchlichen Form an.

Eine eingehende Behandlung siehe in dem wertvollen Werk: Felgentraeger, Theorie, Konstruktion und Gebrauch der feineren Hebelwage, Leipzig 1907. — Über die Praxis äußerst feiner Wägungen vgl. besonders auch Landolt, ZS f. phys. Ch. 55, 589. 1906.

I. Aufstellung, Prüfung, Behandlung der Wage.

Schneiden, Pfannen, Angriffsstellen der Arretierung müssen ganz rein, staubfrei, auch fettfrei sein. Letzteres gilt auch für die Reinigungsmittel, Pinsel und saubere, zuletzt ohne Seife gewaschene weiche Leinwand (Leder wird beanstandet).

Man nivelliert nach dem Senkel bez. der Libelle der Wage, oder nach einer auf das Fußbrett gesetzten Dosenlibelle, oder nach einem Senkel, welchem man die Vorderansicht des arretierten Zeigers parallel stellt.

Nun löst man die Arretierung aus, korrigiert ein etwaiges gröberes einseitiges Übergewicht und überzeugt sich, daß alsdann die Wage eine stabile Gleichgewichtslage hat. Sollte das Gleichgewicht labil sein (die Wage „umschlagen"), so wird zunächst das in der Mitte befindliche Laufgewicht herabgeschraubt, bis dies beseitigt ist.

Die Empfindlichkeit der Wage (vgl. auch **11**) wird durch Hinauf- oder Herabschrauben des genannten Laufgewichtes reguliert; sie läßt sich aus der Schwingungsdauer beurteilen, deren zweiter Potenz sie für eine bestimmte Wage proportional ist. Als Dauer einer Schwingung ist bei

1) Das gesetzlich festgelegte Gramm ist nach späteren Ermittelungen die Masse von 1,000028 cm^3 Wasser von 4°.

der langarmigen Wage 10 bis 15 sec, bei der kurzarmigen 6 bis 10 sec gebräuchlich. Eine größere Dauer verursacht Zeitverlust, stärkere Dämpfung und meistens inkonstante Einstellungen.

Nun wird mittels der für diesen Zweck vorhandenen Einrichtung (Laufgewicht am Ende des Balkens; Durchbohrung des vertikalen Laufgewichtes; drehbarer Arm usw.) bewirkt, daß die unbelastete Wage symmetrisch um den mittelsten Teilstrich schwingt. Eine Unsymmetrie von einigen Zehnteln mm, die mit der Zeit auch immer wieder entstehen kann, mag man mit den Fußschrauben korrigieren, deren eine man um gleichviel verkürzt, wie man die andere verlängert.

Prüfung der Wage. In erster Linie ist zu fordern, daß die Wage, wiederholt arretiert und ausgelöst, dieselbe Einstellung zeigt und daß die Schwingungen langsam abnehmen. Unregelmäßigkeiten können von dem Lockern einer Verschraubung am Wagebalken herrühren, oder von einer Unsauberkeit, ungeeigneter Gestalt oder Verletzung der Schneiden oder Pfannen.

Arretiert soll der Zeiger gerade über dem mittleren Teilstrich stehen; die Arretierungen sollen die Auflagen beiderseits gleichzeitig loslassen. Der Reiter soll, auf Null gesetzt, die Einstellung nicht beeinflussen.

Die Gleicharmigkeit prüft man durch beiderseitiges Aufsetzen von hinreichend großen Gewichtstücken, welche sich das Gleichgewicht halten: ihre Vertauschung darf die Einstellung nicht ändern. S. auch **12**.

Es ist endlich nicht überflüssig, zu prüfen, ob ein Gewicht auf jeder Stelle der Wagschale gleich wirkt. An Brücken- und Tafelwagen können starke Verstöße hiergegen vorkommen; kleinere auch bei der gewöhnlichen Wage, besonders wenn die Schale kein Zwischengehänge hat, was ein grober Fehler ist. Gegen Fehler aus nicht paralleler Schneidenstellung schützt das „Kreuzgehänge".

Die Reiterverschiebung soll vor dem Anstoßen an den Balken gesichert sein. — Einem rauhen Gange hilft man durch Abwischen mit einem Läppchen eventuell mit einer Spur Petroleum nach. — Bei den Exzentern und Axen der Arretierung dient ein geeignetes Schmiermittel.

Als Skalenteil am Zeiger empfiehlt sich etwa das mm. Die Zeigerspitze spiele dicht vor oder besser über der Teilung. Das Auge visiere in einer durch eine Marke auf der Glaswand fixierten Richtung. Vorteilhaft ist eine vor der Teilung fest angebrachte Lupe, etwa auf die Glaswand geklebte Linse; bei geeigneter Brennweite kann man aus großer Entfernung ablesen (vgl. Anmerkung zu **67** im Eingang). Man hält das Auge so, daß der Nullpunkt in der Mitte der Linse erscheint.

Daß die beiden gewöhnlichen Schalen einander genau gleich sind, ist nebensächlich; eine etwa vorhandene kürzere Wagschale soll hingegen mit einer der anderen an Gewicht genau stimmen.

An der gebräuchlichen Wage soll die Schwingungsweite möglichst langsam abnehmen; auf diese Wage beziehen wir uns. — Neuerdings werden auch Wagen gebaut, die mittels einer nicht durch die

Reibung fester Teile bewirkten dynamischen Dämpfung sich aperiodisch einstellen, was bequem, aber weniger genau ist. S. z. B. Crémieu, J. de ph. 6, 690. 1907; Instr. 1908, 24.

Behandlung der Wage. Der Tisch der Wage soll vor Erschütterungen vom Fußboden geschützt sein, auch vor Verbiegungen durch Auflegen des Armes gehütet werden. Vor allem ist die Wage vor Ungleichheiten der Erwärmung, z. B. durch Temperaturschwankungen des Zimmers, zu schützen. Der Beobachter befinde sich tunlichst entfernt symmetrisch zur Wage; ebenso eine etwaige Lampe. Durch eine dicke Glasplatte lassen sich Wärmestrahlen abfiltrieren.

Gegen Rost oder Luftfeuchtigkeit kann unter Umständen ein Gefäß mit Ätzkalk im Wagekasten stehen. — Das Auflegen von Gewichten geschieht nur bei arretierter Wage. — Pendelschwingungen der Schalen bedingen Fehler.

Bei der endgültigen Wägung sind Luftströmungen, die auch z. B. durch geringe Erwärmung des zu wägenden Körpers entstehen können, zu vermeiden. Ein Wagekasten wird selbstverständlich geschlossen. — Durch elektrische Ladungen können, wenn Glasteile des Kastens frisch geputzt sind, grobe Fehler entstehen, kleinere Fehler auch sonst, z. B. durch eine gläserne Bodenplatte, sowie bei Glas- oder Bergkristall-Wägungen. Die Anwesenheit einer in ein dünnes Glasröhrchen eingeschmolzenen Spur Radium sichert hiergegen (Dorn).

Einen gegebenen abzuwägenden Körper legt man gewöhnlich links; soll dagegen eine bestimmte Menge, etwa Flüssigkeit oder Salz, abgewogen werden, so ist die rechte Schale bequemer.

Spiegelablesung. Für die feinsten Wägungen benutzt man wohl an Stelle des Zeigers einen am Wagebalken angebrachten Spiegel, dessen Einstellung mittels Fernrohres an einer Skale abgelesen wird. Vgl. **25** u. **26**.

Empfindliche Wagen für kleine Belastung spielen auf spitzwinkligeren Prismen oder auf zwei Spitzen. — Über äußerst empfindliche Formen vgl. z. B. Warburg und Ihmori, Wied. Ann. 27, 483. 1886. Torsionswagen: Hertz, Verh. Berl. Ph. Ges. 1882, 18; Nernst, ZS f. El. Ch. 1903, 623.

II. Wägungsverfahren.

Es ist genauer, die Wage im schwingenden Zustande zu beobachten, als in der Ruhe. — Die den Körper äquilibrierenden Gewichtstücke findet man durch allmähliches Einschließen in engere Grenzen und kann, wenn man über ausreichend kleine

Gewichtstücke oder über eine Reiterverschiebung verfügt, hierbei so weit gehen, daß der Zeiger genau einsteht.

Interpolationsverfahren. Der häufigen Regulierung des mit der Zeit veränderlichen Nullpunktes und dem Ausprobieren der vollkommenen Gleichheit ist oft das Beobachten des zeitigen Nullpunkts und das Interpolieren des abgleichenden Gewichtes aus zwei Einstellungen bei verschiedener Belastung vorzuziehen.

Bestimmung des Nullpunktes, d. h. des Punktes der Skale, auf welchen der Zeiger der unbelasteten Wage in der Ruhe zeigen würde. Ein Reiter ist dabei auf den Nullstrich der Balkenteilung zu setzen oder auch, wenn man sich überzeugt hat, daß er hier keinen Einfluß ausübt, abzuheben. Man findet den Nullpunkt aus einigen Umkehrpunkten des schwingenden Zeigers. Die Schwingungsweite mag 2 bis 5 mm betragen. Für mäßige Genauigkeit nimmt man das Mittel aus zwei Umkehrpunkten oder bei stärkerer Dämpfung aus dreien, wobei zunächst aus Nr. 1 und 3 das Mittel genommen und dieses mit Nr. 2 zum Hauptmittel vereinigt wird.

Für genauere Zwecke wird man nach folgendem Schema etwa fünf Umkehrpunkte nehmen (lange Beobachtungsreihen bringen wegen der zeitlichen Änderungen der Wage leicht mehr Nachteile als Vorteile), das arithmetische Mittel aus den Beobachtungen auf der einen Seite, d. h. aus Nr. 1, 3, 5, und aus denen auf der anderen Seite, d. h. aus Nr. 2, 4, bilden und aus diesen beiden Zahlen wiederum das Mittel. Damit man nicht rechts und links unterscheiden muß, bezeichnet man den mittelsten Teilstrich der Wage nicht mit Null, sondern mit 10.

Beispiel.	Umkehrpunkte			Mittel	Nullpunkt
links	10,9	10,7	10,6	10,73	9,74
rechts		8,7	8,8	8,75	

Um aus zwei oder drei wenig verschiedenen Zahlen das Mittel zu nehmen, braucht man nicht etwa erst alles zu addieren und die Summe dann durch 2 oder 3 zu dividieren. Daß das Mittel aus 10,9 10,7 10,6 mit 10 anfängt, ist ja selbstverständlich. Und daß ,9 ,7 ,6 das Mittel ,73 geben, sieht man auch sofort. Mittelnehmen ist bei einiger Übung ebenso einfach wie Addieren und Subtrahieren und ist keinen gröberen Rechenfehlern ausgesetzt; ein nicht zu unterschätzender Vorteil. — Vgl. auch **26**, 1.

Man kann statt dessen auch den Mittelpunkt Null nennen und die Ausschläge nach der einen Seite positiv, nach der

anderen negativ zählen, also in dem obigen Beispiel schreiben $+0{,}9\ -1{,}3\ +0{,}7$ usw. Der Anfänger aber wird in der vorhin angegebenen Weise weniger leicht Fehler begehen.

Der Nullpunkt ist hinreichend oft zu kontrolieren, besonders nach stärkerer Belastung der Wage. Findet man Unterschiede, so nimmt man das Mittel aus den beiden Bestimmungen, welche der Wägung vorangehen und ihr folgen.

Wägung. Nachdem eine solche Zahl von Gewichtstücken aufgelegt, bez. schließlich der Reiter so auf einen vollen Teilstrich aufgesetzt worden ist, daß die Einstellung dem Nullpunkt nahe kommt, macht man wieder nach dem obigen Schema einen Satz von Umkehrbeobachtungen. Das Mittel wird von dem Nullpunkt um eine Differenz von n Skalenteilen abweichen. Kennt man die Empfindlichkeit C der Wage (**11**), d. h. den Ausschlag durch 1 mg Mehrbelastung, so ist n/C die Größe, welche man den Gewichtstücken noch zulegen bez. von ihnen wegnehmen müßte, um völlige Gleichheit zu erzielen.

Kennt man die Empfindlichkeit nicht, so nimmt man ein oder einige Milligramm fort oder legt zu, je nachdem die Gewichte zu schwer oder zu leicht waren, so daß die Einstellung auf die andere Seite vom Nullpunkt fällt, und beobachtet abermals wie vorhin. War die erste Einstellung e_1, die jetzige e_2, die Veränderung des Gewichts zwischen beiden Beobachtungen gleich π, so hat man die Empfindlichkeit $C = (e_1 - e_2)/\pi$ und kann jetzt rechnen wie vorhin.

Mit anderen Worten, wenn gefunden wurde

		der Nullpunkt	e_0
bei der	Belastung	p_1 die Einstellung	e_1
„ „	„	p_2 „ „	e_2,

so hat der Körper das Gewicht

$$p_0 = p_1 + (p_2 - p_1)\,\frac{e_0 - e_1}{e_2 - e_1}.$$

Selbstverständlich sind diese Differenzen sämtlich mit Rücksicht auf das Vorzeichen zu nehmen, wobei eine Erleichterung darin besteht, die Skalenteile nach derjenigen Richtung wachsend zu zählen, welche einer Vermehrung der Gewichtstücke entspricht.

Beispiel. Nullpunkt sei der obige Wert 9,74. Nach Auflegung des Körpers wurde beobachtet

Belastung:	Umkehrpunkte:	Mittel:	Einstellung:
3,036 gr	7,8 7,8 7,9 10,3 10,2	7,83 10,25	9,04
3,038 gr	9,6 9,4 9,3 12,3 12,3	9,43 12,30	10,86

Ausschlag auf 1 mg gleich $\frac{1}{2}1{,}82 = 0{,}91$ Skalent.

3,036 gr waren folglich zu leicht um $(9{,}74 - 9{,}04)/0{,}91 = 0{,}77$ mg. Das gleiche erhält man nach obiger Formel:

$$p_0 = 3{,}036 \text{ gr} + 2 \times 0{,}70/1{,}82 \text{ mg} = 3{,}03677 \text{ gr}.$$

Das Protokoll der Beobachtungen soll nach einem bestimmten Schema, z. B. dem obigen, geführt werden. — Man beachte noch, daß falsches Abzählen der Gewichtstücke ein sehr gewöhnlicher Fehler ist, zähle also mindestens zweimal.

Die Zuverlässigkeit des Verfahrens mit dem cg-Reiter reicht oft nicht weiter als auf 0,1 mg. Ganz feine Wägungen werden mit kleinen, berichtigten Gewichtstücken ausgeführt, ev. mit Hinzunahme eines mg-Reiters.

11. Empfindlichkeit der Wage.

Empfindlichkeit C einer Wage heißt die Änderung der Einstellung für die Mehrbelastung Eins (z. B. 1 mg) einer Schale. Ihre Bestimmung für verschiedene Belastungen ist als Kennzeichen für die Güte der Wage und ferner zur Vereinfachung der Wägungsmethode von Wichtigkeit. Besitzt man nämlich eine Tabelle oder eine Kurve, in welcher der Ausschlag auf 1 mg als Funktion der Belastung angegeben ist, so genügt für jede Wägung, außer der Bestimmung des Nullpunktes, eine einzige Beobachtung der Einstellung mit nahe richtigem Gewicht (vgl. vor. S.).

Theorie der Empfindlichkeit. Ist M die Masse des Balkens, a der Abstand seines Schwerpunkts von der Drehaxe (Mittelschneide), M' die Gesamtmasse der Schalen ev. inkl. Belastungen, a' der Abstand der Verbindungsgeraden der Aufhängepunkte (Endschneiden) von der Drehaxe, a und a' nach unten positiv gerechnet, $2L$ die Länge des Balkens, z die Länge des Zeigers und s die des Skalenteils, so ist $C = \dfrac{L}{Ma + M'a'} \dfrac{z}{s}$. Bei positivem a' sinkt, bei negativem a' steigt die Empfindlichkeit mit wachsender Belastung und kann im letzteren Falle $= \infty$ werden, worauf die Wage umschlägt. Für $a' = 0$, d. h. wenn die Aufhängepunkte der Schalen mit der Drehaxe in derselben Ebene liegen, haben die Schalen und ihre Belastungen keinen Einfluß auf C.

Zur Bequemlichkeit wird in der Regel für feinere Wagen diese Eigenschaft gewünscht. Da aber ihre Bedingung wegen der Durchbiegung des Balkens streng nur für eine bestimmte Belastung erfüllt sein kann, so stellt der Mechaniker sie wohl für eine mittlere Belastung her. Dann findet man anfangs eine kleine Steigerung der Empfindlichkeit mit der Belastung, für größere Gewichte wieder eine Abnahme.

Da wegen der Festigkeit die Massen stärker vergrößert werden müssen als die Längen, so lassen sich kurzarmige Wagen empfindlicher bauen als

langarmige, sie stellen aber größere Ansprüche an den Parallelismus der Schneiden.

Über Regelung der Empfindlichkeit und Schwingungsdauer s. S. 52.

Die Bestimmung ergibt sich von selbst. Man setzt auf beide Schalen die Belastung, für welche man die Empfindlichkeit C bestimmen will, und auf eine der Schalen ein kleines Übergewicht, so daß die Einstellung um einige (2 bis 3) Skalenteile vom mittelsten Teilstrich abweicht. Diese Einstellung e wird nach **10** II genau beobachtet. Hierauf bewirkt man durch Mehrbelastung der anderen Schale um π mg eine ungefähr ebensoweit nach der anderen Seite abweichende Einstellung e'; dann ist die Empfindlichkeit $C = (e - e')/\pi$.

Hat man C etwa für 0, 10, 20, ... gr bestimmt, so trägt man in Koordinatenpapier die Belastung als Abszisse, die Empfindlichkeit als Ordinate ein und kann dann aus der Kurve C für irgendeine Belastung entnehmen oder eine Tabelle dafür herstellen. Von Zeit zu Zeit wird man die Empfindlichkeit neu bestimmen müssen.

12. Verhältnis der Wagearme.

Nach dem Hebelgesetz wird ein Körpergewicht in demselben Verhältnis falsch gefunden, wie der Wagearm auf der Seite des Körpers größer ist als auf der Seite der Gewichtstücke. Der Fehler spielt aus zwei Gründen keine große Rolle. Denn erstens wird er bei einer guten Wage sehr selten 1/10000 erreichen. Zweitens aber kommen zumeist nur die Verhältnisse von Gewichten zur Geltung, z. B. bei allen Gewichtsanalysen, bei Bestimmungen von Dichtigkeiten, spezifischen Wärmen usw., so daß der Fehler hier ganz herausfällt, sobald man stets denselben Wagearm benutzt. Bei feinen absoluten Wägungen aber darf man sich nicht auf die Gleicharmigkeit verlassen.

Die beiden Wagearme verhalten sich umgekehrt wie die Gewichte, welche als gleichzeitige Belastung der Schalen die Wage auf den Nullpunkt (**10**) einstellen. Ist der Gewichtsatz richtig, so ergibt sich das Balkenverhältnis R/L, falls ein Gewicht p_r an dem rechten Arme R dem Gewicht p_l an dem linken Arme L die Wage hält, $R : L = p_l : p_r$.

Ohne die vollkommene Richtigkeit des Gewichtsatzes vorauszusetzen, bestimmt man das Verhältnis folgendermaßen.

Man beobachtet den Nullpunkt, setzt dann auf beide Schalen Gewichtstücke von gleichem Nennwert, etwa gleich der Hälfte der größten für die Wage zulässigen Belastung, und bestimmt

die Zulage, welche links oder rechts notwendig ist, um die Einstellung wieder auf den Nullpunkt zu bringen. Dabei empfiehlt sich für genaue Messungen das Interpolationsverfahren (**10** II). Der Nullpunkt ist hinreichend oft zu kontrolieren und ev. mit seinem Mittelwert vor und nach der Wägung einzusetzen. Alsdann vertauscht man die Gewichte und verfährt geradeso. Bezeichnen wir die beiden Gewichte vom Nominalbetrage p mit p_1 und p_2, und haben wir gefunden, daß die Wage einsteht, wenn

bei der einen Wägung links $p_1 + l$ rechts p_2

„ „ anderen „ „ p_2 „ $p_1 + r$,

so ist, die Länge des linken Wagearmes mit L, die des rechten mit R bezeichnet,

$$\frac{R}{L} = 1 + \frac{l - r}{2p}.$$

Eine kleine Zulage einerseits kann dabei als negative Zulage andrerseits betrachtet werden; siehe das Beispiel.

Beweis. Nach dem Hebelgesetze ist $L(p_1 + l) = Rp_2$ und $Lp_2 = R(p_1 + r)$, woraus (nach S. 9, Gl. 8 u. 3), wenn man schließlich p statt p_1 schreibt,

$$\frac{R}{L} = \sqrt{\frac{p_1 + l}{p_1 + r}} = \sqrt{\frac{1 + l/p_1}{1 + r/p_1}} = 1 + \frac{l - r}{2p}.$$

Beispiel.

Links		Rechts		
(50)	$(20 + 10 + \cdots)$	$(20 + 10 + \cdots)$	$+0{,}83$ mg	also $l = -0{,}83$
$(20 + 10 + \cdots)$	(50)		$+2{,}56$ „	„ $r = +2{,}56$;

$$\frac{R}{L} = 1 + \frac{-0{,}83 - 2{,}56}{100.000} = 1 - 0{,}0000339, \quad \text{oder} \quad L/R = 1{,}0000339.$$

Die geklammerten Zahlen stellen die mit diesen Ziffern bezeichneten Grammgewichtstücke vor. — Zugleich folgt (**13**)

$$(50) = (20 + 10 + \cdots) - 0{,}86 \text{ mg}.$$

Auch die Doppelwägung eines Körpers mit Nullpunktsbestimmung ergibt das Verhältnis der Arme; siehe **13** I.

Mit der Belastung kann das Verhältnis sich etwas ändern.

13. Absolute Wägung eines Körpers.

I. Elimination der Ungleicharmigkeit der Wage.

Solange nur Massen miteinander zu vergleichen sind, braucht man, wie schon gesagt, nur immer an demselben Arme der gleichen Wage zu wägen. Absolut aber muß ein Gewicht bestimmt werden, sobald, z. B. bei der Kalibrierung von Gefäßen, bei chemischen Titrierungen, bei der Herstellung von Lösungen, die Massen auf Volumina oder bei voltametrischer Messung auf elektrische Stromstärken usw. bezogen werden sollen.

Um das absolute Gewicht aus dem scheinbaren, bei der

Wägung gefundenen abzuleiten, multipliziert man das letztere mit dem Verhältnis der Wagearme, als Zähler die Länge des Armes, an welchem die Gewichtstücke wirkten. Unabhängig von diesem Verhältnis, welches für feine Wägungen nicht einmal als unveränderlich betrachtet werden darf, machen die folgenden Verfahren.

1. Doppelwägung. Man wägt den Körper einmal auf der linken Schale, das andere Mal auf der rechten Schale. Wenn p_1 und p_2 in beiden Fällen die Gewichtstücke bezeichnen, welche die gleiche Einstellung des Zeigers bewirken, z. B. auf den mittelsten Teilstrich, so ist das gesuchte Gewicht p des Körpers das Mittel

$$p = \tfrac{1}{2}(p_1 + p_2).$$

Beweis s. **4** Beisp. 3. Zugleich findet man, wenn p_1 und p_2 auf den richtigen Nullpunkt der Wage bezogen sind, das Balkenverhältnis

$$\frac{R}{L} = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = \sqrt{1 + \frac{p_2 - p_1}{p_1}} = 1 + \frac{p_2 - p_1}{2p_1}.$$

2. Tariermethode. Der Körper auf einer Schale wird durch irgend eine Belastung (Tara) der anderen äquilibriert, am bequemsten mit einem zweiten Gewichtsatz, der nicht genau zu sein braucht; der Körper wird alsdann weggenommen und durch Gewichtstücke bis zur gleichen Einstellung der Wage ersetzt. Letztere geben sein Gewicht.

II. Reduktion der Wägung auf den leeren Raum.

Zweck der Wägung ist meistens die Bestimmung der Masse eines Körpers durch Vergleichung mit bekannten Massen aus einem sogenannten Gewichtsatze. In der Luft erleiden sowohl Körper als Gewichtstücke einen Auftrieb gleich dem Gewicht der verdrängten Luft.

Wir nehmen an, daß der Gewichtsatz „im leeren Raum richtig" ist, d. h. daß er richtige Massen darstellt; ferner daß alle Gewichtstücke die gleiche Dichte haben. Bei den Bruchgewichten trifft letzteres freilich selten zu, indessen sind diese kleinen gegen die großen Stücke wohl immer in Luft abgeglichen, und insofern Luftschwankungen bei ihnen keinen, für die gewönlichen Zwecke merklichen Einfluß haben, so sind die Bruchgewichte bei der Wägung einfach so zu rechnen, wie wenn sie aus demselben Material beständen wie die großen. Vgl. auch **14**.

Nennt man

m das scheinbare Gewicht des Körpers in der Luft, d. h. die Gewichtstücke, welche ihn in der Luft äquilibrieren,

λ die Dichtigkeit (das spezifische Gewicht) der Luft ($\lambda = 0{,}00120$ im Mittel. Siehe auch **18** und Tab. 6),

s die Dichtigkeit des Körpers (Tab. 2 bis 3b),

σ die Dichtigkeit der Gewichtstücke (Messing = 8,4),

so ist das Gewicht M im leeren Raume

$$M = m\left(1 + \frac{\lambda}{s} - \frac{\lambda}{\sigma}\right).$$

Beweis. Der Körper hat das Volumen $V = M/s$, die Gewichtstücke $v = m/\sigma$. Der Auftrieb ist gleich dem Gewicht der verdrängten Luft; also verliert der gewogene Körper $\lambda V = \lambda M/s$, die Gewichtstücke $\lambda v = \lambda m/\sigma$. Da die Gewichte nach dem Erleiden dieser Verluste gleich groß gefunden sind, so ist also $M(1 - \lambda/s) = m(1 - \lambda/\sigma)$, woraus der obige Wert M sich nach S. 9, Formel 8 ergibt.

Es ist also zu dem gefundenen scheinbaren Gewicht m hinzuzufügen $m\lambda(1/s - 1/\sigma)$, eine Korrektion, welche mit der Ungleichheit von s und σ wächst. Für λ genügt gewöhnlich der mittlere Wert 0,0012. Für einen Messinggewichtsatz können dann die bei verschiedenen sp. Gewichten s aus der Formel sich berechnenden Korrektionen aus Tab. 1 entnommen werden.

Beispiel. Die Korrektion des scheinbaren Gewichtes w einer mit Messinggewichten ($\sigma = 8{,}4$) gewogenen Wassermenge beträgt $w \cdot 0{,}0012(1/1 - 1/8{,}4) = w \cdot 0{,}00106$ d. h. 1,06 mg auf jedes Gramm.

Auch wo es nicht auf das absolute Gewicht, sondern nur auf Gewichtsverhältnisse ankommt, wie bei chemischen Analysen, bedingt der Auftrieb unter Umständen Korrektionen, ohne welche Fehler von mehr als 1 Promille entstehen können. Analysiert man z. B. eine verdünnte Silberlösung durch die Wägung der Lösung und des daraus erhaltenen Chlorsilbers (Dichtigkeit = 5,5), und sind P und p die in Luft gefundenen Gewichte, so sind die wirklichen $P(1 + 0{,}0012)$ und $p(1 + 0{,}0012/5{,}5)$. Der Chlorsilbergehalt beträgt also

$$\frac{p \cdot (1 + 0{,}0012/5{,}5)}{P \cdot (1 + 0{,}0012)} = \frac{p}{P}\left[1 - 0{,}0012\left(1 - \frac{1}{5{,}5}\right)\right] = \frac{p}{P} \cdot 0{,}9990.$$

Der unkorrigierte Wert p/P ist demnach um 0,1 % zu groß. Die Vernachlässigung solcher einfacher Korrektionen widerspricht der auf die Wägungen verwandten Sorgfalt und oft dem durch die Zahl der mitgeteilten Dezimalen erhobenen Anspruch auf Genauigkeit.

Schwankungen der Luftdichte an einem Orte übersteigen selten 0,00015. Sie werden gewöhnlich außer Betracht bleiben. Zu den Fällen, wo dies nicht zutrifft, gehört häufig das Wägen kleiner Mengen in großen Gefäßen: das scheinbare Gewicht einer 100 gr schweren Platinschale kann wegen des Luftauftriebes um 1 mg schwanken.

Über die prinzipielle Frage, ob das Gramm eine Masse oder ein Gewicht vorstelle, vgl. die Bemerkung im Anhange über das absolute Maßsystem. In der gewöhnlichen Praxis der Messungen macht es selten einen Unterschied, ob man von Gewichten oder Massen spricht, insbeson-

dere entstehen keine Irrtümer. Für die chemische Analyse oder irgend eine andere auf Prozente hinausführende Operation ist es gleichgültig, ob man Massen oder Gewichte (im leeren Raum) meint. Ebenso wird man zu den nämlichen Zahlen geführt, wenn man von dem spezifischen Gewicht eines Körpers oder unter dem Namen Dichtigkeit von der spezifischen Masse eines Körpers redet; vorausgesetzt, daß man, wie immer, diese Eigenschaften des Körpers mit derjenigen des Wassers als Einheit vergleicht. Wenn aber entweder die Körper mit ihrer Trägheit in Betracht kommen oder wenn andrerseits Gewichte zur Kraftmessung dienen, wie bei der Messung von Arbeit, Druck, Elastizität, muß man zwischen den Begriffen Masse und Gewicht streng unterscheiden.

14. Korrektionstabelle eines Gewichtsatzes.

Bei der gebräuchlichen Anordnung eines Gewichtsatzes verfährt man nach folgendem Schema. Wir bezeichnen die Grammstücke mit $50'\ 20'\ 10'\ 10''\ 5'\ 2'\ 1'\ 1''\ 1'''$.

Man führe eine Doppelwägung mit $50'$ einerseits und der Summe der übrigen Gewichte andrerseits aus. Man finde dabei, daß die Wage einsteht (der Zeiger in der Stellung ist, welche er bei unbelasteter Wage einnimmt), wenn

links	rechts
$50'$	$20'+10'+\cdots+r$ mg
$20'+10'+\cdots+l$ mg	$50'$

dann ist das Verhältnis der Wagearme (**12**)

$$R/L = 1+(l-r)/100000$$

und

$$50' = 20'+10'+\cdots+\tfrac{1}{2}(r+l).$$

Weiter vergleicht man $20'$ mit $10'+10''$ und $10'$ mit $10''$ sowie mit $5'+2'+\cdots$ Die Doppelwägung gibt auch in diesen Fällen größere Sicherheit, auch ist das Balkenverhältnis im allgemeinen von der Belastung etwas abhängig. An einer guten Wage mag man aber den oben gefundenen Wert als allgemeingültig annehmen und nur einseitig vergleichen. Es bedeutet dann ein Stück p, rechts aufgelegt, auf die Balkenlänge der linken Seite reduziert, $p\cdot R/L$.

Beispiel. Es sei $r=-0{,}63$ $l=+2{,}73$ mg, so ist

$$50' = 20'+10'+\cdots+1{,}05\text{ mg} \quad \text{und} \quad R/L = 1{,}000034.$$

Ferner sei bei der Vergleichung des 5 gr-Stückes mit der Summe der kleinen Gewichte gefunden, daß die Wage einsteht, wenn

links $5'+0{,}06$ mg rechts $2'+1'+1''+1'''$,

so würden an einer gleicharmigen Wage sich das Gleichgewicht halten $5' + 0{,}06$ mg und $(2' + 1' + \cdots) \times 1{,}000034$ oder $2' + 1' + \cdots + 0{,}17$ mg.

Folglich ist $5' = 2' + 1' + 1'' + 1''' + 0{,}11$ mg.

Diese Wägungen mögen die folgenden, positiven oder negativen, Differenzen A, B etc. ergeben haben, denen gleich Zahlen als Beispiel beigeschrieben werden sollen:

$50' = 20' + 10' + \cdots$	$+ A$	$+ 0{,}48$ mg
$20' = 10' + 10''$	$+ B$	$+ \,,06$ „
$10'' = 10'$	$+ C$	$+ \,,17$ „
$5' + 2' + 1' + 1'' + 1''' = 10'$	$+ D,$	$- \,,29$ „

Aus den Gleichungen muß der Wert der fünf Stücke, die Summe der kleinen vorläufig als ein Stück betrachtet, in irgend einer Einheit ausgedrückt werden. Man wird, wenn man nicht etwa außerdem eine Vergleichung mit einem Normalgewicht vornimmt, diese Einheit so wählen, daß die Korrektionen der einzelnen Stücke möglichst klein werden, und das ist der Fall, wenn man die Summe als richtig annimmt, d. h. wenn man setzt

$$50' + 20' + 10' + \cdots = 100 \text{ gr}.$$

Man bezeichne nun zur Abkürzung

$$S = \tfrac{1}{10}(A + 2B + 4C + 2D) \qquad + 0{,}070 \text{ mg}$$

so ist, wie man leicht nachweisen kann,

$10' = 10 \text{ gr} - S$	$- 0{,}07$ mg
$10'' = 10$ „ $- S + C$	$+ \,,10$ „
$5' + \cdots = 10$ „ $- S + D$	$- \,,36$ „
$20' = 20$ „ $- 2S + B + C$	$+ \,,09$ „
$50' = 50$ „ $- 5S + A + B + 2C + D = 50 \text{ gr} + \tfrac{1}{2}A.$	$+ \,,24$ „

Die Probe für die Richtigkeit der Rechnung ist dadurch gegeben, daß, wenn man die Korrektionen in Zahlen bestimmt hat, ihre Summe $= 0$ sein muß und daß die vier Beobachtungs-Gleichungen erfüllt sein müssen.[1])

1) Selbstverständlich kann man, falls ein zweiter Gewichtsatz zur Verfügung steht, alle Wägungen durch Tarieren ausführen. Jede Vergleichung fordert dann aber zwei Wägungen. — Legt man der Rechnung als vorläufige Einheit eins der kleinsten Gewichte (1 cg), statt wie hier die Summe aller Gewichte zugrunde, so entfallen die Ausdrücke $A + 2B \ldots$ etc. Die vorläufigen Korrektionen können dabei aber bei den großen Stücken auf ganze Gramme steigen, also fünf- bis sechsziffrige Zahlen erreichen.

Ferner habe man gefunden

$5' = 2' + 1' + 1'' + 1''' + a$		+ 0,54 mg
$2' = 1' + 1''$	$+ b$	+ ,02 „
$1'' = 1'$	$+ c$	− ,10 „
$1''' = 1'$	$+ d.$	− ,13 „

Setzt man $s = \frac{1}{10}(a + 2b + 4c + 2d + S - D)$, + 0,028 mg

so kommt

$1' = 1$ gr $- s$	− 0,03 mg
$1'' = 1$ „ $- s + c$	− ,13 „
$1''' = 1$ „ $- s + d$	− ,16 „
$2' = 2$ „ $- 2s + b + c$	− ,14 „
$5' = 5$ „ $- 5s + a + b + 2c + d.$	+ ,09 „

Ebenso wird mit den Bruchgrammen verfahren.

Befolgt man bei dem Wägen die Regel, stets zu bilden: die Gewichte

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 etc. gr

aus den Stücken

$1'$ $2'$ $2' + 1'$ $2' + 1' + 1''$ $5'$ $5' + 1'$ $5' + 2'$ $5' + 2' + 1'$ $5' + 2' + 1' + 1''$ $10'$ etc.,

so kann man gleich für jede Ziffer aus jeder Dekade die Korrektion aufstellen, also für das obige Beispiel die Korrektionen in Hunderteln mg:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zehner	− 7	+ 9	+ 2	+ 12	+ 24	+ 17	+ 33	+ 26	+ 36
Einer	− 3	− 14	− 17	− 30	+ 9	+ 6	− 5	− 8	− 21

etc. für Zehntel, Hundertel.

Bisher wurde die Summe der größeren Gewichtstücke als richtig angenommen; für die meisten Arbeiten (chemische Analyse, spezifisches Gewicht), die nur relative Wägungen verlangen, genügt dies. Um auf richtiges Gewicht zu beziehen vergleicht man (**13**) ein Stück oder eine Summe p mit einem Normalgewicht. Findet sich hierbei die richtige Korrektion $= + \delta_0$, während die frühere Tabelle $+ \delta$ gibt, so ist zu der früheren Korrektionszahl eines jeden Gewichtes P zu addieren $(\delta_0 - \delta)\, P/p$.

Zur Unterscheidung der Gewichtstücke von gleichem Nennwerte sollen die Ziffern in verschiedener Weise eingeschlagen oder mit einem Index versehen sein; andernfalls muß man zufällige Merkzeichen aufsuchen. Bei den Blechgewichten hilft man sich durch das Umbiegen verschiedener Ecken. — Auf den Gewichtsverlust in der Luft braucht für gewöhnliche Zwecke, wenn die größeren Stücke von gleichem Material sind, keine Rücksicht genommen zu werden, weil bei den kleineren der durch Schwankungen der Luftdichte entstehende Unterschied verschwindet; vgl. **13** II.

— Die Wägungen sind, unter steter Kontrole des Nullpunkts, durch Schwingungsbeobachtung nach **10** auszuführen.

Die häufiger gebrauchten Stücke pflegen mit der Zeit leichter zu werden, so daß es kein Nachteil ist, wenn in einem neuen Satz die kleinen Stücke relativ etwas zu schwer sind.

Für andere Anordnungen von Gewichtsätzen findet man leicht ein ähnliches Schema. Die Stückelung 1 2 3 4 in jeder Dekade hat die Vorteile, daß keine Stücke von gleichem Nennwert vorkommen und daß jede Dekade in sich vergleichbar ist. Für feine Wägungen empfiehlt sich 1 2 3 4 5, wobei in jeder Dekade 12 Wägungen vorgenommen werden können, die mit kleinsten Quadraten ausgeglichen werden. — Die sparsamste Anordnung eines Satzes ist 1 3 9 27 81 . . .; durch Auflegen rechts und links kann man hiermit jede Zahl darstellen. In sich vergleichbar sind diese Stücke natürlich nicht.

Die K. Normal-Eichungskommission, Charlottenburg, prüft Gewichtsätze. Die Korrektionstabelle reduziert jedes Stück auf das Vakuum, so daß die Auftriebskorrektionen bei den Bruchgrammen (sp. Gew. σ') relativ andere werden als bei den großen Stücken (sp. Gew. σ). Zum bequemeren gewöhnlichen Gebrauch rechne man die Korrektionen der Bruchgramme für jedes Stück p durch Addition von $0{,}0012\,p(1/\sigma - 1/\sigma')$ um; dann fällt bei relativen Wägungen der Luftauftrieb heraus, bei Reduktionen auf das Vakuum darf er merklich nach **13** II mit σ als gemeinsamem Faktor für alle Stücke in Rechnung gesetzt werden.

15. Dichtigkeit; spezifisches Gewicht. Bestimmungsmethoden.

Dichtigkeit oder spezifische Masse s eines Körpers (vgl. Tab. 2 u. 3) nennt man die in der Volumeinheit (ccm) des Körpers enthaltene Masse (gr), mit andern Worten seine Masse geteilt durch sein Volumen [1]). Wasser im Dichtemaximum bei 4° hat also die Dichtigkeit Eins, weil es im ccm 1 gr enthält. Die Zahl s läßt sich folglich auch darstellen als das Verhältnis der Körpermasse zur Masse eines gleichen Volumens Wasser von 4°; anstatt dieses Massenverhältnisses kann auch das Verhältnis der Gewichte im leeren Raum gesetzt werden.

Der Ausdruck spezifisches Gewicht bedeutet das in der Volumeinheit enthaltene Gewicht des Körpers, also die gleiche Zahl wie die Dichtigkeit, wenn das Grammgewicht als Gewichtseinheit dient. Insofern letzteres stillschweigend vorausgesetzt wird, pflegt man zwischen beiden Ausdrücken keinen Unterschied zu machen.

Bei einer genauen Angabe der Dichtigkeit ist wegen der Wärme-

1) Streng genommen faßt das geometrisch ausgemessene Kubikcentimeter nicht genau 1 gr, sondern 0,999972 gr Wasser von 4° (Anm. zu S. 52). Bei den Dichteangaben gilt also eigentlich das Volumen 1,000028 ccm (1 „Milliliter“) als Einheit. Wir berücksichtigen diesen Unterschied nicht.

ausdehnung die Temperatur t des Körpers mitzuteilen, für die sie gilt, was am einfachsten durch die Bezeichnung s_t geschieht.

Ältere Angaben legen anstatt Wasser von 4° wohl solches von einer anderen Temperatur θ (z. B. 15° oder 18°) als Einheit zu Grunde. Dies bezeichnet man, wenn zugleich t die Temperatur bedeutet, die für den Körper gilt, durch $s_{t/\theta}$. Besonders häufig findet man wässrige Lösungen auf Wasser von der Temperatur der Lösung bezogen. $s_{18/18}$ z. B. bedeutet, daß 18° für die Lösung wie für das Wasser gilt. — Die Definition des spez. Gewichts als Gewicht der Volumeinheit trifft dann nicht streng zu.

Um ein „auf Wasser von der Temp. θ bezogenes" sp. Gew. s auf Wasser von 4° umzurechnen, hat man s mit der, für θ geltenden Dichtigkeit Q des Wassers (Tab. 4; Q ist < 1) zu multiplizieren. Vgl. auch **16** IV.

Spezifisches Volumen nennt man den reziproken Wert der Dichtigkeit, d. h. das Volumen der Masseneinheit. Molekularvolumen heißt das Molekulargewicht eines Körpers multipliziert mit seinem spezifischen Volumen oder dividiert durch seine Dichtigkeit; das ist also das in ccm ausgedrückte Volumen eines Gramm-Moleküls (eines „Mols"), d. h. einer Masse des Körpers von einer Anzahl Gramme gleich seinem Molekulargewicht. Entsprechende Bedeutung haben Äquivalent- und Atom-Volumen.

Über Gase und Dämpfe vgl. **18** bis **20**.

Zunächst sollen die Bestimmungsmethoden beschrieben und die Regeln für die Berechnung so angegeben werden, als wägte man im leeren Raum und arbeitete mit Wasser von 4°; die anzubringenden Korrektionen s. unter **16**.

A. Für Flüssigkeiten.

1. Kalibriertes Gefäß (Meßflasche, Pipette, Meßcylinder, Bürette); vgl. **23**.

Beträgt die Masse m gr, das Volumen v ccm[1]), so ist nach der Definition die Dichtigkeit $s = m/v$.

Man wägt z. B. ein in einer Meßflasche abgemessenes Volumen. Oft ist auch eine Pipette brauchbar; wenn die Auslaufmenge nicht sicher genug ist, so kann man eine auf Trockenfüllung geeichte Pipette zunächst trocken mit einem Fläschchen zusammen wägen, alsdann die Pipette füllen und ihren in das Fläschchen ausgelaufenen Inhalt wieder mit Pipette und Fläschchen zusammen wägen.

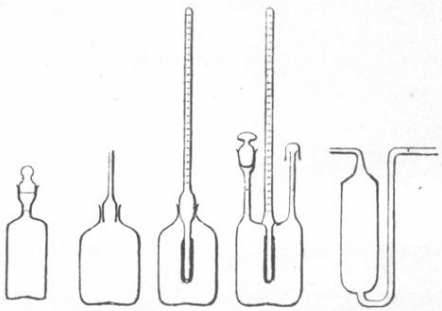
Bei dem Gebrauch eines geteilten Cylinders, z. B. auch einer Bürette, wird man meistens das Gewicht einer ausgegossenen

1) S. Anm. S. 65.

oder ausgeflossenen Menge bestimmen und hat dann die für den Auslauf geltenden Volumina in Rechnung zu setzen. Vgl. **23**.

2. Pyknometer.

Man wägt, durch Differenzbestimmung gegen das leere Gefäß, die Flüssigkeitsmenge m und die Wassermenge w, welche von einem und demselben Gefäß aufgenommen werden; dann ist $s = m/w$. Ein gewöhnliches Fläschchen, bis zum Rande oder zu einem Strich am Halse gefüllt, liefert leicht die 3te Dezimale richtig. Genauer arbeiten die mit dem Namen Pyknometer, Tarierfläschchen, bezeichneten konstanten Gefäße (Fig.), welche ganz oder bis zu einer Marke gefüllt werden, am genauesten Nr. 4 u. 5, wo die eine Öffnung zum Einlassen der Flüssigkeit, die andere zum Auslassen bez. Absaugen der Luft dient. — Nr. 1 wird mit einem langen dünnen Trichter gefüllt, mittels einer dgl. Pipette entleert oder, unter Einführung eines Glasrohrs zum Lufteintritt, ausgegossen.



Verfügt man nur über einige Tropfen, so lassen sich ganz kleine Fläschchen anwenden, wie sie zu Dampfdichtebestimmungen (**19** B) gebraucht werden. — Nr. 5 (Sprengel-Ostwald), durch Saugen von der Spitze bis zu einer Marke gefüllt, hängt man mit einem Drahte an die Wage. Genau stellt man die Füllung ein, indem man an der Spitze mit Fließpapier etwas absaugt oder mittels eines vorgehaltenen Tröpfchens etwas einsaugen läßt. Die Kenntnis der Temperatur wird hier und nötigenfalls bei Nr. 1 durch ein Bad von konstanter Temperatur erzielt, in welchem das Pyknometer sich aber hinreichend lange befunden haben muß. Über Füllung und Temperaturbestimmung von Nr. 2 vgl. B 2. Über die Korrektion wegen Temperaturschwankungen siehe **16** II.

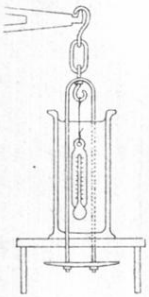
Bequemer als Austrocknen des Gefäßes vor einer Neufüllung wird Vorspülen mit der neuen Flüssigkeit sein.

Für Dichtebestimmungen bei der Siedetemperatur wird das Pykno-

meter im Dampf der siedenden Flüssigkeit erwärmt; vgl. Ostwald-Luther S. 170. — Oberhalb des Siedepunkts s. z. B. Noyes, ZS f. ph. Ch. 46, 346. 1903; Publ. Carneg. Inst. Nr. 63, 1907.

3. Auftriebsmethode.

Man wägt einen mit Faden oder Draht an die Wage gehängten Körper (Glaskörper) in der Luft (p_l), in der Flüssigkeit (p_f) und im Wasser (p_w). Der Gewichtsverlust in der Flüssigkeit beträgt $m = p_l - p_f$, im Wasser $w = p_l - p_w$; somit ist wieder $s = m/w$. Denn wenn v das Volumen des Glaskörpers bedeutet, so ist nach dem Archimedischen Gesetz der Auftrieb (Gewichtsverlust) je gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit, also $m = v \cdot s$ und $w = v \cdot 1$. Korrektionen in **16**.



Zum Aufhängen dient eine kürzere Wagschale mit Häkchen oder, mangels eines solchen, ein Haken im Bügel der Wagschale, wobei die Flüssigkeit auf einem Tischchen über der Wagschale steht (Fig.).

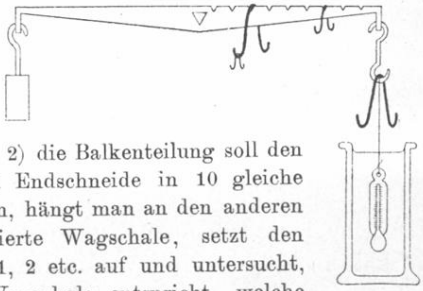
Die Aufhängeschlinge des Glaskörpers soll ganz untertauchen. Hauptfehlerquelle ist die Reibung in der Oberfläche bez. die Unregelmäßigkeit in der Benetzung des Aufhängefadens, welche bei Metalldrähten, besonders im Wasser, erheblich sein kann. Platindraht, den man platiniert (**8**, 18) und dann geglüht hat, vermindert den Fehler. — Bequem wird als Senkkörper ein kurzes, dickes Thermometer gebraucht. Die Rechnung wird erleichtert, wenn der Auftrieb w des Körpers in Wasser von 4° eine runde Zahl beträgt, z. B. 10 gr oder 30 gr.

Man soll darauf achten, daß nicht in der Aufhängeöse des Senkkörpers ein Luftbläschen sitzen bleibt!

Über Bestimmungen an verdünnten Lösungen bis in die 6. und 7. Dezimale vgl. Kohlrausch u. Hallwachs, Wied. Ann. 53, 15. 1894; 56, 185. 1895; Mie, ib. Boltzmann-Festschrift, S. 326. 1904. — Hohe Temperaturen: u. a. Senkkörper aus Platin oder für leichtere Flüssigkeiten aus dem sich wenig ausdehnenden (**44** II) Quarzglas; geschmolzene Salze z. B. Goodwin u. Mailey, Phys. Review 25, 478. 1907.

Mohr'sche Wage. Ein Glaskörper ist mit einem feinen Draht an einem dezimal geteilten Wagebalken äquilibriert. Der Auftrieb des Körpers in Wasser ist gleich dem Gewichte des größten Reiters; die anderen Reiter sind 10, 100 bez. 1000 mal leichter. Die Teilstriche des Wagebalkens, auf welche die Reiter aufgesetzt

werden müssen, um den Auftrieb der Flüssigkeit auf den untergetauchten Glaskörper zu kompensieren, geben ohne weiteres die einzelnen Dezimalen des spezifischen Gewichtes an, z. B. in der Figur 1,373.



Prüfung der Mohr'schen Wage. 1) die Reitergewichte sollen sich wie 1:10:100 verhalten; 2) die Balkenteilung soll den Horizontalabstand der Mittel- und Endschneide in 10 gleiche Strecken teilen. Um dies zu prüfen, hängt man an den anderen Wagebalken eine kleine äquilibrierte Wagschale, setzt den größten Reiter auf den Teilstrich 1, 2 etc. auf und untersucht, ob er dabei Gewichten auf der Wagschale entspricht, welche sich wie 1:2 etc. verhalten; 3) die Wage soll im Wasser von der Temperatur t diejenige Dichtigkeit zeigen, welche in Tab. 4 zu t gehört. Zeigt die Wage Q' statt Q, so sind ihre Angaben sämtlich mit Q/Q' zu multiplizieren. — Eine gute Mohr'sche Wage mit feinem platiniertem Platindraht (vgl. vor. S.) kann die 4te Dezimale noch einigermaßen richtig liefern.

4. Gewichtsaräometer. Schwebemethode.

Ein Schwimmkörper wiege P gr und bedürfe einer Auflage von p bez. p' gr, um bis zu einem bestimmten Volumen eintauchend in Wasser bez. einer anderen Flüssigkeit zu schwimmen. Dann hat diese offenbar das sp. Gewicht $s = \frac{P+p'}{P+p}$. Die ursprüngliche Senkwage von Nicholson (s. auch B 3) belastet man jedesmal zum Einsinken bis zur nämlichen Marke am Halse.

Über ein genaueres Aräometer vgl. Lohnstein, ZS f. Instr. 1894, 164.

Unter den Unsicherheiten der Kapillarität leiden Schwimmer nicht, die man ganz untersinkend durch Auflagegewichte zum Schweben bringt. Von diesen Gewichten (sp. G. $= \sigma$) ist in der Berechnung ihr Auftrieb p/σ im Wasser, bez. $p's/\sigma$ in der anderen Flüssigkeit abzuziehen, wo für s ein Näherungswert genügt.

Über eine Anordnung zu diesem Zweck und über die Korrektionen wegen Temperatur usw. vgl. z. B. Warrington, Phil. Mag. (5) 48, 498. 1899; Nansen, Norweg. Nord-Polar-Exp. X., Leipz. 1900.

5. Skalenaräometer. Senkwage.

Ein schwimmender Körper sinkt so weit ein, daß die verdrängte Flüssigkeit gerade sein Gewicht hat. Die Senkwage hat einen so tief liegenden Schwerpunkt, daß der Stiel beim Schwimmen aufrecht steht.

Der Teilstrich, bis zu welchem der Stiel einsinkt, zeigt ent-

weder die Dichtigkeit an, oder deren reziproken Wert, das spezifische Volumen, oder den Gehalt einer bestimmten Lösung, oder endlich sogenannte „Dichtigkeitsgrade".

Bei Baumé z. B. bedeutet	0°	13°	24°	34°	42°	49° etc.
das spezifische Gewicht	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

Die Ablesung des Aräometers geschieht an der Oberfläche durch die Flüssigkeit hindurch, indem man das Auge so hält, daß die Fläche als Linie verkürzt erscheint. Das Aräometer soll in Wasser von der Temperatur t die Zahl angeben, welche laut Tab. 4 zu t gehört. Man prüft andere Punkte der Skale in Flüssigkeiten von anderweitig ermitteltem spez. Gewicht. Eine große Genauigkeit wird durch die Ablesefehler und die Kapillarität verhindert.

6. Hydrometer.

Die Höhen zweier Flüssigkeitssäulen, welche sich in kommunizierenden Röhren das Gleichgewicht halten, stehen im umgekehrten Verhältnis der Dichtigkeiten. Über Kapillaritäts-Fehler oder Korrektionen s. **58** I. — Vgl. auch **44** IV 4.

Gehalt einer Lösung aus ihrem sp. Gewicht. S. hierüber **9** 4.

B. Für feste Körper.

Allgemeine Bemerkung. Dem untergetauchten Körper anhaftende Luftbläschen sind bei größeren Stücken durch wiederholtes Herausziehen oder mit dem Pinsel, bei kleinen durch Schütteln oder Auskochen oder mit der Luftpumpe zu beseitigen.

1. Wägung und Volumausmessung.

Haben m gr des Körpers das Volumen v ccm, so ist die Dichtigkeit $s = m/v$. Die Ausmessung kann bei regelmäßiger Gestalt des Körpers mit dem Maßstabe geschehen. Ein Cylinder (Draht) von der Länge l und dem Halbmesser r hat das Volumen $l \cdot r^2\pi$, eine Kugel $\frac{4}{3}r^3\pi$ etc.

Bei unregelmäßiger Gestalt mißt man das Volumen, um welches eine in einer kalibrierten Röhre enthaltene Flüssigkeit durch das Hineinwerfen des Körpers ansteigt. Besonders auch auf zerkleinerte Substanzen ist die Methode anwendbar. Für in Wasser lösliche Substanzen dienen z. B. Alkohol, Petroleum, Toluol oder auch eine gesättigte Lösung der Substanz. — Auch kann man den Körper in ein ganz gefülltes Gefäß mit

gut definiertem Ausguß bringen und das Volumen der ausfließenden Menge, z. B. als Gewicht durch sp. Gewicht, bestimmen.

2. Pyknometer (s. Fig. Nr. 2 u. 3, S. 67).

Dasselbe wiege mit Wasser gefüllt P, mit Wasser und dem Körper P', während der Körper selbst m wiege. Dann berechnet sich die verdrängte Wassermenge $w = P + m - P'$ und $s = m/w$. Besonders bei kleinen Körpern wird das Verfahren gebraucht, doch sind alsdann auch möglichst kleine Fläschchen anzuwenden, bei denen man sich überzeugt hat, daß sie, wiederholt mit Wasser gefüllt, nach Anbringung der Temperaturkorrektion hinreichend konstante Füllungen enthalten. Wenn die Temperatur beider Füllungen verschieden ist, so hat man (**16** II) die Füllung mit Wasser allein (Temp. $= t_0$) auf die andere Temperatur t umzurechnen. Dies geschieht bezüglich der Ausdehnung des Wassers durch Addition von $W(Q - Q_0)$, wenn Q und Q_0 die Dichtigkeiten des Wassers bei t und t_0 bedeuten (Tab. 4) und bezüglich des Glases durch Addition von $W \cdot 3\beta(t - t_0)$, wenn 3β den Volum-Ausdehnungskoeffizienten des Glases und W das Nettogewicht der ganzen Wasserfüllung bedeutet; das letztere braucht nur genähert bekannt zu sein.

Hat das Pyknometer kein Thermometer, so nimmt man entweder die Temperatur der Spritzflasche, oder man füllt zunächst nur so weit, daß man ein kleines Thermometer einführen kann. Demnächst füllt man den kleinen Rest auf und setzt den durch Aussaugen von Tropfen befreiten, mit einer unwägbaren Spur von Fett eingeriebenen Stöpsel rasch ein. Hat dieser eine hinreichende Wandstärke, so füllt er sich; man trocknet ausgespritzte Flüssigkeit sofort ab und tupft nötigenfalls mit einem Fließpapierspitzchen bis zur Marke aus. Spätere Temperaturänderungen sind gleichgültig, wenn sie nicht etwa ein Überfließen bewirken. Die Flüssigkeit soll also nicht viel kälter als die Zimmerluft sein.

3. Auftriebsmethode.

Wiegt der Körper in der Luft m, unter Wasser p, ist also der Auftrieb $w = m - p$, so ist $s = m/w$.

Mit der Wage. Man wägt den Körper für sich in Luft (m); dann, an einem dünnen fettfreien Faden oder Draht an einer

Wagschale aufgehängt (vgl. A 3) unter Wasser (p'). Das für sich bestimmte Drahtgewicht von p' abziehend erhält man p. Von dem hiermit berechneten Auftriebe ist nötigenfalls der Auftrieb des Drahtes abzuziehen, den man leicht schätzen kann, indem man aus dem Verhältnis der untergetauchten zur ganzen Länge das Gewicht des untergetauchten Drahtstückes berechnet; letzteres, dividiert durch die Dichtigkeit des Drahtes (Tab. 2), gibt seinen Gewichtsverlust im Wasser. — Ist der Draht oder ein Körbchen, welches den Körper bei der Wägung aufnimmt, von vornherein konstant untertauchend angehängt, so genügt es, ihn ein für allemal zu tarieren und nicht weiter zu berücksichtigen.

Bei der Wägung im Wasser nehmen die Schwingungen der Wage rasch ab; man wird meistens in der Ruhe beobachten müssen. — Der Aufhängefaden soll dünn sein und durch die Oberfläche nur einmal hindurchtreten, um die Kapillarkräfte möglichst zu vermindern; vgl. auch A 3. Das Wasser soll nahe Zimmertemperatur haben, oder man muß besonders geschützte Bäder anwenden. Im geschlossenen Wagekasten ist ein Thermometer von beistehender Form bequem.

In Wasser lösliche Körper wägt man in einer anderen Flüssigkeit von bekannter Dichtigkeit. Mit letzterer ist dann das wie oben berechnete Resultat zu multiplizieren.

Spezifisch leichte Körper werden durch Verbindung mit einem anderen von hinreichendem Gewicht zum Untersinken gezwungen; z. B. mit einer Metallklemme oder einer Glocke von Drahtnetz, unter welcher man den Körper aufsteigen läßt. Der Belastungskörper kann bei allen Wägungen im Wasser bleiben.

Zerkleinerte Körper legt man in ein Schälchen, welches unter Wasser hängt und tariert ist.

Kann man einen Körper nicht an die Wagschale hängen, so läßt sich vielleicht ein Gefäß mit Wasser auf die Wage stellen und seine Gewichtszunahme bestimmen, wenn der mit einem Faden an einem festen Stativ aufgehängte Körper untergetaucht wird. Diese Zunahme ist gleich dem scheinbaren Gewichtsverlust des Körpers im Wasser.

Nicholson'sche Senkwage. Man belastet die obere Schale des Schwimmers, jedesmal bis zu dessen Einsinken bis an die

Marke am Halse: 1) bloß durch Gewichte (P); 2) durch Körper und Gewichte (P'); 3) durch Gewichte, während zugleich der Körper unter Wasser auf der unteren Schale liegt (P''). Dann gibt $P - P' = m$ das Gewicht des Körpers, $P'' - P' = w$ das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers, und m/w wieder die Dichtigkeit des Körpers. — Temperaturschwankungen beeinträchtigen die Genauigkeit; um so mehr, je kleiner der Körper gegen die Senkwage ist. — Die Sicherheit der Einstellung wird durch Reinigen des Halses mit Weingeist erhöht.

Jolly'sche Federwage. Ein spiraliger Draht trägt zwei Wagschalen übereinander, von denen die untere konstant in ein verstellbares Gefäß mit Wasser taucht. Abgelesen wird eine unten am Spiraldrahte angebrachte Marke vor einer Teilung auf Spiegelglas (um die Parallaxe zu vermeiden). 0,1 mm läßt sich noch schätzen. Mit einem Gewichtsatz kann man genau wie an der Senkwage beobachten, indem man die Marke stets auf einen bestimmten Teilstrich bringt.

Ein einfacheres Wägungsprinzip mit der Federwage ist auch ohne Gewichtsatz dadurch gegeben, daß die Senkung h dem angehängten Gewichte p nahe proportional ist, wonach $p = A \cdot h$. Durch eine einmalige Belastung mit einem bekannten Gewicht kann der Faktor A bestimmt werden. — Da bei Dichtebestimmungen die Gewichtseinheit sich heraushebt, so kann man hier einfach den Skalenteil der Federwage als Einheit nehmen. Senkt sich die Wage durch Auflegen des Körpers auf die obere Schale um h, dagegen um h', wenn der Körper unter Wasser auf die untere Schale gelegt wird, so ist also $s = h/(h - h')$.

Genauer setzt man $p = Ah + Bh^2$. Man bestimmt A und B aus zwei Belastungen, deren eine etwa die größte anzuwendende Senkung bewirke, während die andere halb so groß sein mag. Hiernach läßt sich eine Tabelle aufstellen, welche zu den Senkungen die zugehörigen Belastungen angibt.

Federwagen werden bekanntlich in mannigfacher Form gebraucht; die einfachste sehr empfindliche Wage für kleine Gewichte ist z. B. ein am einen Ende befestigter horizontaler elastischer dünner Faden (Quarz, Stahl), dessen freies Ende mikroskopisch abgelesen wird. Salvioni, Beibl. 1902, 231. Auch die Torsion gespannter Drähte ist brauchbar.

4. Schwebemethode.

Sehr kleine, selbst pulverförmige Körper lassen sich bestimmen, indem man eine Flüssigkeit mischt, in welcher die Körper weder sinken noch steigen. Geeignet können Mischungen von Chloroform (1,52) oder Bromoform (2,9) oder Methylenjodid (3,3) mit Benzol (0,89), Toluol (0,89), Xylol (0,87), Acetylentetrabromid (3,0) oder wässerige Lösungen von Kaliumquecksilberjodid (Thoulet'sche Lösung; bis 3,20) sein. — Durch partielles Abdestillieren zerlegt man die Flüssigkeiten nachher wieder.

Zur genauen Abgleichung korrigiert man zweckmäßig etwa eine noch ein wenig zu leichte mit einer etwas zu schweren Mischung. Auch können zum letzten Ausgleich Temperaturänderungen dienen, da die Flüssigkeiten sich stark, die festen Körper sich schwach ausdehnen. — Anhängende Luft ist, wenn nötig mit der Luftpumpe, sorgfältig zu beseitigen.

Die Dichtigkeit der Flüssigkeit ermittelt man am einfachsten mit der Mohr'schen Wage, während die Körper schweben.

Vgl. auch Retgers, ZS f. phys. Ch. 11, 328. 1893.

16. Reduktion einer Dichtigkeitsbestimmung auf den leeren Raum und auf Wasser von 4°.

Von einem sp. Gewicht wird häufig die dritte, nicht selten aber auch die vierte Dezimale verlangt. Dann muß erstens der Auftrieb berücksichtigt werden, den der Körper in der Luft erfährt, und zweitens der Umstand, daß man in der Regel mit Wasser von anderer Temperatur als 4° arbeitet.

I. Reduktion auf den leeren Raum und auf Wasser von 4°.

Für flüssige wie für feste Körper gelten bei den in **15** angegebenen Methoden, sowohl unter A wie unter B, folgende Korrektionen:

a) Bei Nr. 1 sind die gefundenen Gewichte, wenn die Genauigkeit es fordert, auf den leeren Raum zu reduzieren (**13** II; Tab. 1). Hieraus leitet sich die einfache Vorschrift ab: jedes spez. Gewicht, welches aus der Abwägung eines bekannten Volumens in Luft mit richtigen Messinggewichten ohne Rücksicht auf Luftauftrieb berechnet wurde, ist um $0{,}0012\ (1 - 1/8{,}4) = 0{,}00106$ zu vergrößern. Vgl. **13, 23** und Tab. 1.

b) Bei den pyknometrischen und Auftriebsmethoden unter Nr. 2 und 3 werde zunächst zum Überfluß darauf hingewiesen,

daß von den Gewichtstücken nur ihre relative Richtigkeit in Luft verlangt wird; ein Umrechnen auf absolute Richtigkeit oder das Vakuum ist vollkommen zwecklos. Alle gefundenen Dichten sind nach folgender gemeinschaftlicher Regel auf Wasser von 4° und auf den leeren Raum zu reduzieren. Es bedeute:

Q die Dichtigkeit des Wassers, welches zur Beobachtung gedient hat (Tab. 4);

λ die Dichtigkeit der Luft, bezogen auf Wasser (der Mittelwert $\lambda = 0{,}00120$ genügt fast immer; andernfalls vgl. **18** u. Tab. 6);

m das scheinbare, unter Nr. 2 und 3 je so bezeichnete Gewicht, wie es sich aus den Wägungen in Luft ergeben hat;

w das scheinbare Gewicht des dem Volumen des Körpers gleichen Volumens Wasser von der Dichtigkeit Q.

Die Größe w kann also bedeuten:

1. für Flüssigkeiten: das beobachtete Gewicht des Wassers im Pyknometer, oder des von dem Glaskörper verdrängten Wassers;

2. für feste Körper: den beobachteten Gewichtsverlust des Körpers im Wasser bei einer nach dem Archimedischen Gesetz ausgeführten Bestimmung; oder das Gewicht des durch Einbringen des Körpers ausgeflossenen Wassers bei Anwendung des Pyknometers.

m/w ist das rohe unkorrigierte spezifische Gewicht. Das richtige ist

$$s = \frac{m}{w}(Q - \lambda) + \lambda \quad \text{oder auch} \quad = \frac{m}{w} Q + \left(1 - \frac{m}{w}\right)\lambda. \qquad 1.$$

Bei der Mohr'schen Wage ist Q die Dichtigkeit desjenigen Wassers, in welchem der Glaskörper den großen Reiter äquilibriert, also bei richtig auf 4° abgeglichenem Glaskörper $Q=1$; m/w bedeutet die Ablesung an der Wage.

Vgl. über die Rechnung auch die folgende Seite, und über ihre Vereinfachung, falls man denselben Glaskörper oder dasselbe Pyknometer wiederholt benutzt, III.

Strenge Rechnungsweisen mit Rücksicht auf die Schwankungen der Luftdichte finden sich in R. Kohlrausch, prakt. Regeln zur genauen Best. d. spez. Gewichtes. Marburg 1856.

Formel 1 korrigiert also jeden nach Nr. 2 und 3 in **15** A oder B bestimmten Wert auf den leeren Raum und Wasser von 4°.

Beweis. Wenn der Körper, fest oder flüssig, in der Luft das Gewicht m zeigt, während er die Luftmenge l verdrängt, so wiegt er im leeren Raume $m + l$. — Bezüglich der Bestimmung von w können drei

Fälle unterschieden werden. 1. Hat man das Gewicht w des gleichen Volumens Wasser mit dem Pyknometer bestimmt, so wiegt das Wasser im leeren Raume $w + l$; 2. wenn der scheinbare Gewichtsverlust w eines festen Körpers durch Eintauchen in Wasser gemessen wurde, so ist w ebenfalls um l zu vermehren, da das Gewicht des Körpers im leeren Raume um l größer gewesen wäre; 3. ebenso ist, wenn eine Flüssigkeit dadurch bestimmt wird, daß man den scheinbaren Gewichtsverlust eines und desselben Körpers in der Flüssigkeit und im Wasser ermittelt, jeder Verlust um l zu vergrößern.

In allen Fällen wäre mithin das sp. Gew. $= (m + l)/(w + l)$, wenn das Wasser die Dichtigkeit Eins (4°) gehabt hätte. Statt dessen hatte es aber nur die Dicht. Q, mit welcher folglich das bisherige Resultat zu multiplizieren ist. Also wird $s = (m + l)\,Q/(w + l)$. Da nun $(w + l)/Q$ das Volumen der verdrängten Luft bedeutet, welche das sp. Gew. λ hat, so ist $l = \lambda(w + l)/Q$, woraus $l = w\lambda/(Q - \lambda)$. Den letzteren Wert für l in s eingesetzt, erhält man die Gleichung 1.

Beispiel. Ein Stück Silber wiege in der Luft . . . $m = 24{,}312$ gr
in Wasser von 19,4° . . . . . 21,916 gr
also ist der scheinbare Gewichtsverlust im Wasser $w = 2{,}396$ gr

Das unkorrigierte spezifische Gewicht ist hiernach

$$m/w = 24{,}312/2{,}396 = 10{,}147.$$

Das korrigierte erhält man, da nach Tab. 4 für 19,4° $Q = 0{,}99835$ ist,

$$s = 10{,}147\,(0{,}99835 - 0{,}00120) + 0{,}0012 = 10{,}119.$$

Man rechnet im Kopf, wenn man $0{,}99835 - 0{,}00120 = 1 - 0{,}00285$ setzt.

Wie die zweite Form von Gl. 1 zeigt, verschwindet der Einfluß des Luftauftriebes nur, wenn die Dichtigkeit nahe gleich 1 ist (er wird also klein bei verdünnten wässrigen Lösungen). Er erreicht für $s = 20$ den Wert 0,023. Würde man noch die Ausdehnung des Wassers vernachlässigen, so könnte hier ein um 0,08 zu großes Resultat entstehen.

II. Korrektionen für das Pyknometer bez. den Glaskörper wegen Temperaturschwankungen.

Hier ist neben dem vorigen noch folgendes zu berücksichtigen.

Die Wägung mit bez. im Wasser sei bei der Temp. t_0 ausgeführt und habe das scheinbare Nettogewicht bez. den Auftrieb w_0 ergeben. Man sucht aber die entsprechende Größe (w) für die, häufig von t_0 verschiedene Temperatur t, bei der die Wägung mit bez. in der zu bestimmenden Flüssigkeit (oder etwa nach Einbringen eines festen Körpers ins Pyknometer) angestellt wurde. Die Dichtigkeit des Wassers bei t_0 und t sei Q_0 und Q; der kubische Ausdehnungskoeffizient des Gefäßes oder des Senkkörpers (1/40000 für mittleres Glas) heiße 3β. Dann ist $w = w_0\,[1 + 3\beta(t - t_0)]\,Q/Q_0$, oder auch genau genug $w = w_0 + w_0\,[(Q - Q_0) + 3\beta(t - t_0)]$. 2.

Denn man kann schreiben $\dfrac{Q}{Q_0} = \dfrac{1 - (1 - Q)}{1 - (1 - Q_0)} = 1 + (Q - Q_0)$ (vgl. Formel 8 S. 9) und $(Q - Q_0) \cdot 3\beta(t - t_0)$ verschwindet gegen 1.

Das w aus Formel 2 ist in Formel 1 S. 75 einzusetzen.

Oberhalb 4° ist natürlich $Q - Q_0$ negativ, wenn $t > t_0$ ist. — Der ganze in steile Klammern gesetzte Ausdruck läßt sich für gewöhnliches Glas aus Tab. 4, zweiter Teil, als die Differenz der für t_0 und t gegebenen Zahlen entnehmen, wobei die für t geltende von der für t_0 geltenden abzuziehen ist.

Besonders bei der Dichtebestimmung fester Körper mit einem relativ großen Pyknometer dürfen diese Korrektionen nicht übersehen werden.

III. Zusammenfassung aller Korrektionen bei wiederholtem Gebrauch desselben Pyknometers oder Glaskörpers.

Es sei das scheinbare Gewicht der Pyknometerfüllung mit Wasser oder der scheinbare Auftrieb des Glaskörpers im Wasser bei t_0 gleich w_0 bestimmt worden. Man stelle den Ausdruck

$$W = w_0 \frac{1 + 3\beta(t - t_0)}{Q_0 - 0{,}00120}$$

über die in Betracht kommende Temperaturstrecke als Funktion von t in einer Tabelle oder Kurve dar. Für eine bei t ausgeführte Bestimmung entnimmt man hieraus den Wert W und berechnet nun das (natürlich für t geltende) spez. Gewicht s, wenn m das scheinbare Gewicht der Flüssigkeitsfüllung oder den scheinbaren Auftrieb in der Flüssigkeit bedeutet,

$$s = \frac{m}{W} + 0{,}00120.$$

Beweis durch Vereinigung der Formeln 1 u. 2 S. 75 u. 76.

IV. Reduktion auf eine Normaltemperatur.

s gilt für die Wägungstemperatur t. Für einen festen Körper ist t seine Temperatur im Wasser.

Hieraus wird die Dichtigkeit s' bei einer anderen Temperatur t' mit Hilfe des kubischen Ausdehnungskoeffizienten α (oder 3β; Tab. 11 u. 12) gefunden $s' = s[1 + \alpha(t - t')]$.

Für größere Temperatur-Intervalle muß die Ausdehnung der Flüssigkeiten aus Formeln oder aus Tabellen entnommen werden. Die Volumina derselben Flüssigkeitsmenge seien für die Temperaturen t' und t gleich v' und v angegeben; dann ist $s' = s \cdot v/v'$.

Vgl. Tab. 3a, 3b u. 12; Gerlach, Salzlösungen; Bender, Wied. Ann. 22, 179. 1884; 31, 872. 1887; Forch, Wied. Ann. 55, 100. 1895; Landolt-Börnstein-Meyerhoffer, Tab. 94 ff.

17. Volumenometer (Say, Kopp).

Das Instrument dient für Körper, die nicht in eine Flüssigkeit kommen dürfen. Angewendet wird das Boyle-Mariotte'sche Gesetz (**18**), wonach bei ungeänderter Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen einer Luftmasse konstant ist.

Eine konstante Luftmenge ist über Quecksilber abgesperrt, zunächst unter dem Druck H mm Quecksilber (meist dem atmo-

sphärischen Barometerstand); ihr Volumen in diesem Zustande heiße V. Um V zu ermitteln, vergrößere bez. verkleinere man es um eine gemessene Größe v und beobachte die dabei stattfindende Druckänderung h mm Quecksilber, dann ist $VH = (V \pm v) \cdot (H \mp h)$, also

$$V = v\,\frac{H-h}{h} \text{ bez.} = v\,\frac{H+h}{h}.$$

Nachdem so das Volumen des leeren Gefäßes gemessen worden ist, bringt man den Körper hinein und verfährt ebenso. Die Differenz der gefundenen Werte gibt das Volumen des Körpers.

v und h dürfen nicht zu klein sein, wenn ein brauchbares Resultat entstehen soll. — Man vermeide Temperaturänderungen der abgeschlossenen Luftmenge durch die Nähe des Körpers usw. während des Versuches.

Von besonderen Formen s. u. a.: an die Form von Say angeschlossen Guglielmo, Atti d. Lincei 12[2], 617. 1903; — dem Jolly'schen Luftthermometer ähnlich angeordnet Paalzow, Wied. Ann. 13, 332. 1881; — in einfacherer Anordnung Oberbeck, ib. 67, 209. 1899. — Ein Instrument, welches den Körper mit einer gewissen Luftmenge in eine Barometerleere aufnimmt, schon für kleine Mengen brauchbar, bei Zehnder, Ann. d. Phys. 10, 40. 1903, und für hohe Temperaturen ib. 15, 328. 1904.

18. Umrechnung der Zustände von Gasen. Berechnung der Dichtigkeit der Luft oder eines anderen Gases.

1. Gesetz von Boyle u. Mariotte; 1662 u. 1679. Bei konstanter Temperatur ist die Dichtigkeit s eines Gases seinem Drucke (Spannung; Tension) p proportional oder das Volumen v dem Drucke umgekehrt; also

$$s : s' = p : p' \quad \text{und} \quad v : v' = p' : p \quad \text{oder} \quad vp = \text{Const.}$$

2. Gesetz von Gay-Lussac; 1802. Bei konstantem Druck dehnt sich ein Gas für jeden Grad Temperaturerhöhung um gleich viel aus, nämlich um $\alpha = 0{,}00367$ oder $1/273$ des Volumens v_0, welches ihm bei 0^0 zukommt[1]). Also gilt

$$v = v_0(1 + 0{,}00367\,t) = v_0\left(1 + \tfrac{1}{273}t\right) \quad \text{oder} \quad = \tfrac{1}{273}v_0(273 + t).$$

$273 + t$, d. h. die Temperatur auf der Centesimalskale, aber von -273^0C als Nullpunkt gezählt, mit anderen Worten, wenn man an den Eispunkt statt 0 die Zahl $+273$ schreibt, heißt die absolute Temperatur T.

---

1) Genauer ist $0{,}00367 = 1/272{,}5$. — Unter gewöhnlichen Verhältnissen haben die meisten Gase etwas mehr als 0,00367, Wasserstoff etwas weniger. — Vgl. auch **42** u. Tab. 12a.

3. Kombination der Gesetze von Boyle (Mariotte) und Gay-Lussac: Zusammengehörige Volumina v, Dichtigkeiten s, Drucke p und Temperaturen t einer bestimmten Gasmasse sind hiernach verbunden, außer durch $vs = \text{Const.}$, durch die Beziehungen

$$\frac{pv}{1+0{,}00367\,t} = \text{Const.} \quad \text{oder} \quad \frac{pv}{T} = \text{Const.} \quad \text{oder} \quad \frac{p}{sT} = \text{Const.}$$

Für die Gasmenge 1 gr bezeichnet man, das Volumen in ccm, den Druck in Atmosphären gemessen,

$$\frac{pv}{T} = R$$

und nennt R die Konstante des betr. Gases (z. B. Luft, $p = 1$ Atm., $T = 273°$, $v = 1/0{,}001293 = 773$, also $R = 773/273 = 2{,}83$). — Schreibt man die Gleichung, auf 1 Gr.-Molekül (1 „Mol") bezogen, $pv/T = R_0$ so hat, nach dem Avogadro'schen Gesetz, R_0 für alle Gase denselben Zahlenwert und heißt allgemeine Gaskonstante; z. B. aus Sauerstoff (O_2) berechnet, für 1 Atm. und $T = 273°$ $v = 32/0{,}001429 = 22390$, mithin $R_0 = 22390/273 = 82{,}0$. — Über die Werte im CGS-System vgl. Anh. 9a.

Nach obigem wird also aus einem, durch die zusammengehörenden bekannten Werte s_0, v_0, p_0, t_0 definierten Zustande eines Gases für einen anderen Zustand s, v, p, t abgeleitet, wenn $\alpha = 0{,}00367$ oder $\frac{1}{273}$ ist:

$$s = s_0 \frac{1+\alpha t_0}{1+\alpha t} \frac{p}{p_0} \qquad v = v_0 \frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_0} \frac{p_0}{p} \qquad p = p_0 \frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_0} \frac{v_0}{v}$$

oder endlich

$$\frac{v}{v_0}\frac{p}{p_0} = \frac{273+t}{273+t_0} = \frac{T}{T_0}; \qquad \frac{vp}{T} = \text{Const.}$$

Abweichungen. Diese Gesetze sind in Wirklichkeit nicht streng erfüllt, besonders bei den leichter kondensierbaren Gasen, die im allgemeinen etwas größere Ausdehnungen zeigen; der wirkliche Druck (Spannung) wird mit sinkender Temperatur und meist ebenso mit steigender Dichtigkeit kleiner als der berechnete. Man unterscheidet wohl den Temperaturkoeffizienten der Ausdehnung bei konstantem Druck und den der Spannung bei konstantem Volumen. Vgl. noch **42** und Tab. 12a.

Grundzahlen für den vollkommenen Gaszustand. Vgl. D. Berthelot, ZS f. Elektroch. 1904, 621. Kritische Reduktion der Beobachtungen gibt für ein vollkommenes Gas $\alpha = 0{,}003662$, somit als absoluten Nullpunkt der thermodynamischen Temperaturskale (vgl. Anh. 9b) $-1/0{,}003662 = -273{,}1°$ C. — Sauerstoff (O_2), wenn er vom idealen verdünnten Zustande bis 0° und 1 Atm. die Gasgesetze genau befolgen würde, hätte daselbst das sp. Gew. 0,0014279 (statt 0,001429 wirklich), also die auf Luft bezogene „Dampfdichte" 0,0014279/0,001293 = 1,1043. — Im idealen Gaszustande kommt somit nach dem vorigen jedem Gr.-Molekül bei 0° und 1 Atm. das Volumen $32/0{,}0014279 = 22410$ ccm oder 22,41 Liter zu, also bei $t°$ und p Atm. $22{,}41(1+0{,}003662\,t)/p$ Liter.

Van der Waals'sche Zustandsgleichung. Die Abweichungen vom idealen Gaszustand, in Verbindung mit den Zuständen, welche ein Gas bei seiner Verflüssigung durch großen Druck und niedrige Temperatur

durchläuft, und mit dem „kritischen Zustand" lassen sich nahe zusammenfassen, indem man

$$\text{anstatt } \frac{pv}{T} = R \text{ schreibt } \frac{1}{T}\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R.$$

Die Korrektionszahlen a und b sind Konstanten der einzelnen Gase. Vgl. hierüber und über abgeänderte Zustandsformeln, besonders von Clausius, z. B. Graetz, Winkelm. Hdb. (2) III, 1135. 1906; Chwolson, Physik III, 798 ff.

Hat ein Gas die Dichtigkeit (sp. Gew.) s_0 für 0^0 und 760 mm Quecksilberdruck, so ist für t^0 und p mm, wenn $\alpha = 0{,}00367$,

$$s = s_0 \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{p}{760}.$$

Trockne atmosphärische Luft von einem Kohlensäuregehalte von 0,06 Volumprozenten hat bei 0^0 und 760 mm Hg (0^0) die Dichtigkeit (das sp. Gewicht) $\lambda_0 = 0{,}0012932$, also bei t und dem auf 0^0 reduzierten Quecksilberdruck p mm (vgl. **36** u. **37**)

$$\lambda = \frac{0{,}0012932}{1 + \alpha t} \cdot \frac{p}{760} \qquad 1.$$

Man findet diese Größe in Tab. 6. — Das sp. Gew. s eines anderen Gases für p und t wird man oft am einfachsten aus seiner auf Luft bezogenen Gasdichte d (Tab. 12a) als $s = \lambda d$ berechnen.

Über die genauere chem. Zusammensetzung der Luft vgl. Tab. 6.

Dalton'sches Gesetz. Eine Flüssigkeit verdampft in einen, mit einem Gase erfüllten Raum bezüglich Dampfmenge und Dampfdruck nahe bis zu ihrem, für das Vakuum geltenden Sättigungszustande. Der Gesamtdruck im Raume ist gleich der Summe der Partialdrucke.

Ist ein Gasvolumen v über einer Flüssigkeit (z. B. Wasser) gemessen, mit deren Dämpfen der Raum v gesättigt ist, so gilt also in den vorigen Formeln als zu v gehörender Druck des trockenen Gases der Gesamtdruck minus Sättigungs-Dampfspannung der Flüssigkeit. Für Wasser vgl. Tab. 13. — Zu beachten sind etwaige Absorptionsvorgänge und chemische Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit und Gas.

Dichtigkeit feuchter Luft. Die feuchte atmosphärische Luft kann bis zu 1% leichter sein, als cet. par. trockene Luft. Nun ist Wasserdampf nahe $\frac{5}{8}$ so dicht wie Luft von gleichem Druck und gleicher Temperatur. Man findet also die Dichtigkeit feuchter Luft, wenn die Spannkraft (der Druck) des Wasserdampfes in derselben $= e$ ist (**47**), indem man $\frac{3}{8}\,e$ von dem gesamten Druck (z. B. Barometerstand) abzieht und mit dem so korrigierten Werte p in Tab. 6 oder Formel 1 eingeht.

Unter der Annahme, daß die Luft mit Wasserdampf halb gesättigt sei, kann man für Zimmertemperatur nahe so rechnen,

daß man für p den ganzen Druck nimmt, aber nunmehr rechnet:

$$\lambda = \frac{0{,}001295}{1 + 0{,}004t} \cdot \frac{p}{760}. \qquad 2.$$

Die größten relativen Abweichungen vom Werte Gl. 1 mögen im Freien etwa $\pm \frac{1}{3000}$ betragen. Im Zimmer treten Schwankungen durch den Kohlensäuregehalt hinzu, die $\frac{1}{1000}$ betragen können, also bei feinen Bestimmungen zu beachten sind.

Die Ausdrücke $1 + 0{,}00367t$ und $p/760$ s. in Tab. 7.

18a. Eudiometer (Volta).

Dieses dient zunächst zur Sauerstoffbestimmung der Luft. Ein einseitig geschlossenes starkes Glasrohr ist sowohl nach Volumen wie nach Länge geteilt. Zwei nahe dem geschlossenen Ende eingeschmolzene Platindrähte lassen ein brennbares Gasgemisch durch einen elektrischen Funken (Elektrisiermaschine, Elektrophor, Induktorium) entzünden.

Das Eudiometer wird, luftfrei mit Quecksilber gefüllt, über Quecksilber umgestürzt, dann die zu analysierende Luft trocken eingeleitet und ihr Volumen v_1, Druck p_1 (Barometerstand minus gehobene Quecksilberhöhe) und Temperatur t_1 gemessen. Man fügt trockenen Wasserstoff (8, 3) im Überschuß gegen den Sauerstoff hinzu und bestimmt die jetzigen Größen v_2, p_2 und t_2.

Man preßt das Rohr auf einen am Boden der Wanne befestigten Kork, läßt einige Funken durchschlagen und mißt dann, nach Ablösen vom Korke, v_3, p_3 und t_3.

Das in der Volumeinheit enthaltene Sauerstoffvolumen berechnet sich, wenn die drei Temperaturen gleich sind, zu

$$\frac{1}{3} \frac{v_2 p_2 - v_3 (p_3 - e)}{v_1 p_1},$$

wo e die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfs bei t_3 bedeutet (Tab. 13). — Wechselte die Temperatur, so ist jedes vp, bez. $v_3 (p_3 - e)$ durch sein $1 + \alpha t$ zu dividieren.

Beweise einfach aus **18**.

Genaueres und eudiometrische Methoden für andere Gase s. Bunsen, gasometrische Methoden; Hempel, gasanalytische Methoden, 3. Aufl. 1900.

19. Bestimmung der Dampfdichte.

Ungesättigte Dämpfe folgen, mit den S. 79 besprochenen Abweichungen, den Gasgesetzen; alle Gase sind ja ungesättigte Dämpfe.

Dampfdichte d heißt in der Physik die Dichtigkeit eines Dampfes (Gases), bezogen auf trockne atmosphärische Luft von dem Druck und der Temperatur des Dampfes als Einheit.

Dampfdichtebestimmungen bezwecken meist die Ermittelung von Molekulargewichten auf Grund des Avogadro'schen Gesetzes, nach welchem gleiche Volumina aller Gase bei gl. Druck und gl. Temperatur die nämliche Anzahl von Molekülen enthalten, mit anderen Worten, wonach das Mol.-G. eines Dampfes seiner D.-D. proportional ist.

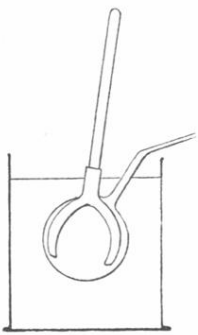
Für die Chemie ist es am übersichtlichsten, die D.-D.-Zahlen, anstatt auf Luft, auf ein fingiertes Normalgas zu beziehen, dessen Mol.-G. = 1 ist; dann wird das Mol.-G. einfach der Dampfdichte gleich. Dieses Normalgas würde genau die halbe Dichte des Wasserstoffgases (H_2) haben, wenn das System der Atomgewichte auf H = 1 aufgebaut wäre. Wegen der analytischen Methoden wird jedoch O = 16,00 zugrunde gelegt, demnach hat jenes Normalgas 1/32 der D.-D. von Sauerstoff (O_2). Nun hat, auf Luft bezogen, idealer Sauerstoff die D.-D. 1,1043 (vgl. S. 79), das Normalgas also 1,1043/32 = 1/28,98.

Eine auf Luft bezogene D.-D. ist hiernach mit 28,98 (nahe 29) zu multiplizieren, um sie auf das chemische Normalgas zu beziehen, mit anderen Worten um das Mol.-G. des Dampfes zu erhalten. Umgekehrt gibt das Mol.-Gew., durch 28,98 geteilt, die D.-D. im vollkommenen Dampfzustande; z. B. für Wasser (H_2O) $(2 \cdot 1{,}008 + 16)/28{,}98 = 0{,}622$.

Bei manchen Dämpfen dissoziieren die Moleküle sich mit wachsender Temperatur allmählich; die gefundene Dampfdichte d wird dann kleiner als die aus dem Mol.-G. folgende d_0. Man nennt bei dem Zerfall in zwei Moleküle $\frac{d_0}{d} - 1$, bei dem Zerfall in n Moleküle $\left(\frac{d_0}{d} - 1\right) \cdot \frac{1}{n-1}$ den Dissoziationsgrad, d. h. das Verhältnis der Zahl der Moleküle, welche sich gespalten haben, zu der ursprünglichen Gesamtzahl.

A. Durch Wägung eines bekannten Dampfvolumens (Dumas 1827).

Ein leichter, $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{4}$ Liter fassender Glaskolben mit angeblasener Röhre, der eine Atmosphäre äußeren Überdrucks aushält (also keinen eingezogenen Boden haben soll), wird gut gereinigt und mittels Erwärmens und gleichzeitigen Aussaugens durch ein eingeführtes Röhrchen so getrocknet, daß nichts Dampfbildendes darin ist. Das Rohr wird dann in eine Spitze von etwa 1 qmm Öffnung ausgezogen und so gewogen. Nun bringt man einige Gramm der zu bestimmenden Flüssigkeit in den Kolben, dadurch daß man ihn erwärmt und die Flüssigkeit während des Abkühlens einsaugen läßt.



Der Kolben wird dann mit einem geeigneten Halter (z. B. Fig.) gefaßt und so in ein Bad gebracht, daß die offene Spitze herausragt; das Bad werde 10 bis 20° über den Siedepunkt der zu verdampfenden Flüssigkeit erhitzt. Ist alle Flüssigkeit verdampft, so schmelzt man den Ballon mit der Stichflamme vollständig zu,

am sichersten durch Abziehen der Spitze, und liest die Temperatur des Bades und den Barometerstand ab.

Nach dem Entfernen aus dem Bade läßt man, durch Umkehren des Kolbens, den in der Kälte sich verdichtenden Tropfen in die Spitze fließen und überzeugt sich, daß hier keine Luft eintritt. Darauf wird der abgekühlte und gut gereinigte Ballon, ev. nebst der abgezogenen Spitze, wieder gewogen, unter Beobachtung der Temperatur im Wagekasten und des Hygrometers sowie, falls ein größerer Zeitraum zwischen dem Zuschmelzen und der Wägung liegt, auch des Barometers.

Endlich hält man die Ballonspitze in vorher ausgekochtes oder unter der Luftpumpe luftfrei gemachtes Wasser [oder in Quecksilber], feilt sie an und bricht sie ab, worauf die Flüssigkeit in den Ballon steigt. Der gefüllte Ballon nebst der abgebrochenen Spitze wird wiederum gewogen, wozu eine gröbere Wage genügt.

Die Formeln gelten wesentlich auch für die Gasdichtebestimmung **20** A.

Das Gewicht des mit Luft, Dampf, Wasser [oder Quecksilber] gefüllten Ballons sei gleich m, m', M;

t und b bei dem Zuschmelzen Temperatur des Dampfes und Barometerstand;

t' und b' bei der Wägung des Dampfes Temperatur im Wagekasten und Barometerstand. Von b' (aber nicht von b) sei $\frac{3}{8}$ der Spannkraft e des Wasserdampfes (**47**) im Wagezimmer abgezogen (vgl. **18**);

λ' die Dichtigkeit der Luft, wie sie zu t', b' aus **18** oder aus Tab. 6 gefunden wird;

α $= 0{,}00367$ der Gas-Ausdehnungskoeffizient.

I. Die Dampfdichte ist, falls mit Wasser gewogen wurde,

$$d = \left(\frac{m'-m}{M-m}\,\frac{1}{\lambda'} + 1\right)\frac{b'}{b}\,\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

[Für Quecksilber $13{,}56/\lambda'$ anstatt $1/\lambda'$.]

Beweis. Bezeichnen D und L Dampf-, bez. Luftgewicht im Ballon, so ist offenbar $D - L = m' - m$, also $D = m' - m + L$. Die Dampfdichte d würde, wenn der Dampf wie die Luft t' und b' gehabt hätte, einfach dargestellt werden durch $d = D/L = (m' - m)/L + 1$, oder, da $L = \lambda'(M - m)$ ist, durch $d = \dfrac{m'-m}{M-m}\,\dfrac{1}{\lambda'} + 1$. Der Faktor hinter der Klammer kommt hinzu, da der Dampf nicht bei t' und b', sondern bei t und b abgesperrt wurde.

II. Genauere Formel: mit Rücksicht auf die Ausdehnung des Glases und des Wassers und auf den Gewichtsverlust des Wassers in der Luft. Es sei

Q die Dichtigkeit des zur Wägung angewandten Wassers (Tab. 4) [oder Quecksilbers Tab. 2 u. 12];

3β der kubische Ausdehnungskoeffizient des Glases $= 0{,}000025 = 1/40000$ (vgl. auch 8, 5); so ist

$$d = \left(\frac{m'-m}{M-m}\,\frac{Q-\lambda'}{\lambda'} + 1\right)[1 - 3\beta(t - t')]\,\frac{b'}{b}\,\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

Beweis ähnlich wie in **16.** — Der Dichtigkeitsunterschied des zurückgebliebenen Tropfens gegen das Wasser ist in der Formel vernachlässigt.

III. Wenn der Ballon sich nach Abbrechen der Spitze unter Wasser nicht ganz füllt, so hat der Dampf die Luft nicht vollständig verdrängt. Will man hierauf keine Rücksicht nehmen, so fülle man vor der Wägung vollständig mit der Spritzflasche und rechne nach den früheren Formeln. Andernfalls tauche man den Ballon nach dem Abbrechen der Spitze so weit ein, daß die innere und äußere Oberfläche gleich hoch steht, und wäge ihn so weit gefüllt (M'). Erst dann füllt man den Rest mit Flüssigkeit und führt die Wägung M aus. Dann ist

$$d = \frac{(m' - m)\,Q/\lambda' + M' - m'}{(M - m)\,\frac{b}{b'}\,\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}\,[1 + 3\beta(t - t')] - (M - M')}.$$

R. Kohlrausch, Prakt. Regeln z. Best. d. spez. Gewichtes. Marburg 1856.

Beweis. Das Volumen der Luftblase, bei der Temperatur der Füllung $= \frac{M - M'}{Q - \lambda'}$, war also bei dem Zuschmelzen $v = \frac{M - M'}{Q - \lambda'}\,\frac{b'}{b}\,\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}$. Der Ausdruck d unter II ist demnach die D.-D. eines Gemisches von v Luft und $V - v$ Dampf, und es ist, die Dichte des reinen Dampfes durch d_0 bezeichnet, $Vd = v + (V - v)d_0$, woraus $d_0 = (Vd - v)/(V - v)$.

Hierein den Wert für d unter II, den obigen Wert für v, endlich $V = (M - m)/(Q - \lambda') \cdot [1 + 3\beta(t - t')]$ eingesetzt, findet sich nach einigen Umformungen, zum Teil mittels der Formeln S. 9, der Ausdruck unter III.

Beispiel. Es wurde gefunden:

$m = 29{,}6861$ gr (Luft), $M = 142{,}41$ gr (ganz mit Wasser);
$m' = 29{,}8431$ gr (Dampf), $M' = 141{,}32$ gr (teilweise mit Wasser);

ferner $b = 745{,}6$ mm, $t = 99{,}5^0$ (beim Zuschmelzen);
$b' = 742{,}2$ mm; $e = 9{,}4$ mm $t' = 18{,}7^0$ (beim Wägen mit Dampf).

Das Wasser zur Wägung hatte $17{,}2^0$, also (Tab. 4) $Q = 0{,}9988$.

Man findet (**18**) $\lambda' = 0{,}001182$ ohne Rücksicht auf e,
$\lambda' = 0{,}001176$ mit „ „ „

Nach der richtigen Formel III erhält man die Dampfdichte 2,777; II ergibt 2,755, I 2,765. Durch Vernachlässigung von e würden diese Zahlen um 0,005 wachsen.

Die auf Sauerstoff $= 32$ bezogene Dampfdichte oder das Molekulargewicht des Dampfes ist also (wenn $O = 16$; vgl. S. 82) $2{,}777 \cdot 28{,}98 = 80{,}5$.

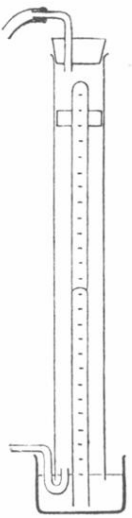
Den Ausdruck $1 + \alpha t$ siehe Tab. 7. Sonst rechnete man bequemer

$$\frac{273 + t'}{273 + t} \text{ statt } \frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}.$$

B. Durch Messung des Dampfvolumens einer gewogenen Flüssigkeitsmenge (Gay-Lussac 1812; Hofmann 1867).

Ein dünnwandiges Glaskügelchen, dessen Ansatzröhrchen man nach dem Füllen zuschmelzen oder, wenn es sehr fein ist, auch offen lassen kann, oder ein ganz kleines Fläschchen mit eingeriebenem Stöpsel, von

etwa $^1/_{10}$ bis $^1/_5$ ccm Inhalt, wird zuerst leer und dann mit der Substanz, deren Dampfdichte bestimmt werden soll, gewogen. Gläschen und Inhalt läßt man in einer mit trockenem und luftfreiem Quecksilber (**8**, 1) gefüllten und über Quecksilber umgestürzten Glasröhre aufsteigen, die von dem geschlossenen Ende an geteilt ist, entweder nach ccm oder einfach in mm, die nach **23** in Volumen verwandelt werden. Ist die Flüssigkeit leicht flüchtig, so kann das Gläschen schon während des Aufsteigens springen und durch das in das Vakuum geschleuderte Quecksilber das Rohr zertrümmern. Dies wird dadurch verhindert, daß man während des Aufsteigens die Glasröhre so weit neigt, daß das Quecksilber oben fest anliegt!



Nun umgibt man das Meßrohr mit dem Heizmantel (Fig.) und erwärmt durch einen geeigneten Dampfstrom zu einer Temperatur, die mindestens etwa 10° über derjenigen liegen soll, bei welcher die ganze Flüssigkeit gerade verdampft ist. Für nicht schwer flüchtige Körper genügt Wasserdampf. Es bedeute

m das Gewicht der verdampften Substanz in gr,

t, v Temperatur und Volumen des Dampfes in ccm; ist v_0 das Volumen der dampfgefüllten Glasröhre bei 18°, so ist $v = v_0[1 + 0{,}000025(t - 18)]$ zu setzen,

b den äußeren Barometerstand,

h die Höhe der Quecksilbersäule, über welcher der Dampf sich befindet; b und h auf 0° reduziert (**37**),

e die Dampfspannung des Quecksilbers bei $t°$ (Tab. 15); vgl. noch die Bemerkung unten.

Dann ist $$d = \frac{m}{v}\,\frac{760}{b-h-e}\,\frac{1+\alpha t}{0{,}001293}.$$

Denn m/v ist das auf Wasser bezogene sp. Gewicht des Dampfes. Um die auf Luft von gl. Temp. u. gl. Druck bezogene Dampfdichte d zu finden, hat man also m/v zu dividieren durch das zum Druck $p = b - h - e$ und zu t gehörige spez. Gewicht der Luft $\frac{b-h-e}{760}\,\frac{0{,}001293}{1+\alpha t}$.

Um die träge Bildung des schweren Quecksilberdampfes zu beschleunigen ist eine seitliche Ausbauchung des oberen Endes des Barometerrohres zweckmäßig, in welcher beim Umstürzen ein Quecksilbertropfen liegen bleibt (Ramsay u. Steele, l. c. unten).

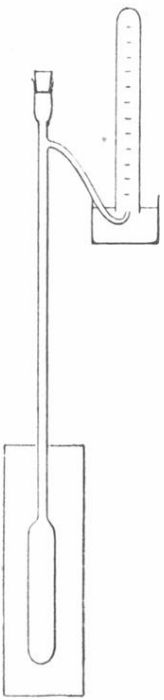
Genaue Bestimmungen. Um die Abweichung des Dampfes vom idealen (**18**) Gaszustand zu eliminieren, beobachtet man das Dampfvolumen v bei mehreren Drucken p. Der unvollkommene Gaszustand äußert sich darin, daß pv, anstatt konstant zu sein, mit abnehmendem Drucke etwas steigt. Man stellt nun pv über p als Abszisse graphisch dar (**6**) und extrapoliert die Kurve auf den Anfangspunkt ($p = 0$). Geradlinige Extrapolation aus zwei Werten genügt nach Reinganum im allgemeinen. — Vgl. be-

sonders Ramsay u. Steele, ZS f. physik. Ch. 44, 348. 1903, wo eine Anordnung für genaue Messungen beschrieben wird. Ferner Reinganum, 48, 697. 1904; Verh. D. Phys. Ges. 1905, 75.

Über ein instrumentell einfaches Verfahren, bei welchem anstatt des Volumens der Druck des Dampfes in einem geschlossenen Raum bestimmt wird, s. Blackman, ZS f. ph. Ch. 63, 48 u. 635. 1908.

C. Durch Luftverdrängung (V. Meyer 1878).

Das Dampfvolumen einer gewogenen kleinen Menge der Substanz wird aus der bei der Verdampfung verdrängten Luftmenge ermittelt.

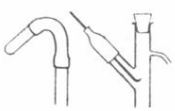


Ein Glas-, oder für hohe Temperatur Porzellan (Iridium, Zirkon)-Kölbchen mit Steigrohr und einem engen, etwa 1 mm weiten Gas-Entbindungsrohre (Fig.), gut ausgetrocknet, mit etwas Asbest am Boden, wird — im Luftbade, oder im Dampfbade von Wasser, Anilin (184°), Benzophenon (306°), Schwefel (445°)[1]), oder auch in Paraffin (bis über 300°), Salpetergemisch (230 bis 600°), Blei (über 330°) etc. (Tab. 11 u. 12; auch 8, 27) — verstöpselt auf die erforderliche Temperatur oberhalb des Siedepunktes der Substanz gebracht. Man wartet, bis die Temperatur konstant geworden ist, d. h. bis aus dem Entbindungsrohre unter Wasser keine Luftblasen mehr entweichen.

Die Substanz hat man, wenn nötig, in ein Körbchen oder Glasröhrchen, oder wenn sie flüssig ist, in ein Fläschchen oder ein ganz gefülltes, zugeschmolzenes Glaskügelchen (welches durch die Ausdehnung der Substanz springt) eingewogen. Man lüftet den Kork, wirft rasch die Substanz in den Kolben und schließt die Öffnung sofort wieder. Alsdann schiebt man über das Gasentbindungsrohr einen mit Wasser gefüllten Meßcylinder, fängt in ihm die Luft auf, welche durch die verdampfende Substanz verdrängt wird, und liest ihr Volumen v ab.

(Vor Abstellen der Heizung das Rohr aus dem Wasser nehmen oder den Kork lüften!)

Bequemer als der Kork, bei welchem man sehr rasch verfahren muß, ist ein über das Verdampfungsrohr gestülpter kurzer, gut schließender Kautschukschlauch, in den ein vorn zugeblasenes (Fig.) oder, damit man bei zufälliger Temperaturerniedrigung das Eintreten von Wasser in das Rohr vermeiden kann, durch einen Hahn verschließbares Glasröhrchen gesteckt ist. In das letztere hat man den einzuwerfenden Körper gebracht und läßt ihn im geeigneten Zeitpunkt durch Aufrichten des



1) Über Abhängigkeit vom Druck vgl. **40** im Eingang u. Tab. 12.

Röhrchens hinunterfallen. Oder man hält den Körper mit einem luftdicht von der Seite eingeführten Stäbchen, durch dessen Zurückziehen man ihn hinunterfallen läßt (zweite Fig.).

Es ist wesentlich, daß der Vorgang in kurzer Zeit verläuft, damit u. a. kein Dampf in die kälteren Teile des Rohres gelangt, wo er sich kondensiert und das Volumen zu klein finden läßt. Daher soll die Temperatur des Bades beträchtlich über dem Siedepunkte der Substanz liegen. (Länger dauernde Luftentbindung kann eine Zersetzung der Substanz anzeigen.) — Es sei

m die eingebrachte Substanzmenge in gr,

v in ccm das, bei der Temperatur t des Zimmers unter dem Drucke H mm Quecksilber von 0° gemessene Luftvolumen.

Dann ist die gesuchte Dampfdichte

$$d = \frac{m}{v}\,\frac{760}{H}\,\frac{1+0{,}004\,t}{0{,}001293} = 587800\,\frac{m}{Hv}\,(1+0{,}004\,t).$$

Der Dampf hat nämlich eine Luftmenge verdrängt, welche unter gleichen Verhältnissen das gleiche Volumen besaß. Folglich gibt das Dampfgewicht m, geteilt durch das Gewicht dieser Luftmenge, die gesuchte Dampfdichte. Die gemessene Luft aber wiegt $v\,\frac{0{,}001293\;\frac{H}{760}}{1+0{,}004\,t}$, wonach man den obigen Ausdruck erhält. Der Faktor 0,004 ist anstatt des Ausd.-Koeff. 0,00367 genommen, um der Luftfeuchtigkeit Rechnung zu tragen. Er entspricht in gewöhnlicher Temperatur ungefähr der Annahme, daß die Luft im Kolben zweidrittel gesättigt, diejenige, welche über dem Wasser gemessen wird, ganz gesättigt ist.

Der Druck H ist gleich dem Barometerstande b, vermindert um die in Quecksilber umgewandelte Druckhöhe h der Wassersäule unter der Luft: $H = b - \frac{1}{13{,}6}\,h$. Taucht man bei der Ablesung das Meßrohr bis zur Gleichstellung der inneren und äußeren Oberfläche in das Wasser, so ist $H = b$.

Behufs genauer Bestimmung und Rechnung hätte man noch das Volumen v' des etwa mit eingeworfenen Fläschchens zu berücksichtigen. War ferner der Kolben vorher mit trockener Luft gefüllt worden, so rechnet man hinreichend genau

$$d = \frac{587800}{v/(1+\alpha t) + v'/(1+\alpha t')}\,\frac{m}{H-e}.$$

e bedeutet die Spannkraft des Wasserdampfes bei der Temperatur t (Tab. 13), t' die Heiztemperatur des Bades, die nur genähert bekannt zu sein braucht. α ist $= 0{,}00367$.

Vgl. V. Meyer, Ber. D. Chem. Ges. 1878, S. 2253; 1879, 610 u. 1112.

Dissoziierte Dämpfe unterliegen der unter Umständen beträchtlichen Fehlerquelle, daß in dem Diffusionsgebiet gegen die Luft ihr Dissoziationsgrad, der mit verminderter Dichtigkeit des Dampfes wächst, ein anderer ist als in dem untersten Raume.

Über eine Anordnung, um mit vermindertem Druck zu arbeiten, s. z. B. Eijkmann, Ber. d. D. Ch. Ges. 1889, S. 2754; Lunge u. Neuberg, ib. 1891 S. 729. — Auch Erdmann, ZS f. anorg. Ch. 32, 425. 1902; nach vorgängiger Beobachtung an einem Körper von bekannter Dampfdichte wird nur das Ablesen einer Druckänderung erfordert. — Eine verwandte Methode auch bei Haupt, ZS f. physik. Ch. 48, 713. 1904. — Über Messungen in sehr hoher Temp. s. u. a. V. Meyer, pyrochem. Unters., Brschw. 1885; ZS f. ph. Ch. 1, 145. 1887; Nernst, ZS f. Elektroch. 1903, 622.

D. Durch Metallverdrängung.

Der verdampfende abgewogene Körper (vgl. B und C) verdrängt eine Flüssigkeit, welche selbst eine geringe Dampfspannung besitzt (in niederer Temperatur Quecksilber, Hofmann, vgl. Tab. 15; in höherer Temperatur Wood'sches Metall (**8**, 12a), V. Meyer, Ber. d. D. Chem. Ges. 1876, 1216; 1877, 2068). Es bedeute

m das Gewicht der verdampfenden Substanz,

M, s und M', s' das Gewicht bez. das sp. Gewicht des Metalls vor und bei der Verdrängung,

t die Zimmer-, ϑ die Bad-Temperatur (siedender Schwefel 445°),

β den Ausd.-Koeffizienten des Gefäßes,

b den Barometerstand,

h die Druckhöhe des flüssigen Metalls im anderen Schenkel.

Man berechnet die Dampfdichte

$$d = \frac{m}{\frac{M}{s}[1+3\beta(\vartheta-t)]-\frac{M'}{s'}} \cdot \frac{760(1+0{,}00367\vartheta)}{\left(b+\frac{hs'}{13{,}56}\right)0{,}001293}.$$

Den letzten Faktor siehe in Tab. 6. — Die sp. Gewichte sind bei t

für Quecksilber $13{,}60\,(1-0{,}00018t)$

für Wood'sches Metall $9{,}6\,\,(1-0{,}00009t)$.

E. Durch Absorption.

Das Gewicht eines bei bekanntem Druck und bekannter Temp. gemessenen Dampfvolumens wird bestimmt, indem man den Dampf von gekühlter Holzkohle (**8**, 24) absorbieren läßt. Dewar u. Jones, Proc. R. Soc. A 80, 229. 1908.

F. Aus der Schallgeschwindigkeit.

Vgl. hierüber **56** IV; über eine besondere Form Wachsmuth, Ann. d. Ph. Boltzmann-Band 923, 1904.

20. Gasdichte-Bestimmung.

Die Gasdichte soll, wie im vorigen die Dampfdichte, auf Luft von gl. Temp. u. gl. Druck bezogen werden. Für die Umrechnungen kommen die Gasgesetze von **18** in Betracht. — Über Herstellung einiger Gase und deren Trocknen s. **8**, 3.

A. Durch Wägung.

Um die Dichte eines permanenten Gases zu bestimmen, füllt man mit ihm einen Glasballon mit angeschmolzenem Glasrohr (am bequemsten mit Hahnverschluß), etwa indem man den Ballon zunächst mit Quecksilber füllt, ihn über einer Quecksilberwanne umstürzt und nun das Quecksilber durch das aufsteigende Gas verdrängen läßt. Der Ballon wird, wenn das Quecksilber innen und außen gleich hoch steht, d. h. unter Atmosphärendruck, geschlossen und gewogen (m'). Dann wird das Gas durch einen hinreichenden Luftstrom (Luft des Wagezimmers, nicht getrocknet) verdrängt und der Ballon offen gewogen (m). Endlich habe die Wägung mit Wasser [oder Quecksilber] das Gewicht M ergeben. Wie in **19** A sollen b und t den Barometerstand und die Temperatur im Augenblick des Abschließens des Gases bedeuten, t' und b' gelten für die Wägung des mit Gas gefüllten Ballons.

Die Gasdichte d berechnet sich nach der Formel I oder genauer II in **19** A.

Eine bei der Füllung etwa zurückgebliebene Quecksilbermenge läßt man bei allen Wägungen ungeändert.

Füllt und wägt man bei gleichen Tempp. und Drucken, so gilt bei Wasserfüllung

$$d = \frac{m' - m}{M - m} \frac{1}{\lambda} + 1 .$$

Atmosphärische Schwankungen lassen sich auch dadurch eliminieren, daß man als Hauptgegengewicht für den Ballon ein ebenso großes geschlossenes Gefäß nimmt; man vermeide dabei aber Überlegungsfehler.

Hält der Ballon einseitigen Atmosphärendruck aus, so kann er vor der Gasfüllung mit der Quecksilberluftpumpe (**8**, 24) evakuiert werden. Sein Volumen v bei der Gasfüllung habe sich durch Temperatur oder Luftdruckskompression (Rayleigh) bei der Leerwägung (m_0) in v_0, bei der Gaswägung (m') in v' geändert, dann ist

$$d = \frac{m' - m_0}{\lambda v} + \frac{\lambda'}{\lambda} \frac{v'}{v} - \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{v_0}{v} .$$

λ_0 und λ' bedeuten das spez. Gewicht der Luft bei der Leerwägung und der Gaswägung (**18**). λ gilt für trockene Luft bei dem Druck und der Temperatur des eingefüllten Gases; Tab. 6.

Verfügt man über eine hinreichend große Menge des Gases, so kann man auch ein Glaskölbchen mit zwei Ansatzrohren (oder das Pyknometer, vierte Fig. S. 67) verwenden, aus welchem man die Luft durch einen anhaltenden Gasstrom verdrängen läßt; ist das Gas schwerer als Luft, so füllt man durch das lange Rohr, und umgekehrt. — Für eine genäherte Bestimmung kann ein enghalsiges Fläschchen oder Kölbchen von 100 bis 200 ccm genügen. Je nachdem das Gas schwerer oder leichter ist als Luft, füllt man

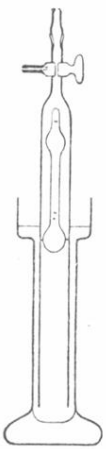
das aufrecht oder verkehrt stehende Fläschchen durch ein bis an den Boden reichendes enges Röhrchen und verschließt endlich, indem man das Rohr langsam herauszieht, mit einem Kautschukstöpselchen. Handerwärmung ist zu vermeiden, und wegen der Diffusion muß man nun rasch wägen. Über die Berechnung s. S. 83.

Über genauere Messungen s. besonders Regnault in Relat. des Exp. etc. I, oder Mém. de l'Acad. 21. 1847; Rayleigh, Proc. R. S. 53, 134. 1893; Morley, ZS f. phys. Ch. 20, 68. 1896; Leduc, Ann. chim. phys. (7) 15, 1. 1898; Guye, Arch. sc. ph. 24, 34. 1907.

Verdrängungsmethoden mit Titrieren, z. B. für Halogene, bei Vict. Meyer, Pyrochem. Unterss., Braunschw. 1885.

B. Aus der Ausströmezeit (Bunsen).

Gasdichten verhalten sich nahe umgekehrt wie die Quadrate der Ausströmungsgeschwindigkeiten, mit denen die Gase unter gleichem Druck aus enger Wandöffnung austreten. Vergleicht man also die Zeit, welcher eine bestimmte Gasmenge zum Ausströmen bedarf, mit der Zeit, welche ein gleiches Luftvolumen unter denselben Bedingungen braucht, so gibt das Zeitverhältnis, ins Quadrat erhoben, die Gasdichte.



Der Glascylinder (Fig.) mit Hahn, oben durch einen Schliff mit aufgeschmolzenem dünnen Blech mit ganz feiner Öffnung verschließbar, wird über Quecksilber (8, 1) mit trockener, durch ein Wattefilter staubfrei gemachter Luft, bez. mit dem zu bestimmenden Gas gefüllt. Fehlt die in der Figur hierfür vorgesehene Spitzenbohrung des Absperrhahnes, so benutzt man, nach Entfernung des Schliffes, die obere Öffnung. Das Gas wird durch einen angesetzten Kautschukschlauch eingeführt. Läßt der Cylinder sich bis an den Hahn in das Quecksilber eintauchen, so füllt man, während man den Cylinder langsam hebt. Andernfalls zieht man ihn so weit heraus, daß das Quecksilber seinen unteren Rand noch eben abschließt, und leitet nun das Gas so lange durch, bis es die Luft verdrängt hat, was aber ein unsicheres Verfahren ist, weil bei dem Entweichen der Gasblasen leicht etwas Luft in den Cylinder zurückschlägt.

Nun taucht man den Cylinder so tief, und zwar bei allen Versuchen gleich tief, in das Quecksilber ein, daß der Schwimmer (Fig.) unsichtbar wird, und öffnet den Hahn. Den Gasstand, welchen das undurchsichtige Quecksilber nicht direkt ablesen läßt, beobachtet man mittels des Schwimmers, der von dem Quecksilber im Cylinder getragen

wird und zwei gut sichtbare Marken hat, eine am oberen Ende, die andere einige cm über dem unteren Ende. Man beobachtet die Zeitpunkte, wann diese Marken eben aus der Quecksilberoberfläche austreten. Ein dicht über der unteren Marke befindliches Zeichen soll auf ihren Austritt vorbereiten.

Beispiel.	Luft	Kohlensäure
Austritt der oberen Marke um	14,3 sec	42,5 sec
„ „ unteren „ „	51,2 „	1 min. 27,8 „
Dauer =	36,9 sec	45,3 sec

Also Kohlensäure, auf Luft bezogen, $d = (45{,}3/36{,}9)^2 = 1{,}507$. Auf Sauerstoff = 32 bezogen, d. h. (vgl. S. 82) Molekulargewicht = $1{,}507 \cdot 28{,}98 = 43{,}7$ (statt $CO_2 = 44$ berechnet).

Akustische Methoden s. **56** IV.