

wird erleichtert durch Ansatzpunkte, welche durch irgend welche feste Körper, z. B. die Wände des Gefäßes, am besten aber durch einen Krystall derselben Art gebildet werden. Manchmal kann bei völliger Ruhe ohne passende Ansatzpunkte die Krystallbildung ganz verhindert werden: von essigsaurem oder schwefligsaurem Natron lässt sich z. B. eine heiss gesättigte Lösung abkühlen, ohne dass sie auskrystallisiert; wird sie dann aber erschüttert oder ein kleiner Krystall hineingeworfen, so verwandelt sich in wenigen Sekunden die ganze Flüssigkeit in einen Haufen von Krystallen. Eine solche Lösung nennt man übersättigt. Ebenso lässt sich Wasser im Vakuum bis weit unter 0° abkühlen, ohne zu erstarren, eine Erschütterung bringt es aber sofort zum Gefrieren; man spricht von überkältetem Wasser.

C. Gasförmige Körper.

§ 96. Gase haben mit den Flüssigkeiten die Eigenschaft gemein, dass sie einen geringen Widerstand gegen Formänderung haben; sie unterscheiden sich von jenen dadurch, dass sie auch einen kleinen Widerstand gegen Volumänderung haben. Man nennt sie daher auch wohl kompressible oder expansible Flüssigkeiten.

Die Gase sind der Schwere unterworfen. Das lässt sich leicht mit Hülfe der Wage nachweisen. Nehmen wir einen Ballon mit Hahn, aus welchem wir mit Hülfe der später (§ 107) zu beschreibenden Luftpumpen das Gas entfernen können, wiegen wir den Ballon mit irgend einem Gase gefüllt und ausgepumpt, so gibt die Gewichts-differenz das Gewicht des Gases. Bestimmen wir auch noch das Volumen des Ballons, indem wir ihn mit Wasser gefüllt wiegen, so können wir das Gewicht von 1 *ccm* des Gases, d. h. sein spezifisches Gewicht finden.

Die atmosphärische Luft ist kein einfaches Gas, sondern ein Gasgemisch; sie besteht aus 78 bis 78,5 Teilen Stickstoff, 20,5 bis 21 Teilen Sauerstoff, etwa 1 Teil Argon, daneben noch Spuren von Kohlensäure, Wasserdampf und anderen Verunreinigungen. Gewöhnlich wird die Dichte der Gase nicht auf Wasser bezogen, sondern auf Luft, d. h. es wird das Verhältnis zwischen dem spezifischen Gewicht des Gases und der Luft gegeben.

Das spezifische Gewicht einiger Gase bei 0° und unter dem

Druck einer Quecksilbersäule von 760 *mm*, d. h. unter einer Atmosphäre, gibt folgende Tabelle:

	bezogen auf Wasser	auf Luft
Luft	0,00129305	1
A	0,00178543	1,3808
O	0,00142908	1,10521
N	0,00125440	0,97010
H	0,00008952	0,06923
Cl	0,00316696	2,44921
CO ₂	0,00196503	1,51968
Wasserdampf	0,00080405	0,62182
SO ₂	0,00286146	2,21295

§ 97. Die Folgerungen, welche wir bei Flüssigkeiten aus der Beweglichkeit der Teilchen ziehen konnten, gelten in noch höherem Grade für die Gase. So folgt, dass auch in diesen in jeder Schicht der gleiche senkrecht gegen jede Oberfläche gerichtete Druck, ein hydrostatischer Druck, herrschen muss.

Für die Gase gilt daher auch das archimedische Prinzip, dass ein in ihnen befindlicher Körper so viel an Gewicht verliert, als das verdrängte Gas wiegt. Dies ist bei Wägungen zu berücksichtigen (§ 69). Ist der eingetauchte Körper leichter als das Gas, so erfährt er einen Auftrieb gleich der Gewichts-differenz zwischen Körper und verdrängtem Gas. Darauf beruhen die Luftballons. Füllen wir z. B. einen Ballon von 1000 *cbm* Inhalt mit Wasserstoff, so wiegt dasselbe 89,52 *kg* (1 *cbcm* wiegt 0,00008952 *g*, also 1 *l*: 0,00008952 *kg*, 1 *cbm* = 1000 *l*: 0,08952 *kg*); die verdrängten 1000 *cbm* Luft aber wiegen 1293,05 *kg*, also hat der Ballon einen Auftrieb von 1203 *kg*, so viel kann die Hülle und das angehängte Gewicht betragen.

Wir befinden uns an der Erdoberfläche am Boden eines tiefen Luftmeeres, welches durch sein Gewicht einen bestimmten Druck, den atmosphärischen Druck, hervorbringt. Beim Aufsteigen zu grösserer Höhe muss dieser Druck abnehmen, da die Höhe der drückenden Luftschicht abnimmt. Welche Höhe die Atmosphäre besitzt, ist nicht bekannt; es muss jedenfalls eine Grenze vorhanden sein, denn je höher wir steigen, desto kleiner wird die Schwere;

andererseits wächst, da die Atmosphäre an der Erdrotation teilnimmt, die Centrifugalkraft. In einer Entfernung von 6,6 Erdradien wären beide Kräfte gleich, darüber hinaus würden also die Luftteilchen in den Weltraum geschleudert. Man nimmt aber an, dass schon in viel geringerer Höhe, nämlich etwa 150 000 m, die Atmosphäre aufhört.

Trotz der Leichtigkeit der Luft ist wegen der Höhe der Luftsäule der Druck ein sehr bedeutender. Derselbe besteht auch in geschlossenen Räumen, da dieselben immer durch Ritzen und Poren mit der äusseren Atmosphäre kommunizieren und daher stets derselbe Druck herrschen muss wie in einer äusseren Schicht in gleicher Höhe. Der Luftdruck wird gemessen durch das Barometer, welches auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren (§ 66) beruht. Haben wir ein zweischenkeliges Rohr (Fig. 83) gefüllt mit irgend einer Flüssigkeit, die in den Schenkeln die Höhe h_1 und h_2 hat, so muss in einer gemeinsamen Ebene der gleiche Druck herrschen. Ist das spezifische Gewicht der Flüssigkeit s , und ist der Luftdruck auf beiden Flüssigkeitsoberflächen gleich und $= p$ pro Flächeninhalt, so ist $p + h_1 s = p + h_2 s$, d. h. $h_1 = h_2$.

Wenn wir nun aber auf der einen Seite den Luftdruck verringern, so muss hier die Flüssigkeit so hoch steigen, dass ihr Druck die Abnahme des Luftdruckes ersetzt; nehmen wir die Luft aus dem einen Schenkel ganz weg, so dass gar kein Druck auf der Flüssigkeit lastet, stellen wir also über dieser einen luftleeren Raum, ein Vakuum her, so ist $p + h_1 s = h_2 s$, $p = (h_2 - h_1) s$, d. h. die Differenz der Flüssigkeitssäulen übt den gleichen Druck aus wie die Atmosphäre.

Als Flüssigkeit nimmt man meist Quecksilber. Ein solches zweischenkeliges Rohr, welches an dem einen Ende zugeschmolzen ist (Fig. 84), nachdem die Luft daraus entfernt ist, heisst Heberbarometer. Wir brauchen aber kein zweischenkeliges Rohr: tauchen wir in ein flaches Gefäss mit Quecksilber (Fig. 85) eine oben offene Röhre, so steht (abgesehen von der Kapillarität) im Rohr und aussen das Quecksilber gleich hoch, da auch hier der Druck in einer gemeinsamen Ebene identisch sein muss. Saugen wir aber aus dem Rohr mit einer Luftpumpe die Luft aus, so steigt das Quecksilber, und ist die Luft ganz entfernt, so steht auch hier die Quecksilbersäule so hoch über dem äusseren Niveau, dass sie dem Atmosphärendruck das Gleichgewicht hält. Dieses Instrument heisst Gefässbarometer.

§ 98. Die Gefässbarometer sind zur Ableseung bequemer, aber ungenauer. Fig. 86 gibt die übliche Form. Nennen wir den Querschnitt des Rohres q , den des Gefässes Q . Wenn im Rohr sich das Quecksilber um a verschiebt, muss im Gefäss das Niveau

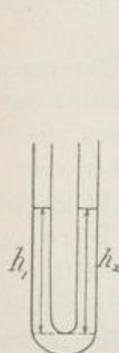


Fig. 83.

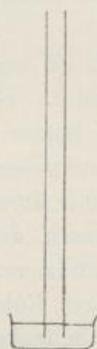


Fig. 84.



Fig. 85.

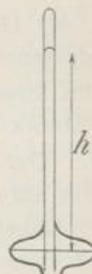


Fig. 86.

sich ebenfalls ändern, um A ; da das aus dem Rohr austretende Volum gleich dem ins Gefäss eintretenden ist, so ist $qa = QA$, oder $A = \frac{q}{Q}a$. Ist $a = 30 \text{ mm}$ — was ungefähr der grössten vorkommenden Abweichung von der Mittelstellung entspricht — und soll A nicht mehr als $0,1 \text{ mm}$ betragen, so muss $q = \frac{1}{300} Q$ sein.

Diese Bedingung ist nur selten erfüllt. Wenn daher der Nullpunkt der Skala, an welcher man die Höhe h abliest, fest auf die Mittelstellung des unteren Niveau eingestellt ist, wie das gewöhnlich der Fall ist, macht man durch die Schwankungen desselben beträchtliche Fehler. Es muss ferner der Einfluss der Kapillarität berücksichtigt werden, durch welchen die Höhe h verkleinert wird (§ 74). Gewöhnlich ist das gleich bei der Teilung mit berücksichtigt. — Die Bequemlichkeit des Gefässbarometers beruht darauf, dass man eben das untere Niveau als konstant betrachtet und daher mit einer Ableseung auskommt.

Bei den Heberbarometern verschieben sich, falls beide Schenkel wie gewöhnlich gleich weit sind, bei jeder Aenderung des Luftdruckes beide Niveaus um gleich viel nach entgegengesetzten Seiten. Zur Bestimmung der Höhendifferenz hat man folgende Methoden: Die Teilung geht von einem beliebig liegenden Nullpunkt nach unten und oben; man liest die Stellung beider Quecksilberkuppen

ab und addiert die Ablesungen. Noch häufiger ist entweder die Skala gegen das Barometerrohr oder das Rohr gegen die Skala verschiebbar; man bringt dann immer die untere Kuppe mit dem Nullpunkt der Teilung zur Koinzidenz, liest dann die Stellung der oberen Kuppe ab.

Sind an beiden Kuppen die Röhren gleich weit, so fällt hier der Kapillareinfluss fort, da er in beiden Schenkeln entgegengesetzt wirkt und sich aufhebt. Ganz ist das freilich doch nicht der Fall: die Kuppe im offenen Schenkel ist mit Luft in Berührung, wodurch sie sich oxydiert; dadurch ändert sich die Kapillardepression in unkontrollierbarer Weise. Man sucht sich zu helfen, indem man das Barometer vor dem Gebrauch etwas bewegt; dabei hängt sich das Oxyd zum Teil an die Glaswand und man erhält eine reinere Oberfläche. Noch besser nimmt man die Röhren so weit, dass die ganze Kapillardepression, also vollends ihre Aenderungen, ausser Betracht kommen.

Grundbedingung für richtige Angaben eines Barometers ist, dass in dem geschlossenen Schenkel gar keine Luft, sondern ein vollkommenes Vakuum vorhanden ist; man erreicht dies bei Herstellung des Barometers durch Auskochen des Quecksilbers. Die neueren wissenschaftlichen Barometer, z. B. das von Wild, gestatten, das Vakuum in dieser Hinsicht zu kontrollieren.

Das Barometer misst den Druck der Luft durch den Druck einer Quecksilberhöhe; deren Druck aber hängt ab von der Temperatur, da die Dichte des Quecksilbers sich mit dieser ändert. Man ist übereingekommen, den Druck durch eine Quecksilbersäule von 0° Celsius zu messen. Quecksilber dehnt sich pro Grad C. um 0,00018 aus. Eine Säule von 0° mit der Länge b hat daher bei der Temperatur t° die Länge

$$B = b + b \cdot 0,00018 \cdot t = b (1 + 0,00018 t).$$

Also die Ablesung B bei t° entspricht dem wahren Druck

$$b = \frac{B}{1 + 0,00018 t}.$$

§ 99. Beobachtet man den Barometerstand zu verschiedenen Zeiten, so findet man, dass er im Meeresniveau unter der Breite von 45° um 760 mm schwankt. Der Luftdruck auf den Quadratcentimeter ist daher gleich dem Druck einer Quecksilbersäule von

1 *qcm* Querschnitt, 76 *cm* Länge, d. h. gleich dem Gewicht von 76 *cbcm* Quecksilber; da das spezifische Gewicht des Hg = 13,5959, so ist also der Druck = $76 \times 13,5959 \text{ g} = 1,0333 \text{ kg}$. Der Druck auf das Quadratmeter beträgt 10332,88 *kg*.

Wir haben gesehen, dass in einem zweischenkeligen Rohre, aus dessen einem Schenkel der Luftdruck beseitigt ist, die Gleichung besteht $p = (h_2 - h_1) s$. Die Höhendifferenz wird also eine andere sein, wenn wir statt Quecksilber eine andere Flüssigkeit nehmen, die Drucksäulen werden umgekehrt den spezifischen Gewichten sein. Wasser z. B. wird in einem Rohr, aus welchem man oben die Luft absaugt, durch den Luftdruck bis zur Höhe: $13,5959 \times 76 \text{ cm} = 10,33 \text{ m}$ hinaufgetrieben werden. Der Umstand, dass in einer Pumpe in Florenz im Jahre 1643 das Wasser nicht höher angesaugt werden konnte, wurde die Veranlassung, dass Torricelli die Existenz des Luftdruckes erkannte.

§ 100. In neuerer Zeit hat man eine ganz andere Art von Apparaten konstruiert, um den Luftdruck zu messen, die sog. Aneroidbarometer. Hier wird der Luftdruck durch die Spannung einer Feder äquilibriert. Fig. 87 gibt das Prinzip des Apparates: A ist eine flache kreisförmige Metallkapsel, wie eine runde Schachtel; Boden und Deckel sind aus gewelltem Blech hergestellt, um sie möglichst leicht verbiegen zu können. Die eine Wand ist mittelst des Stabes B mit dem festen Gestell D verbunden. Die Kapsel ist vor dem Zulöten luftleer gemacht, der Luftdruck sucht sie daher zusammenzupressen; dies wird dadurch verhindert, dass an der gegenüberliegenden Seite, in E, eine starke Spiralfeder C angreift,

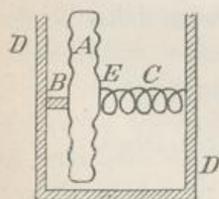


Fig. 87.

deren anderes Ende auch am Gestell sitzt. Die Spannung der Feder und der auf die Kapsel wirkende Luftdruck halten sich in jedem Augenblick das Gleichgewicht; wächst der Luftdruck, so wird die Kapsel etwas mehr zusammengedrückt, so weit, bis die vermehrte Spannung der Feder ihm wieder das Gleichgewicht hält; sinkt der Druck, so zieht die Feder die Kapsel wieder aus einander. Wie man sieht, wird der Punkt E kleine Bewegungen vor- und rückwärts ausführen; dieselben werden dann durch Hebel oder Zahnräder vergrößert auf einen Zeiger übertragen, dessen Stellung den Luftdruck ergibt.

Diese Instrumente sind nicht so zuverlässig wie die Quecksilberbarometer wegen der Wirkung der Wärme auf die Elastizität und wegen der elastischen Nachwirkung. Sie sind aber sehr wertvoll, weil sie leicht transportabel sind — man baut sie in der Grösse von Taschenuhren —, und wie wir sehen werden, bedingt die Höhenmessung auf Reisen das Mitführen von Barometern, was bei der Zerbrechlichkeit und Schwere der Quecksilberbarometer früher sehr beschwerlich war.

§ 101. Beobachtet man das Barometer fortdauernd an demselben Orte, so zeigen sich Schwankungen, theils solche, welche mit der Tages- und Jahreszeit zusammenhängen, also einen regelmässigen Verlauf haben, theils solche, welche ganz regellos stattfinden und durch die atmosphärischen Umstände bedingt sind, nämlich Windrichtung, Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt. Die warmen feuchten Winde sind leichter, kalte trockene schwerer, und so entspricht meist hohem Barometerstand gutes, niedrigem schlechtes Wetter. Verbindet man die Orte, welche gleichzeitig denselben Barometerstand haben, auf einer Karte durch Linien, so entstehen mehr oder weniger geschlossene Kurven, die Isobaren, welche die Stelle des barometrischen Minimums konzentrisch umgeben. Nach dem Minimum strömen von allen Seiten die Winde, wenn auch wegen Drehung der Erde nicht in radialen, sondern spiralförmigen Bahnen. Das Minimum zieht langsam auf ziemlich konstanten Wegen von Westen nach Osten; eine solche Bahn geht z. B. durch Südengland, Dänemark, die Ostsee; durch die Stellung dieses Minimums ist hauptsächlich Windrichtung und Wetter in Deutschland bedingt.

Die unregelmässigen Schwankungen des Barometers können 30—40 *mm* betragen, die periodischen dagegen sind sehr klein. Der Barometerstand ist im Winter höher, als im Sommer, und täglich ist er am höchsten morgens und gleich nach Sonnenuntergang. Das arithmetische Mittel aus allen Barometerständen des Jahres wird der mittlere Barometerstand des Ortes genannt. Er ändert sich von Ort zu Ort mit der geographischen Lage in noch unbekannter Weise und mit der Höhe: für etwa je 10 *m* Erhebung sinkt der Druck um 1 *mm* (§ 105).

§ 102. Der Luftdruck wird im täglichen Leben viel benutzt; es seien folgende Apparate genannt:

1. Die Heber: Füllen wir ein U-förmig gebogenes Rohr mit Flüssigkeit und tauchen das eine Ende in ein gefülltes Gefäss (Fig. 88), so herrscht in der freien Oberfläche a und an der Mündung b Atmosphärendruck. Gehen wir von diesen beiden Stellen in den Schenkeln des Hebers aufwärts, so nimmt links bis zu der beiden Schenkeln gemeinsamen Ebene cc der Druck ab um die Drucksäule $ac = h$, rechts um die Drucksäule $bc = h_1$. Sobald h nicht $= h_1$, ist in cc der Druck ungleich und die Flüssigkeit wird

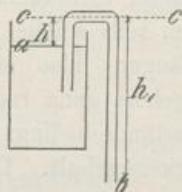


Fig. 88.



Fig. 89.

von der Stelle grösseren Drucks herüberfliessen mit einer Geschwindigkeit, welche von der Druckdifferenz abhängt. Ist $h_1 > h$, d. h. liegt die Mündung des Hebers unter dem Niveau, so fliesst die Flüssigkeit oben nach rechts und fliesst bei b aus. So werden die Heber vielfach gebraucht, um Flüssigkeiten überzufüllen.

2. Der Stechheber (Pipette), welcher dazu dient, Flüssigkeitsproben aus einem grösseren Gefäss zu entnehmen. Er ist ein unten in eine offene Spitze auslaufendes Gefäss (Fig. 89) mit so kleiner oberer Oeffnung, dass man dieselbe mit dem Daumen verschliessen kann. Taucht man die Spitze etwa in das Spundloch eines Fasses, so füllt sich das Gefäss zum Teil mit Flüssigkeit; schliesst man dann die Oeffnung mit dem Finger und hebt den Stechheber aus dem Fass, so wird durch den Luftdruck das Ausfliessen der in ihm befindlichen Flüssigkeit verhindert.

3. Die Mariottesche Flasche dient dazu, in ein Gefäss aus welchem Flüssigkeit langsam abfliesst, so viel zufließen zu lassen, dass das Niveau konstant bleibt. Durch den Stöpsel einer Flasche werden zwei Röhren gesteckt, von welchen die eine (Fig. 90), a, nur wenig in die Flasche hineinragt, aber aussen etwas länger ist, während die andere, b, bis auf den Boden der Flasche reicht, aussen dafür etwas kürzer ist. Die Flasche wird gefüllt umgekehrt,

so dass beide Röhrenden in das konstant zu haltende Niveau tauchen. Die Flüssigkeit kann nicht aus der Flasche fließen, weil keine Luft eindringen kann; sobald aber das Niveau so weit gesunken ist, dass die Mündung von *b* frei wird, tritt eine Luftblase ein, wofür eine an Volum gleiche Menge Flüssigkeit ausfließt. Dadurch wird das Niveau erhöht, *b* wieder geschlossen u. s. w. Diese Einrichtung fand sich z. B. an vielen Oellampen.

4. Die Pumpen: In Fig. 91 stelle *A* das Rohr einer gewöhnlichen Pumpe vor, deren unteres Ende im Wasser steht. Bei *B* ist das Rohr durch ein Ventil versperrt, d. h. durch eine Klappe, welche das Rohr ganz dicht schliesst, welche sich aber bei Druck

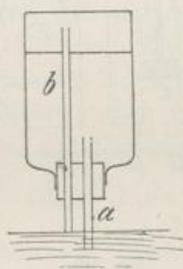


Fig. 90.

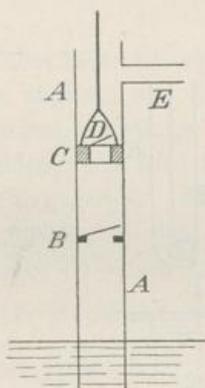


Fig. 91.

von einer Seite öffnet. *B* öffnet sich nach oben. In *A* verschiebt sich dicht anschliessend der Stempel *C*, der beim Pumpen auf und ab bewegt wird. Er ist in der Mitte durchbohrt, die Oeffnung aber durch das auch nach oben schlagende Ventil *D* geschlossen. Heben wir nun *C*, so entsteht zwischen *B* und *C*, da der Raum vergrössert wird, eine Luftverdünnung, der Luftdruck sinkt; daher wird das Ventil *D* fest zugedrückt durch den äusseren Luftdruck, *B* aber aufgedrückt. Es tritt also Luft durch das Ventil nach oben, die Luft in der Pumpe unter *B* wird verdünnt, daher presst der aussen auf dem Wasserniveau ruhende Luftdruck das Wasser in der Pumpe in die Höhe. Bewegen wir den Stempel zurück nach unten, so schliesst sich *B*; dann wird die Luft zwischen *B* und *D* verdichtet, sie öffnet *D* und tritt über *D*. Heben wir wieder

C, so schliesst sich D, B öffnet sich, das Wasser wird höher gesaugt u. s. w. Schliesslich tritt das Wasser durch D nach oben, wird durch den Stempel gehoben und fliesst bei E aus. Wenn die Pumpe wirken soll, darf die Entfernung zwischen dem Wasserniveau und der tiefsten Stellung des Stempels nicht mehr als 10 m betragen (§ 99). Soll daher Wasser höher gehoben werden, so ist eine solche sog. Saugpumpe nicht brauchbar, man benutzt dann Druckpumpen. Fig. 92 gibt die Einrichtung einer solchen: A ist wieder das Pumpenrohr, B das untere Ventil. Der Stempel C ist undurchbohrt, dagegen ist ein Seitenrohr E angesetzt, welches durch das nach aussen (vom Pumpenrohr) schlagende Ventil D abgesperrt wird. Heben wir C, so wird erst Luft, dann Wasser über D ge-

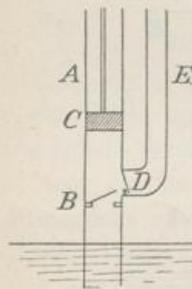


Fig. 92.

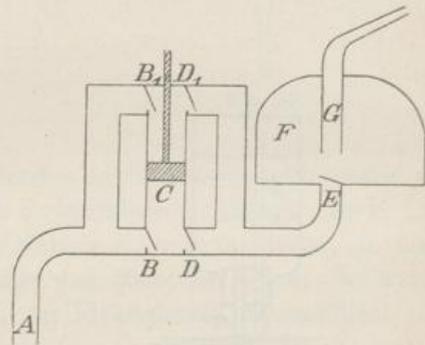


Fig. 93.

saugt; beim Senken von C schliesst sich B, dafür öffnet sich D, und das Wasser wird in das Rohr E gepresst. Hier kann es beliebig hoch gehoben werden, es muss nur C mit dem genügenden Druck heruntergepresst werden.

Die Einrichtung der Druckpumpe findet sich auch bei der Feuerspritze mit noch einigen Nebenteilen. Das Wasser wird nämlich durch die Druckpumpe nur stossweise, beim Senken des Stempels, herausgetrieben; um dies zu vermeiden und einen kontinuierlichen Strahl zu erhalten, wird ein sog. Windkessel eingeschaltet. Fig. 93 stellt eine Spritze mit doppelt wirkender Pumpe dar; A ist das ins Wasser ragende Rohr, welches durch zwei Ventile, B und B₁, mit dem Pumpenrohr in Verbindung tritt, in welchem sich der Stempel C bewegt; aus dem Pumpenrohr wird das Wasser durch zwei Ventile D und D₁ in den Windkessel F

getrieben, an dessen Boden ebenfalls ein Ventil E sitzt. Beim Heben von C wird darunter der Druck verringert, D schliesst sich, B öffnet sich und Wasser tritt ein; darüber wird der Druck vermehrt, B₁ schliesst sich, D₁ öffnet sich und Wasser wird in den Windkessel getrieben. Beim Senken von C ist das Spiel der Ventile ein umgekehrtes, D₁ und B schliessen sich, während durch B₁ Wasser angesaugt, durch D herausgepresst wird. Der Windkessel enthält Luft, welche durch das eingetriebene Wasser zusammengedrückt wird, und nun ihrerseits das Wasser durch das Rohr G heraustribt. Da das Luftvolumen im Windkessel gross ist, ändert sich sein Druck durch das jedesmal hineingetriebene Wasser nur wenig, so dass aus dem Windkessel das Wasser unter ziemlich konstantem Druck ausgetrieben wird.

§ 103. Die Gase bieten einer Volumänderung einen kleinen Widerstand dar. Das Gesetz, welches angibt, wie das Volumen einer Gasmasse sich mit dem Druck ändert, wurde im Jahre 1662 von Boyle, 1679 von Mariotte gefunden, und wird in Deutschland mit Unrecht Mariottesches Gesetz genannt. Es sagt aus, dass das Volumen stets umgekehrt proportional dem Druck ist. Sind also bei den Drucken p und p_1 die Volumina v und v_1 , so ist $\frac{v}{v_1} = \frac{p_1}{p}$ oder $vp = v_1p_1$, d. h. das Produkt aus Druck und Volumen ist konstant. Da bei jedem Körper die Dichte umgekehrt proportional dem Volumen ist (§ 67), so erhalten wir auch $\frac{v}{v_1} = \frac{d_1}{d} = \frac{p_1}{p}$, d. h. die Dichte des Gases ändert sich proportional dem Druck.

Das Gesetz ist nur angenähert richtig, wie zuerst Pouillet genauer nachwies. Ausführliche Versuche sind von Regnault angestellt worden. Die folgende Tabelle gibt für einige Gase die Resultate. Nennen wir das Volumen einer Gasmasse unter dem Druck von 1 *m* Quecksilber 1, so sollte zur Herstellung des Volumens $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ u. s. w. der Druck von 2 *m*, 4 *m* u. s. w. nötig sein; statt dessen fanden sich folgende Drucke:

Volum	Druck in Metern Quecksilber			
	Luft	N	CO ₂	H
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$\frac{1}{2}$	1,9978	1,9986	1,9829	2,0011
$\frac{1}{4}$	3,9874	3,9919	3,8973	4,0068
$\frac{1}{8}$	7,9456	7,9641	7,5193	8,0339
$\frac{1}{10}$	9,9162	9,9435	9,2262	10,0560
$\frac{1}{20}$	19,7198	19,7885	16,7054	20,2687

Diese Zahlen zeigen, dass die drei ersten Gase leichter kompressibel sind, als das Mariottesche Gesetz angibt, und ebenso verhalten sich alle übrigen Gase. Nur Wasserstoff verhält sich anders, er ist schwerer komprimierbar.

In neuerer Zeit sind die Versuche bis zu viel höheren Drucken, 3000 Atmosphären, und bei verschiedenen Temperaturen von Amagat fortgeführt worden: er fand folgendes:

1. Die Kompressibilität des Wasserstoffes ist bei allen Temperaturen geringer, als das Mariottesche Gesetz verlangt, und nimmt mit steigendem Druck ab, so dass z. B. bei 3000 Atmosphären das Volumen dreimal so gross ist, als es nach Mariotte sein sollte.

2. Die Gase, welche bei der herrschenden Temperatur durch Druck nicht zu verflüssigen sind, verhalten sich bei hoher Temperatur ganz wie Wasserstoff. Bei niedriger Temperatur aber sind sie anfangs stärker kompressibel, als das Gesetz aussagt; bei wachsendem Druck nimmt die Abweichung zu, erreicht ein Maximum, nimmt dann wieder ab, wird 0, worauf sich das Gas wie Wasserstoff verhält.

3. Die Gase, die bei der vorhandenen Temperatur verflüssigt werden können, werden bei zunehmendem Druck immer stärker kompressibel, bis sie sich in Flüssigkeit verwandeln.

§ 104. Auf der Kenntnis des Mariotteschen Gesetzes beruhen Apparate, welche zur Messung von Drucken benutzt werden, die

Manometer: an ein oben geschlossenes Glasrohr A (Fig. 94) ist unten ein weiterer Teil B angesetzt, welcher durch das Rohr C mit dem Raum in Verbindung steht, dessen Luft- oder Dampfdruck gemessen werden soll. A ist mit Luft oder Stickstoff von Atmosphärendruck gefüllt, B mit Quecksilber. Der Druck von C

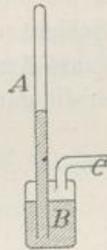


Fig. 94.

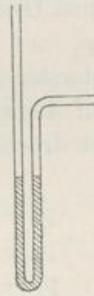


Fig. 95.

aus treibt das Quecksilber in A in die Höhe, wodurch die Luft komprimiert wird; aus ihrem Volumen kann man den Druck ermitteln. Ist dasselbe $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$. . . geworden, so beträgt der Druck 2, 3 . . . Atmosphären. Eine entsprechende Teilung ist an A angebracht.

Man hat noch eine andere Art Manometer, sog. offene Manometer, bei welchen der Druck direkt durch eine Quecksilbersäule gemessen wird. Eine lange U-förmig gebogene Glasröhre (Fig. 95) kommuniziert einerseits mit dem Raum, dessen Druck zu messen ist, andererseits mit der Atmosphäre. Das Rohr enthält unten Quecksilber: die Niveaudifferenz in beiden Schenkeln gibt die Differenz des zu messenden Druckes gegen den herrschenden Atmosphärendruck an.

§ 105. Wir können nun die barometrische Höhenmessung besprechen. Wir haben gesehen, dass die Atmosphäre einen hydrostatischen Druck ausübt, welcher nach oben abnehmen muss, da die drückende Luftsäule niedriger wird. Es handelt sich darum, das Gesetz der Druckabnahme mit der Höhe zu kennen, dann kann man das Barometer zur Höhenmessung benutzen.

In Flüssigkeiten ist der Druck proportional der Tiefe unter dem freien Niveau, da die Flüssigkeiten inkompressibel sind, und

daher jede Schicht von der Einheit der Dicke denselben Druck hinzufügt. Bei Gasen aber, die kompressibel sind, sind die unteren Schichten dichter, üben daher grösseren Druck aus, als die oberen.

Wir denken uns die Atmosphäre in horizontale Schichten von gleicher Höhe h geteilt, welche so gering sei, dass wir innerhalb jeder Schicht den Druck und die Dichte als konstant betrachten können. Druck und Dichte in der untersten Schicht seien p_0 und d_0 , in der zweiten p_1 und d_1 u. s. w. Dann ist die Druckdifferenz zwischen der untersten und der zweiten Schicht dadurch hervorgerufen, dass auf die zweite Schicht die ganze Atmosphäre ausser der ersten Schicht drückt, auf die erste aber die ganze Atmosphäre. Folglich ist

$$\begin{aligned} p_0 - p_1 &= h d_0 \text{ und ebenso} \\ p_1 - p_2 &= h d_1 \\ p_2 - p_3 &= h d_2 \text{ u. s. w.} \end{aligned}$$

Nach dem Mariotteschen Gesetz ist aber

$$\frac{d_0}{p_0} = \frac{d_1}{p_1} = \frac{d_2}{p_2} \dots = A,$$

wo A eine Konstante bedeutet. Dividieren wir daher obige Gleichungen durch p_0, p_1, p_2 u. s. w., so erhalten wir

$$1 - \frac{p_1}{p_0} = h \frac{d_0}{p_0} = A h; \quad 1 - \frac{p_2}{p_1} = A h; \quad 1 - \frac{p_3}{p_2} = A h \dots$$

$$\text{also } \frac{p_1}{p_0} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} \dots$$

Setzen wir nun $\frac{p_1}{p_0} = k$, wo k ein echter Bruch, dessen Grösse von der Höhe der Schichten abhängt, so ist

$p_1 = k p_0; p_2 = k p_1 = k^2 p_0; p_3 = k p_2 = k^3 p_0; \dots p_n = k^n p_0;$
d. h. wenn die Höhen in arithmetischer Progression wachsen, nehmen die Drucke in geometrischer Progression ab.

Wollen wir die Höhe h finden, für welche der Druck um 1 mm Quecksilber abnimmt, so ist

$$p_0 - p_1 = 1 \text{ mm} = d_0 h, \quad h = \frac{1 \text{ mm Quecksilber}}{d_0}$$

Nun ist 1 mm Hg = 13,59 mm Wasser, d_0 , bezogen auf Wasser, = 0,001293, also $h = \frac{13,59 \text{ mm}}{0,001293} = 10,51 \text{ m.}$ (Genauer ist wegen der Aenderung der Temperatur mit der Höhe 10,43 m.)

Nehmen wir in obiger Rechnung etwa Schichten von dieser Höhe, $h = 10,43 \text{ m}$, so wäre $p_0 = 760$, $p_1 = 759$, also $k = \frac{759}{760}$. Will man dann aus obiger Formel die Höhe finden, in welcher der Druck $p_x = \frac{1}{2}$ Atmosphäre = 380 mm , so ergibt sich die Zahl x der Schichten, um die wir dazu aufsteigen müssen, aus $p_x = k^x p_0$:

$$p_x = 380 = \left(\frac{759}{760}\right)^x 760 \text{ oder } \frac{1}{2} = \left(\frac{759}{760}\right)^x, x = \frac{\log \frac{1}{2}}{\log \left(\frac{759}{760}\right)}$$

$x = 528$, d. h. in der Höhe $528 \times 10,43 \text{ m}$, also etwa in 5500 m ist der Luftdruck nur noch $\frac{1}{2}$ Atmosphäre. Die Formel ist übrigens nur angenähert richtig, da wir nicht die Abnahme der Temperatur mit der Höhe berücksichtigt haben.

§ 106. Einer der wichtigsten Apparate für Gase ist die Luftpumpe, welche von Otto von Guericke 1650 zuerst konstruiert worden ist. Sie ist im wesentlichen ebenso eingerichtet wie die Saugpumpe, nur dass der Stempel besser schliessen muss und an Stelle der Ventile Hähne treten. Es sei hier gleich eine Pumpe neuerer Konstruktion, eine sog. zweistiefelige Luftpumpe beschrieben.

In zwei gut cylindrisch ausgeschliffenen Glasröhren, den sog. Stiefeln A und B (Fig. 96), bewegen sich zwei Stempel a und b so, dass der eine immer aufwärts geht, wenn der andere abwärts geht. Vom Boden der Stiefel führen Röhren C zu einem eigentümlich gebohrten Hahn: Von den seitlichen Oeffnungen führt nämlich die eine D nach hinten, die andere E nach vorn. D führt zur Röhre F, welche zu dem auszupumpenden Raum leitet. Derselbe besteht vielfach aus einer Glasglocke G, welche auf den Luftpumpenteller T, eine mattgeschliffene Glasplatte, mit etwas Fettdichtung aufgesetzt ist. Die zweite Bohrung E endet vorn am Hahn, kommuniziert also mit der Atmosphäre. In der

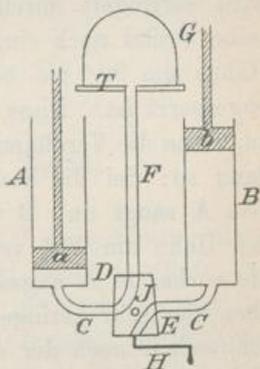


Fig. 96.

gezeichneten Stellung (der Hahn ist dabei viel zu gross gezeichnet, auch liegt seine Axe in Wahrheit in einer zur Ebene des Papiers senkrechten Ebene) ist A mit dem Teller, B mit der Atmosphäre verbunden. Nun bewegen wir die Stempel; die Luft aus G wird nach A hinübergesaugt, während aus B die Luft hinausgepresst wird. Ist b am Boden von B angekommen, so wird der Halm mittelst des Griffes H um 180° gedreht und dadurch B mit G verbunden, A mit der Atmosphäre; bei der Rückbewegung der Stempel saugt daher b Luft aus der Glocke, während a die vorher angesaugte Luft hinaustreibt. So kann man durch fortgesetztes Pumpen den Druck in G sehr klein machen. Die Pumpe hat aber noch einen Mangel: Kurz bevor der Hahn umgelegt wird, ist der Stiefel, welcher zunächst mit dem Teller in Verbindung gesetzt werden soll, mit der Atmosphäre in Kommunikation; daher ist das Röhrchen C und der kleine Raum, welcher bei der tiefsten Stellung des Stempels zwischen diesem und dem Boden des Stiefels übrig ist, mit Luft von Atmosphärendruck gefüllt, und diese Luftmenge wird bei Umlegen des Hahns in den auszupumpenden Raum hineingebracht. Die äusserste Grenze der erreichbaren Verdünnung ist also die, welche bei Verteilung der Luft aus diesem sog. schädlichen Raume in den auszupumpenden entsteht. Dieser Mangel wird verringert durch den sog. Grassmannschen Hahn. Derselbe besitzt noch eine dritte Bohrung J, welche bei Drehung des Hahns um 90° die beiden Stiefel verbindet, während die Glocke abgesperrt ist. Diese Bohrung fängt man erst dann zu benutzen an, wenn die Verdünnung schon weit vorgeschritten ist; man pumpt dann so: Sei die Stellung der Figur vorhanden, so hebt man a, also A saugt an, B wird nach aussen entleert. Dann dreht man den Hahn um 90° , verbindet also A und B, senkt a; dadurch wird die vorher in A angesaugte Luft nach B herübergedrückt, behält aber hier sehr geringe Dichte, und mit Luft von dieser Dichte ist schliesslich auch der schädliche Raum erfüllt. Nun legt man den Hahn wieder in die erste Stellung, saugt wieder A voll u. s. w. Man benutzt dabei also nur den einen Stiefel zum Pumpen, in den anderen entleert man die Luft.

Mit solcher Pumpe, wenn sie sehr gut im stande ist, kann man den Druck wohl auf 1 bis 2 *mm* Quecksilber bringen.

Fig. 97 gibt die Ansicht einer der beschriebenen Pumpen. Man sieht bei R die vier Griffe, welche ein Zahnrad zu drehen gestatten, welches in zwei Zahnstangen eingreift und dadurch die

Stempel a und b in entgegengesetzter Richtung bewegt. Zwischen den Stiefeln ist der Griff des Hahns sichtbar. Ferner sieht man die Messingröhre F, welche von dem hinteren Ende des Hahnes zum Pumpenteller führt. Es ist noch eine Röhre H sichtbar, welche mit der Röhre F kommuniziert; sie dient dazu, den vorhandenen Druck zu messen, wenn derselbe schon ziemlich klein ist. In H befindet sich nämlich ein kurzes Heberbarometer; solange der Luftdruck grösser ist, als die Höhendifferenz der beiden Schenkel, bleibt

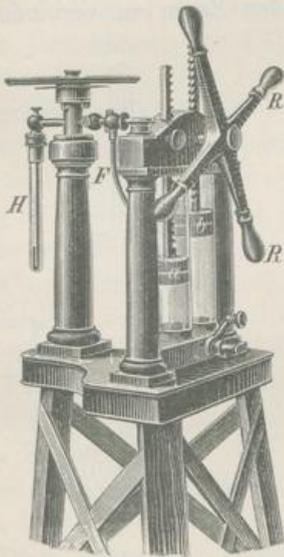


Fig. 97.

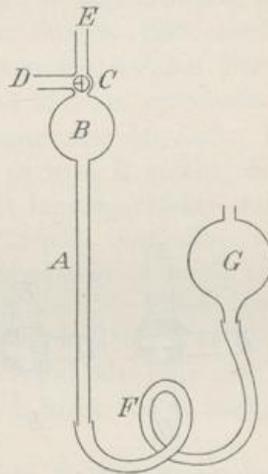


Fig. 98.

das Quecksilber in dem geschlossenen Schenkel oben stehen, dann aber fällt es, und wenn der Luftdruck in H gleich 0 würde, so stände das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch, weil ja dann auf beiden Quecksilbersäulen der Druck 0 lastete. Die Niveaudifferenz der beiden Schenkel gibt also in jedem Augenblick den noch vorhandenen Druck. Man nennt diese Messvorrichtung abgekürztes Barometer oder Barometerprobe.

§ 107. Die beschriebenen Luftpumpen sind in neuerer Zeit durch eine andere Einrichtung, die sog. Quecksilberluftpumpen, stark verdrängt worden, weil diese sehr viel grössere Verdünnung mit Leichtigkeit erreichen lassen. Dieselben benutzen das Vakuum,

welches sich oben in einem Barometer bildet, das sog. Torricellische Vakuum.

Es sei hier zunächst die erste brauchbare Pumpe derart, die sog. Geisslersche Pumpe, im Prinzip beschrieben; Fig. 98 gibt eine Skizze derselben. A ist ein Rohr von mehr als Barometerlänge, welches sich oben zu einer geräumigen Kugel von $\frac{1}{2}$ —1 l Inhalt erweitert. An der Kugel sitzt oben ein Röhrchen mit Hahn C, einem sog. Dreiweghahn, welcher eine T-förmige Bohrung hat und daher B entweder durch D mit der Atmosphäre oder durch E mit dem auszupumpenden Raum zu verbinden ge-

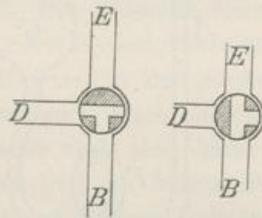


Fig. 99.

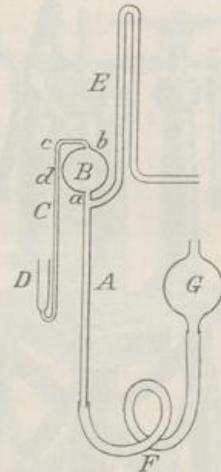


Fig. 100.

stattet. Fig. 99 gibt die dazu nötigen Stellungen des Hahns an. An A ist unten ein starker Schlauch befestigt, dessen anderes Ende zu einem Gefäss G führt, welches Quecksilber enthält. Verbinden wir durch den Hahn B und D, heben G, so fließt das Quecksilber aus G nach B hinüber, füllt dies ganz an und drängt die Luft aus B heraus. Nun stellen wir den Hahn um, verbinden B mit E und senken G; das Quecksilber fließt zurück, in B würde sich ein Torricellisches Vakuum bilden, wenn der Hahn geschlossen wäre; so aber wird aus dem auszupumpenden Raum Luft nach B hinübergesaugt. Sinkt das Quecksilber in A nicht weiter, so verbinden wir wieder B und D, heben G, drücken die angesaugte Luft heraus; ist B wieder ganz voll Quecksilber, so wird der Hahn umgelegt, G gesenkt, eine neue Luftmenge angesaugt u. s. w. Das Arbeiten

mit der Pumpe besteht also im Heben und Senken von G und Drehen des Hahnes.

Letzteres ist aber sehr lästig, und bei einem leicht vorkommenden Irrtum in der Hahnstellung ist stets die Pumpe in grosser Gefahr zu zerbrechen. Vornehmlich aber ist ein Uebelstand vorhanden, nämlich dass der Hahn, um dicht zu schliessen, gefettet sein muss, und Fett sowohl durch Diffusion Luft durchlässt, als auch selbst gasförmige Kohlenwasserstoffverbindungen entwickelt, welche in die auszupumpenden Räume eindringen.

Diese Mängel sind vermieden bei der vollkommensten Pumpe, die wir jetzt haben, der Töppler-Hagenschen Pumpe; Fig. 100 stellt dieselbe dar. Die Teile A, B, F, G sind identisch mit den entsprechenden Teilen der Geisslerschen Pumpe. Statt des Hahnes ist aber an B ein enges Röhrchen C angesetzt, welches über Barometerlänge hat, sich unten umbiegt und hier ein erweitertes Stück D trägt. Dieser Teil dient zum Herauspressen der Luft. D enthält etwas Quecksilber; heben wir G, so wird B gefüllt, die Luft durch C und durch das Quecksilber in D hinausgedrückt; man hebt G schliesslich so hoch, dass ein paar Tropfen Quecksilber durch C hinüberfliessen. Senkt man dann G, so entsteht in B ein vollständiges Vakuum. Die Luft kann nicht hinein; sie drückt zwar auf das Quecksilber in D und treibt es in C in die Höhe, aber höchstens bis zu Barometerhöhe. Die Röhre C wirkt also wie ein Ventil, welches Luft zwar von B nach D, aber nicht von D nach B gelangen lässt.

Dicht unter der Kugel B ist ein Rohr E angeschmolzen, welches auch mehr als Barometerlänge hat und zum auszupumpenden Raum führt. Heben wir G, so wird durch das in A steigende Quecksilber E abgesperrt, bevor die in B befindliche Luft komprimiert und durch C hinausgetrieben wird. Senken wir dagegen G und entsteht in B das Vakuum, so wird die Mündung von E wieder frei, die Luft kann von dem auszupumpenden Raum nach B herüber zuströmen. Bei der nächsten Hebung von G wird sie herausgetrieben, bei der Senkung strömt neue nach u. s. w. E wirkt also ebenfalls als Ventil, welches nur Luft nach B hineingelangen lässt.

Eine sehr wichtige Eigenschaft der Pumpe besteht darin, dass sie in jedem Moment bis zur äussersten Verdünnung den noch vorhandenen Druck zu messen gestattet auf folgende Weise: es sei der Druck bereits sehr gering; wir heben G so weit, dass das

Quecksilber bei a steht; B ist dann mit Luft erfüllt von demselben Druck x , der im auszupumpenden Raum herrscht, und welcher bestimmt werden soll. Das Quecksilber in C wird fast Barometerhöhe über dem Niveau in D haben, es stehe bei c . In der Kugel B und dem Stück der Kapillare von b bis c sei ein Volumen V vorhanden, welches also mit Luft vom Druck x erfüllt ist. Nun heben wir G , bis das Quecksilber in b steht. Dadurch wird die Luft komprimiert, ihr Druck nimmt zu, das Quecksilber in C sinkt um die Höhe h bis d . Jetzt nimmt die Luft das kleine Volumen der Kapillare von b bis d ein, es heisse v ; dafür ist der Druck um h gestiegen, er ist also $x + h$. Nach dem Mariotteschen Gesetz ist nun $Vx = v(x + h)$, $x(V - v) = vh$, $x = \frac{vh}{V - v}$ oder, da v sehr klein gegen V , auch $x = \frac{v}{V}h$. Wenn man daher ein für allemal das Volumen der Kugel V und das Volumen v der Kapillare von b bis zu verschiedenen Punkten d bestimmt, so kann man während des Pumpens aus der Lage von d jederzeit den Druck ablesen.

Man kommt mit diesen Pumpen in der Verdünnung so weit, dass bei Kompression der Luft vom Volumen V auf v mit dem Mikroskop eine Senkung des Quecksilbers in C sichtbar ist; man erreicht dabei einen Druck von $0,0001 \text{ mm}$, oder noch weniger.

§ 108. Gehen wir nun über zur Bewegung der Gase, so werden im Vergleich mit den Flüssigkeiten die Verhältnisse dadurch verwickelter, dass je nach dem Druck die Dichte variiert. Fliessen Gase durch eine Röhrenleitung von variablem Querschnitt, so gilt auch hier das Gesetz (vgl. § 75), dass bei stationärem Zustand durch jeden Quereinschnitt in der Zeiteinheit gleich viel fliesst; aber es ist hier nicht das durchfliessende Volumen konstant, sondern die Masse, d. h. Volumen \times Dichte, $v \cdot d$.

Auch für die Ausflussgeschwindigkeit gilt theoretisch das gleiche Gesetz (§ 76): $U = \sqrt{2gh}$, wo h die Höhe der Gassäule bedeutet, welche bei konstanter Dichte den gleichen Ueberdruck gegen den an der Ausflussmündung herrschenden hervorbringen würde.

Nennen wir den äusseren Druck P_1 , den oben im Gase herrschenden P , die mittlere Dichte des Gases s , so ist $hs = P - P_1$,

$h = \frac{P - P_1}{s}$, also $U = \sqrt{2g \frac{P - P_1}{s}}$, d. h. die Geschwindigkeiten verschiedener Gase, die unter demselben Druck ausströmen, sind umgekehrt proportional der Wurzel aus der Dichte.

Wollen wir z. B. berechnen, mit welcher Geschwindigkeit Luft von Atmosphärendruck in ein Vakuum strömt, so ist zu setzen:

$$g = 980,9 \frac{cm}{sec^2}, P = 1033,3 g, P_1 = 0 g, s = 0,001293; \text{ daraus folgt}$$

$$U = 396 \frac{m}{sec}.$$

Aehnlich wie bei Flüssigkeiten (§ 75) sinkt auch bei Gasen der Druck, sobald die Geschwindigkeit wächst, es entsteht negativer Druck; befinden sich daher in der Nähe langsamer bewegte oder ruhende Gasmassen, so strömen diese zu. Darauf beruhen die Vorrichtungen, die man zum Zerstäuben von Flüssigkeiten vielfach benutzt (Fig. 101); sie bestehen aus zwei Röhren A und B, die sich unter rechtem Winkel treffen. B taucht in ein Gefäß mit Flüssigkeit; treibt man durch A, welches sich vorn verengert, einen kräftigen Luft- oder Dampfstrom, so tritt er über der Oeffnung von B aus; hierher strömt von allen Seiten die ruhende Luft, sie wird angesaugt. So wird auch aus B die Luft ausgesaugt, die Flüssigkeit steigt in B, kommt an die Oeffnung, wird mit in den Luftstrom gerissen und zerstäubt.

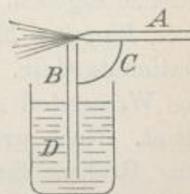


Fig. 101.

§ 109. Auch bei Gasen entstehen durch die Molekularkräfte eine Reihe von Erscheinungen. Wenn Gase mit festen Körpern in Berührung kommen, so werden sie von deren Oberfläche angezogen; sie bilden eine sehr fest haftende Schicht. Die Anziehung scheint sehr gross zu sein, so dass die Dichte des Gases dem Druck von vielen Atmosphären — unter Umständen mehreren hundert Atmosphären — entspricht. Da aber die Molekularkräfte nur auf sehr kleine Entfernung wirken, so ist die Dicke der Schicht sehr gering. Wir haben uns aber die Abnahme der Dichte als kontinuierlich zu denken: Die erste, durch die feste Oberfläche verdichtete Schicht wirkt ihrerseits anziehend auf das Gas, es folgt also eine zweite weniger dichte Schicht u. s. w. Wie man sieht, hängt daher die Menge des verdichteten Gases erstlich von der Anziehung der Wand auf das Gas ab, dann aber von der Anziehung

der Gasteilchen in sich, von der Verdichtbarkeit des Gases u. s. w., also von der Natur des Gases. Daraus folgt, dass die leicht kompressiblen und verflüssigbaren Gase besonders stark verdichtet werden. Die Erscheinung wird natürlich besonders auffallend bei Körpern von relativ grosser Oberfläche, also bei porösen, schwammigen Körpern, wie Holzkohle, Platinmohr, Meerschaum. Sie wurde zuerst von Saussure untersucht, welcher fand, dass 1 *cbcm* Buchsbaumkohle von verschiedenen Gasen folgende Volumina in Kubikcentimetern (gerechnet bei 0° und 760 *mm*) verdichtet: NH_3 90; SO_2 65; CO_2 35; O 9,25; H 1,75. Auf die Verdichtung, welche Adsorption genannt wird, ist Druck und Temperatur von grösstem Einfluss; mit steigendem Druck nimmt die adsorbierte Menge zu, mit steigender Temperatur ab. Neuere Untersuchungen beziehen sich namentlich auf diese Einflüsse, haben aber keine einfachen Gesetze ergeben.

Einzelne Metalle zeigen eine eigentümliche Anziehung auf bestimmte Gase. So ist Platin im stande, sehr bedeutende Mengen von Wasserstoff aufzunehmen, welche Erscheinung man Oclusion nennt. Noch grössere Anziehung auf Wasserstoff übt Palladium aus; Graham fand, dass ein Stück Palladiumdraht das 936fache eigene Volumen Wasserstoff aufnahm. Dabei wuchs sein Volumen, die Dichte nahm ab, es liess sich berechnen, dass das Wasserstoffgas dabei eine Dichte von 0,8 erlangt haben müsse. Flüssiges Silber nimmt Sauerstoff auf, lässt es im Moment des Erstarrens wieder los, wodurch Gasblasen Silber umherspritzen (Spratzen des Silbers).

Hier sind auch die sog. hygroskopischen Substanzen zu nennen, wie Chlorcalcium, Phosphorsäureanhydrid u. s. w., welche Wasserdampf anziehen, an ihrer Oberfläche verdichten und sich dann im Wasser lösen; sie werden viel benutzt, um Gase zu trocknen.

Bei der Verdichtung der Gase an den Oberflächen können bedeutende Wärmemengen frei werden. Leitet man z. B. einen Strom von Wasserstoffgas gegen Platinschwamm oder Palladiumblech, so werden diese durch die Adsorption glühend und entzünden das Gas.

§ 110. Aehnlich wie feste Körper ziehen auch Flüssigkeiten die Gase an, welche sich dabei aber durch das ganze Innere der Flüssigkeit gleichmässig verteilen. Man nennt dies Absorption.

Die absorbierte Menge hängt vom Druck, unter welchem das Gas steht, und von der Temperatur der Flüssigkeit ab. Henry fand, dass bei jedem Druck das gleiche Volumen Gas absorbiert wird, d. h. dass die absorbierte Masse dem Druck proportional ist. Als Absorptionskoeffizient einer Flüssigkeit für ein Gas bezeichnet man die Zahl Kubikcentimeter Gas, welche von 1 *ccm* Flüssigkeit aufgenommen werden, wobei man das Gasvolumen auf 0° und 760 *mm* Druck reduziert.

Folgende Tabelle gibt einige Zahlen bei 15° C.

	Wasser	Alkohol
N	0,01682	0,12142
H	0,01883	0,06725
O	0,03415	0,28897
CO ₂	1,0020	3,1993
H ₂ S	3,2326	9,539
SO ₂	47,3244	144,55
NH ₃	785	—

Den Einfluss der Temperatur gibt folgende Tabelle, die die Absorptionskoeffizienten für Wasser gegen Kohlensäure und Ammoniak enthält.

Temperatur	CO ₂	NH ₃
0°	1,80	1300
10°	1,18	868
10°	0,90	712
25°	—	636
125°	0,24	—

Durch Erwärmen einer Flüssigkeit oder durch Erzeugung eines geringeren Druckes, als bei welchem sie mit Gas sich sättigte, können wir daher die Flüssigkeit von Gas befreien. Darauf beruht das Schäumen kohlensäurehaltiger Getränke beim Öffnen der Flaschen oder beim Stehen in Gläsern.

Beachtenswert ist, dass Wasser viel mehr Sauerstoff absorbiert, als Stickstoff, wodurch die im Wasser enthaltene Luft eine andere Zusammensetzung erhält; das ist wichtig für die im Wasser lebenden Organismen. Noch auf eine dritte Weise werden die Gase von den Flüssigkeiten ausgeschieden, nämlich beim Erstarren letzterer; dadurch entsteht z. B. das blasige Eis.

§ 111. Eine weitere Wirkung der Molekularkräfte ist die Reibung strömender Gase, und zwar unterscheidet man auch hier innere und äussere Reibung.

Die äussere Reibung an festen Körpern ist ∞ gross, das Gas haftet ganz fest (ausser bei sehr kleinem Druck); es ist dann also nur von innerer Reibung verschieden schnell bewegter Gasschichten derselben Art die Rede. Man kann den Koeffizienten der inneren Reibung (vgl. § 80) nach zwei Methoden bestimmen: entweder, indem man das Gas durch sehr enge Röhren strömen lässt und die in der Zeiteinheit durchströmende Menge misst (§ 80), oder nach einer von Coulomb¹⁾ eingeführten Methode: man lässt kreisförmige Scheiben, welche in ihrem Mittelpunkt horizontal aufgehängt sind, in ihrer Ebene schwingen. Die Reibung bewirkt dann eine Abnahme der Schwingungsweite, und man kann aus dieser Abnahme den Reibungskoeffizienten berechnen.

Die Theorie ergibt, dass der Koeffizient der inneren Reibung bis zu sehr kleinen Drucken herunter konstant ist; die Versuche bestätigen dies vollständig.

Die äussere Reibung der Gase kann nur bei Strömen eines Gases in einem anderen beobachtet werden; sie bringt einige interessante Erscheinungen hervor.

Steigt ein (z. B. durch beigemischtem Rauch) sichtbarer Gasstrom mit beträchtlicher Geschwindigkeit in ruhender Luft auf, wie man es z. B. an ganz windstillen Tagen bei Fabrikschornsteinen beobachten kann, so ist er für eine Strecke als scharf begrenzter Strahl sichtbar, dann aber löst er sich in Wirbel auf (Fig. 102); das erklärt sich so: in der Grenzfläche wirkt die Reibung, indem der bewegte Strahl die Teilchen in die Höhe zieht, die ruhende Luft sie zurückhält, d. h. zu ihrer Bewegung eine nach unten gerichtete Komponente b hinzufügt; die Grenzfläche hat daher die Neigung, sich zu drehen im Sinne des eingezeichneten Pfeils, also

¹⁾ Coulomb, Mém. de l'institut national tome 3.

Wirbel zu bilden. Sie folgt dieser Neigung aber erst, wenn die Geschwindigkeit des Strahls, welche nach oben abnimmt, bis auf einen bestimmten Wert gesunken ist.

Sobald man aber die umgebende Luft erschüttert, wird schon an einer viel tieferen Stelle des Strahles die Geschwindigkeit klein genug werden; denn durch die Erschütterung dringen ruhende Teilchen durch die Grenze in den Strahl und umgekehrt, es findet eine Mischung statt und die mittlere Geschwindigkeit sinkt. Dann muss also schon an einer tieferen Stelle der Zerfall des Strahles in Wirbel eintreten. Man sieht dies sehr schön, wenn man Leuchtgas unter hohem Druck aus einer kreisrunden Oeffnung ausströmen

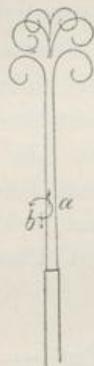


Fig. 102.



Fig. 103.

lässt und anzündet, so dass eine Flamme von 30 bis 40 *cm* Höhe entsteht. Sobald man die Ruhe der umgebenden Luft stört, was am besten durch Hervorbringen hoher Töne, Klirren, Zischlaute geschieht, zuckt die Flamme zusammen und wird ganz kurz und zackig, wie dies ungefähr Fig. 103 darstellt. Man nennt solche Flammen empfindliche; sie werden zu akustischen Versuchen über hohe Töne, wo das Ohr nicht mehr ausreicht, benutzt.

Eine eigenartige Bewegung der Gase wird durch Reibung in folgender Weise erzeugt: wir nehmen einen Kasten, dessen eine Wand aus einer elastischen Membran besteht, während in der gegenüberliegenden Wand sich eine kreisförmige Oeffnung befindet; der Kasten wird mit einem Gase gefüllt, dessen Bewegungen wir z. B. durch beigemischten Rauch sichtbar machen. Führen wir gegen die elastische Hinterwand einen leichten Schlag, so wird ein Quantum Gas aus dem Loch ausgestossen. Dasselbe reibt sich aber

an den Rändern des Loches, das Gas strömt in der Mitte schneller, und die Gasmasse verwandelt sich in einen Wirbelring, wie ihn etwa auch Raucher blasen. Der Ring als Ganzes bewegt sich weiter, wälzt sich aber dabei in sich um, so dass ein Teilchen nach einander auf der inneren Seite des Ringes, dann auf der vorderen, äusseren, hinteren, inneren u. s. w. Seite liegt. Die Theorie dieser Bewegung ist von v. Helmholtz zuerst entwickelt worden und hat sehr eigentümliche, auch experimentell bestätigte Resultate ergeben. Laufen zwei solche Ringe in derselben geraden Linie fort, so beeinflussen sie sich, indem der vordere verzögert wird und sich dabei erweitert, der hintere beschleunigt wird und sich zusammenzieht, bis er den vorderen eingeholt hat und durchschlüpft. Nun wird er verzögert und erweitert, der jetzt hintere holt ihn ein und schlüpft durch u. s. w. Die Theorie zeigt, dass in einem reibungslosen Medium ein einmal existierender Wirbel nicht vernichtet werden kann, sondern in alle Ewigkeit weiter bestehen muss. Auf das weitere Verhalten dieser Wirbelringe kann hier nicht eingegangen werden, es sei nur noch erwähnt, dass Thomson die Hypothese aufgestellt hat, die Atome seien derartige Wirbelringe; in der That würden sich so eine ganze Reihe von Thatsachen gut erklären lassen.

§ 112. Auch die Erscheinungen der Diffusion finden sich bei Gasen. Setzen wir zwei mit verschiedenen Gasen gefüllte Räume in Verbindung, so mischen sich die Gase zunächst in der Grenzfläche, und nach einiger Zeit bilden sie ein völlig gleichmässiges Gemisch. Man nennt den Druck, den jedes Gas ausüben würde, wenn es allein den ganzen Raum ausfüllte, den Partialdruck desselben. Ein von Dalton gefundenes Gesetz sagt aus, dass in einem Gasgemisch ein Druck herrscht, welcher gleich der Summe der Partialdrucke ist. So setzt sich z. B. der Atmosphärendruck zusammen aus dem Druck des N, des O und des Wasserdampfes. Die konstante Zusammensetzung der Luft beruht auf der Diffusion, weil lokale Störungen sich sehr schnell ausgleichen.

Auch Gase mischen sich durch Oeffnungen, poröse und andere Scheidewände hindurch. Man unterscheidet hier

1. Effusion: Wenn durch eine sehr feine Oeffnung in dünner Wand Gas durch Ueberdruck ausströmt, so gilt das Gesetz (§ 108), dass die Ausströmungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional der Wurzel aus der Dichte ist. Bunsen hat einen Apparat konstruiert,

der mit Hilfe dieser Effusionsgeschwindigkeit die Dichte der Gase zu bestimmen gestattet.

2. *Transpiration* ist vorhanden, wenn durch lange dünne Röhren, Kapillaren oder kapillare Oeffnungen in porösen Scheidewänden Gase durch Ueberdruck ausströmen. Hier ist die Geschwindigkeit hauptsächlich durch die Reibungskonstante des Gases bedingt.

3. Die eigentliche *Diffusion* durch Scheidewände mit sehr engen Poren (unglasiertes Porzellan, Gips, Graphit u. s. w.) findet ohne Ueberdruck statt. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist umgekehrt proportional der Wurzel aus der Dichte. Hier finden sich natürlich zwei Gasströme in entgegengesetzten Richtungen von den beiden durch die Scheidewand getrennten Gasen.

4. *Penetration* nennt man das Durchgehen von Gasen durch porenfreie Scheidewände, z. B. Kautschuk, Flüssigkeitsschichten. Diese Erscheinung ist noch wenig studiert; die Geschwindigkeit hängt von der Wechselwirkung zwischen Gas und Wand, also vom Absorptionskoeffizienten ab. Kautschuk wird namentlich leicht durchdrungen von Kohlensäure. *Sainte-Claire Deville* hat beobachtet, dass bei hoher Temperatur Platin und Eisen das Wasserstoffgas leicht hindurchlassen.