



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

III. Flüssigkeiten (Hydrostatik).

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-83789)

III. Flüssigkeiten.

(Hydrostatik.)

57. **Flüssige Körper.** Während die Teilchen der festen Körper sich gegenseitig in bestimmten festen Lagen erhalten, zeichnen sich die Flüssigkeiten durch die freie Verschiebbarkeit ihrer Teilchen aus. Sie haben infolgedessen keine selbständige Form, wie die festen Körper, sondern schmiegen sich der Gestalt des Gefäßes an. Die Flüssigkeiten besitzen also, im Gegensatz zu den festen Körpern, keine Gestaltselastizität (v. o. 54), wohl aber Volumelastizität. Doch widerstreben sie einer Verkleinerung ihres Rauminhaltes mit außerordentlich großer Kraft. Ihre Zusammendrückbarkeit ist zwar etwas größer als diejenige der festen Körper, immerhin aber so gering, daß man sie lange für unzusammendrückbar gehalten hat und sie unter gewöhnlichen Umständen auch ohne erheblichen Fehler als unzusammendrückbar ansehen kann.

Wie man in der reinen Mechanik von den Gestaltsänderungen der festen Körper absieht und sie als starre Körper behandelt (26), so kann man bei der Betrachtung des mechanischen Verhaltens der Flüssigkeiten zunächst von den Volumänderungen der Flüssigkeiten absehen und eine reine Hydromechanik auf der Vorstellung entwickeln, daß man es mit einer idealen Flüssigkeit zu tun hat, die gar nicht zusammendrückbar ist und deren Teilchen sich mit vollkommener Leichtigkeit, d. h. ohne Aufwand einer Kraft, gegeneinander verschieben lassen.

58. **Fortpflanzung des Druckes.** Vermöge der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teilchen verhalten sich die Flüssigkeiten einem auf sie ausgeübten Druck gegenüber ganz anders als die festen Körper. Wird auf einen festen Körper, der auf einer Unterlage steht, von oben nach unten ein Druck ausgeübt, so überträgt er sich in dieser Richtung auf die Unterlage. Widersteht die Unterlage, so wird der Körper in senkrechter Richtung etwas zusammengepreßt und wird sich zugleich seitlich etwas ausbauchen. Grenzt er auch hier an einen anderen, ihm widerstehenden Körper, so wird er auch auf diesen, also in seitlicher Richtung einen Druck ausüben. Aber dieser Druck würde im allgemeinen nicht die gleiche Größe wie der Druck auf die Unterlage haben.

Denken wir uns dagegen ein zylindrisches Gefäß mit einer aus losen, beweglichen Teilchen bestehenden Substanz, z. B. mit feinen Schrotkörnern oder mit Sand, angefüllt und mittels eines an die Gefäßwand anschließenden Kolbens einen Druck auf die Oberfläche der Schrot- oder Sandmasse ausgeübt, so werden die zunächst gedrückten Körnchen sich zwischen die benachbarten einzukleimen und diese, weil ihnen nach allen Richtungen die gleiche Möglichkeit des Ausweichens gegeben ist, nicht nur nach vorwärts, sondern auch nach seitwärts und sogar nach rückwärts zu drängen bestrebt sein. Der ausgeübte Druck pflanzt sich also nach allen Richtungen durch die ganze Masse fort und überträgt sich schließlich auf die Gefäßwände, gegen welche er überall senkrecht wirkt; denn bringt man irgendwo, sei es im Boden oder in einer Seitenwand des Gefäßes,

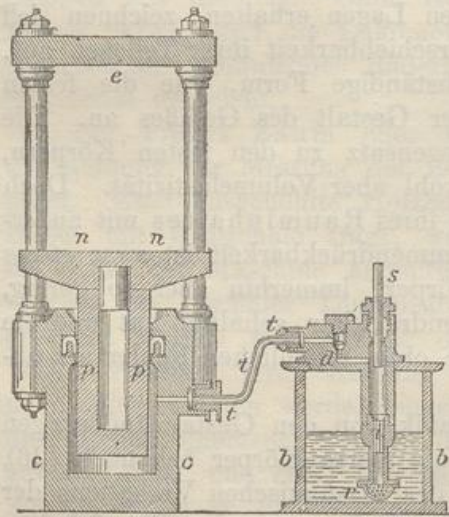


Fig. 62.
Hydraulische Presse.

ein Loch an, so wird die Masse durch dasselbe in einer zur Wand senkrechten Richtung gleichsam herausspritzen. Infolge der noch weit größeren Beweglichkeit ihrer Teilchen zeigen Flüssigkeiten diese allseitige Fortpflanzung des Druckes in vollkommenster Weise; für sie gilt daher das hydrostatische Grundgesetz: Ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich in ihr nach allen Richtungen mit gleicher Stärke fort. „Mit gleicher Stärke“, d. h. durch die ganze gepresste Flüssigkeitsmenge hindurch hat vermöge des auf sie ausgeübten Druckes jedes Flüssigkeitsteilchen das

gleiche Bestreben nach allen Richtungen hin auszuweichen; der Druck, welchen ein beliebiges Stück der Gefäßwand auszuhalten hat, wird daher um so größer sein, von einer je größeren Anzahl Flüssigkeitsteilchen es bedrängt wird, d. h. je größer das Flächenstück ist. Dieser „hydrostatische“ Druck wirkt jedoch nicht nur auf die Gefäßwände, sondern herrscht überall im Innern der Flüssigkeit; ein in ihr befindliches dünnes Blechstückchen z. B. erleidet von beiden Seiten her den gleichen seiner Oberfläche proportionalen und zu ihr senkrechten Druck. Der Druck an irgend einer Stelle einer ruhenden Flüssigkeit wird gemessen durch die daselbst auf die Flächeneinheit wirkende Kraft.

Eine nützliche Anwendung der allseitig gleichen Fortpflanzung des Druckes im Wasser macht man in der hydraulischen Presse (Bramah, 1795). Sie besteht (Fig. 62) aus einem weiten (cc) und

aus einem engen Zylinder, welche mit Wasser gefüllt und durch einen Kanal (*tt*) miteinander verbunden sind; den weiten Zylinder verschließt der Preßkolben (*pp*), der engere enthält einen Pumpenkolben (*s*). Der auf letzteren ausgeübte Druck pflanzt sich durch das Wasser fort, und der Preßkolben wird mit einer Kraft gehoben, welche im Vergleich zu jenem Druck so vielmal größer ist, als der Querschnitt des Preßkolbens denjenigen des Pumpenkolbens übertrifft. Der Preßkolben trägt oben eine Platte (*nn*), welche die zu pressenden Gegenstände gegen ein durch starke Pfeiler getragenes festes Widerlager (*e*) drückt. Beim Heben des Pumpenkolbens schließt sich das Ventil *d*, das Ventil *i* dagegen öffnet sich und läßt aus dem Behälter *bb* durch das Sieb *r* Wasser nachdringen, welches bei dem nächsten Niedergang des Kolbens *s* in den Zylinder *cc* hinübergereßt wird. Der Pumpenkolben wird mittels eines einarmigen Hebels in Bewegung gesetzt, an dessen längerem Hebelarm der Arbeiter angreift. Angenommen, dieser übe einen Druck von 30 kg aus und der längere Hebelarm sei sechsmal länger als der kürzere, an welchem die Kolbenstange der Pumpe angebracht ist, so geht der Pumpenkolben mit einem Druck von 180 kg herab; ist nun die Stirnfläche des Preßkolbens 100 mal so groß wie diejenige des Pumpenkolbens, so wird jener mit einer Kraft von 18 000 kg in die Höhe gedrückt. Auch für diese Maschine gilt die allgemeine Regel der Mechanik, daß, was an Kraft gewonnen wird, an Weg verloren geht, oder daß die bewegende Arbeit der widerstehenden gleich ist.

59. Wirkung der Schwerkraft. Wir haben bisher nur die Fortpflanzung eines auf die Flüssigkeit ausgeübten äußeren Druckes betrachtet, ohne auf die Wirkungen Rücksicht zu nehmen, welche die Schwere der Flüssigkeit selbst hervorbringt. Vor allem ist klar, daß eine in einem oben offenen Gefäß enthaltene Flüssigkeit nur dann im Gleichgewicht sein kann, wenn ihre freie Oberfläche wagrecht ist, d. h. wenn die Richtung der Schwerkraft auf ihr senkrecht steht, da ja bei jeder anderen Form der Flüssigkeitsoberfläche ein Herabfließen eines Teiles der Flüssigkeit von den höheren nach den tieferen Stellen eintreten müßte, bis endlich der wagrechte Flüssigkeitsspiegel hergestellt wäre. Man kann sich ferner leicht überzeugen, daß auch in zwei (oder mehreren) Gefäßen, welche unten miteinander in Verbindung stehen (kommunizierende Gefäße oder Röhren), die Flüssigkeit sich immer in beiden gleichhoch (in dasselbe Niveau) einstellt, so daß beide Flüssigkeitsspiegel stets in derselben wagrechten Ebene liegen, welche Form auch die Gefäße haben mögen.

Hierauf gründet sich die Anwendung der Wasserwage (Kanalwage) zum Einvisieren wagrechter Linien (Nivellieren), bestehend aus einem Blechrohr, in dessen lotrecht aufwärts gebogene Enden Glasröhre eingesetzt sind; da in diese kommunizierenden Röhren gegossenes Wasser in beiden Glasröhren sich in die nämliche wagrechte

Ebene einstellt, so ist die Sehlinie eines über beide Wasserspiegel hinblickenden Auges notwendig wagrecht. Als feineres Mittel zum Horizontalstellen von Linien (z. B. der optischen Achsen von Fernrohren) und Ebenen dient die Libelle (Hooke, 1666). Sie besteht aus einem in eine Metallfassung eingeschlossenen, nach der Mitte ein wenig ausgebauchten und bis auf eine Luftblase mit Weingeist oder Äther gefüllten Glasgefäß von Röhren- oder Dosenform (Röhrenlibelle, Dosenlibelle). Die Luftblase nimmt immer die höchste Stelle des Gefäßes ein; läßt man sie auf die durch geeignete Marken bezeichnete Mitte der Röhre oder Dose einspielen, so steht die Grundfläche der Metallhülse wagrecht.

Betrachten wir nun beispielsweise eine Gießkanne (Fig. 63), welche bis MN mit Wasser gefüllt ist, so wird die Oberfläche des Wassers im Ausgußrohr bei N genau in derselben wagrechten Ebene liegen wie der Wasserspiegel in der Kanne. Füllt man nun noch mehr Wasser in die Gießkanne bis zum Niveau PQ , so muß, da das unterhalb MN befindliche Wasser nach wie vor sein Gleichgewicht behauptet, die schiefe Wassersäule $NN' Q' Q$ im Ausgußrohr der in der Kanne über MM' befindlichen Wassersäule $MM' P' P$ das Gleichgewicht halten, d. h. der Druck, welchen jene Wassersäule auf ihre Grundfläche NN' ausübt, und welcher sich durch das darunter befindliche Wasser fortpflanzt, um gegen die Fläche MM' von unten nach oben zu wirken, muß gleich sein dem Druck, welchen

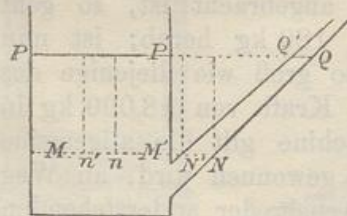


Fig. 63.
Gießkanne.

das über MM' befindliche Wasser auf ein gleichgroßes Flächenstück nn' von oben nach unten ausübt. Der Druck, welchen das Flächenstückchen nn' auszuhalten hat, ist aber nichts anderes, als das Gewicht der lotrecht darüber stehenden Wassersäule; demnach ist auch der Druck, welchen die schiefe Wassersäule NQ auf ihre Grundfläche ausübt, gleich dem Gewicht einer lotrechten Wassersäule, welche man über dieser Grundfläche bis zur Ebene des Flüssigkeitsspiegels emporreichend denkt. Der Druck, welchen gleichgroße Flächenstückchen vermöge der Schwere der Flüssigkeiten erleiden, hängt also nur von der lotrechten Tiefe des betrachteten Flächenstückchens unter dem Flüssigkeitsspiegel ab und ist dieser Tiefe proportional. In einer Flüssigkeitsmasse herrscht also in jeder wagrechten Ebene pro Flächeneinheit der gleiche Druck, und dieser Druck nimmt nach unten hin in demselben Verhältnis wie die Tiefe zu. Solche Flächen gleichen Druckes nennt man Niveauflächen. In Gefäßen von mäßiger Ausdehnung erscheinen sie als horizontale Ebenen, sind aber eigentlich kleine Stücke von mit der Erde konzentrischen Kugelflächen.

Gießt man zu Quecksilber, welches den unteren Teil des zweischenkligigen Glasrohrs aec (Fig. 64) erfüllt, in den einen Schenkel

Wasser, so sinkt das Quecksilber in diesem und steigt im anderen Schenkel, bis sich Gleichgewicht hergestellt hat. Die durch die Trennungsschicht der beiden Flüssigkeiten gelegte Horizontalebene ac ist alsdann eine Fläche gleichen Druckes, unterhalb welcher das Quecksilber für sich schon im Gleichgewicht ist, und auf welche von oben her einerseits die Wassersäule ab , andererseits die Quecksilbersäule cd auf die Flächeneinheit gleichen Druck ausüben. Man findet nun, daß die Wassersäule vertikal gemessen 13,6 mal höher ist als die Quecksilbersäule, und daß sonach die Quecksilbersäule ebensoviel wiegt wie eine 13,6 mal höhere Wassersäule von gleicher Grundfläche. Bei gleichem Rauminhalt ist daher Quecksilber 13,6 mal so schwer als Wasser; man nennt diese Zahl sein spezifisches Gewicht (64). Allgemein gilt, daß zwei verschiedene, nicht mischbare Flüssigkeiten in kommunizierenden Röhren sich das Gleichgewicht halten, wenn ihre von der Trennungsschicht an gerechneten Höhen sich umgekehrt verhalten wie ihre spezifischen Gewichte.

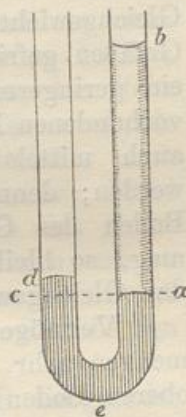


Fig. 64.
Zweischenkliges
Glasrohr.

60. **Bodendruck.** Der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf den wagrechten Boden eines Gefäßes ausübt, ist, ohne Rücksicht auf die Gestalt des Gefäßes, stets gleich dem Gewicht einer lotrechten Flüssigkeitssäule, welche man sich über dem Boden bis zum Flüssigkeitsspiegel errichtet denkt. In einem Gefäß, welches sich nach oben erweitert, ist hiernach

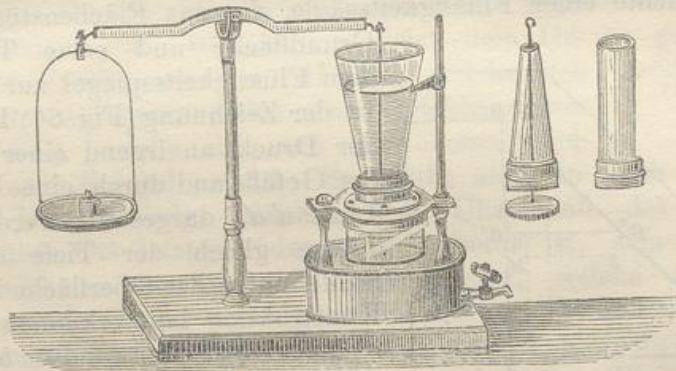


Fig. 65.
Hydrostatisches Paradoxon.

der auf den Boden ausgeübte Druck kleiner, in einem nach oben enger werdenden Gefäß (z. B. in einer Flasche) größer als das Gewicht der im Gefäß enthaltenen Flüssigkeit. Diese Folgerung (Stevin, 1586) erscheint auf den ersten Blick so seltsam, daß man sie das hydrostatische Paradoxon genannt hat. Ihre Richtigkeit läßt sich aber leicht nachweisen (Pascal, 1653) mittels einer Wage (Fig. 65), deren eine ebengeschliffene Wagschale den Boden

verschieden geformter Gefäße (z. B. eines geraden zylindrischen, eines oben erweiterten, eines oben verengerten usw.), die man der Reihe nach auf ein Gestell aufschraubt, bilden kann. Bei gleichem Wasserstand braucht man bei dem erweiterten und dem sich verengenden Gefäß dasselbe Gewicht wie bei dem zylindrischen, um dem Druck der Flüssigkeit gegen die bewegliche Bodenplatte das Gleichgewicht zu halten. Würde man dagegen das Wasser in den Gefäßen gefrieren lassen, so wäre im Falle des oben engeren Gefäßes ein geringeres Gewicht erforderlich, nämlich nur das der wirklich vorhandenen Eismasse. — Das Gesetz vom Bodendruck kann übrigens auch mittels des zweischenkligen Rohres (Fig. 64) nachgewiesen werden; denn die Quecksilberfläche bei a bildet den beweglichen Boden des Gefäßes ab ; welche Gestalt man diesem auch geben mag, so bleibt die Quecksilbersäule cd , welche dem Druck auf a das Gleichgewicht hält, unverändert (Haldat).

Vermöge dieses Gesetzes lassen sich durch kleine Flüssigkeitsmengen sehr große Druckkräfte ausüben. Indem Pascal (1647) im oberen Boden eines mit Wasser gefüllten Fasses eine 10 m hohe, enge Röhre befestigte und ebenfalls mit Wasser füllte, gelang es ihm, das Faß zu zersprengen; denn der Druck auf den Boden des Fasses ist gleich dem Gewichte einer Wassersäule, welche man sich mit einem dem Boden des Fasses gleichen und gleichbleibenden Querschnitt bis an das obere Ende der Röhre emporreichend denkt.

61. **Seitendruck.** Auf jedes kleine Flächenstückchen der vertikalen Seitenwand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes wirkt senkrecht zu ihm, also in horizontaler Richtung, ein Druck gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, die das Flächenstückchen zur

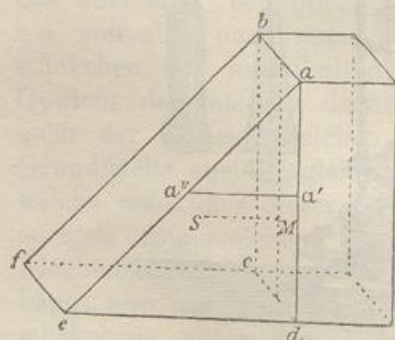


Fig. 66.
Seitendruck.

Grundfläche und seine Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel zur Höhe hat. In der Zeichnung (Fig. 66) kann daher der Druck an irgend einer Stelle (a') der Gefäßwand durch eine horizontale Linie $a'a''$ dargestellt werden, deren Länge gleich der Tiefe aa' dieser Stelle unter der Oberfläche ist. Diese Konstruktion läßt erkennen, daß die rechteckige Seitenwand $abcd$ eines Gefäßes einen horizontalen Druck derart erleidet, als wenn sie, horizontal gelegt, mit dem keilförmigen Prisma

$abcdef$ belastet wäre. Eine vom Schwerpunkt S dieses Prismas auf die Gefäßwand gefällte Senkrechte gibt den Punkt M an, in welchem dieser Druck, als Resultante aus den unzählig vielen auf die Flächenteilchen wirkenden Einzeldrücken, angreift. In unserem Beispiel liegt dieser Punkt, welchen man den Mittelpunkt des Druckes nennt, auf der vertikalen Mittellinie des Rechtecks um $\frac{1}{3}$ der Gesamttiefe über dem Boden.

62. **Auftrieb.** Der durch die Schwere in einer Flüssigkeit hervorgerufene Druck wirkt nicht nur nach unten und seitwärts, sondern auch nach aufwärts, als sogenannter Auftrieb. Um diesen nach oben wirkenden Druck nachzuweisen, kann man sich eines weiten, beiderseits offenen Glasrohres bedienen, dessen unteres eben abgeschliffenes Ende mittels einer ebenen Metallscheibe verschlossen werden kann; dies geschieht, indem man die Scheibe mittels eines in ihrer Mitte befestigten, durch das Rohr hinaufgehenden Fadens gegen dessen unteren Rand anpreßt. Taucht man nun das Rohr mit dem so verschlossenen Ende voran in Wasser, so wird die Scheibe, wenn man den vorher angespannten Faden losläßt, doch nicht abfallen, weil sie nun durch den Auftrieb gegen den Rand des Rohres gedrückt wird. Gießt man jetzt Wasser in das Rohr, so fällt die Scheibe erst ab, wenn das Wasser im Innern nahezu dieselbe Höhe erreicht hat wie außerhalb, nämlich dann, wenn der Wasserdruck von oben zusammen mit dem Gewichte der Scheibe den Druck von unten her zu übertreffen beginnt.

63. **Archimedisches Gesetz.** Wird ein Körper, z. B. ein gerader Zylinder mit wagrechten Endflächen ($ABCD$, Fig. 67), unter eine Flüssigkeit getaucht, so erleidet jedes Teilchen seiner Oberfläche einen seiner Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel entsprechenden Druck. Die auf die Seitenflächen wirkenden wagrechten Druckkräfte, welche paarweise einander gleich und entgegengesetzt sind, heben sich gegenseitig auf; dagegen ist der Druck, welcher auf die untere Endfläche nach aufwärts wirkt, größer als der Druck, den die obere Endfläche nach abwärts erleidet; jener ist nämlich gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule ($ABEF$), welche sich von der unteren, dieser gleich dem Gewichte einer Säule ($CDEF$), welche sich von der oberen Endfläche bis zum Spiegel erhebt. Es bleibt also ein nach aufwärts gerichteter Druck übrig, welcher dem Überschuß des ersteren Gewichtes über das letztere oder, was dasselbe ist, dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule ($ABCD$) gleichkommt, welche denselben Raum einnimmt wie der untergetauchte Körper. Dieser nach aufwärts gerichtete Druck wirkt dem Gewichte des Körpers entgegen und läßt ihn daher um so viel leichter erscheinen. Wir sind hiermit zu dem nach seinem Entdecker benannten Archimedischen Prinzip gelangt: Ein in eine Flüssigkeit getauchter Körper verliert durch den Druck der umgebenden Flüssigkeit scheinbar so viel von seinem Gewichte, als das Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge beträgt. Um diesen Satz durch einen Versuch zu bestätigen, bedient man sich der hydrostatischen Wage (Fig. 68), d. h. einer Wage, deren eine Schale unten mit einem Häkchen versehen und kürzer aufgehängt ist, um ein Gefäß mit Flüssigkeit darunter stellen zu können;

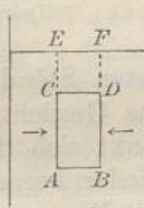


Fig. 67.
Archimedisches
Prinzip.

an das Häkchen hängt man mittels eines feinen Drahtes einen Metallzylinder und stellt auf die Wagschale einen Hohlzylinder, welcher von dem massiven Zylinder genau ausgefüllt wird; während dieser frei in der Luft schwebt, bringt man die Wage durch Gewichte, welche man auf die andere Seite legt, ins Gleichgewicht. Taucht man nun den Zylinder in das Wasser eines untergestellten Gefäßes, so verliert er an Gewicht, und die kürzere Wagschale steigt; das Gleichgewicht stellt sich aber vollkommen wieder her,

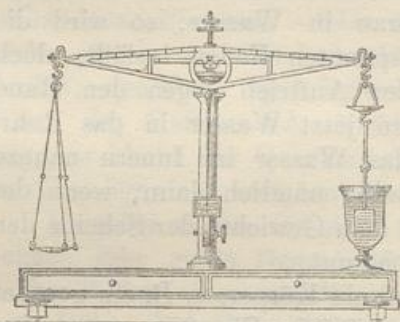


Fig. 68.
Hydrostatische Wage.

wenn man den auf der Wagschale stehenden Hohlzylinder bis zum Rande mit Wasser füllt. Man sieht also, daß der Gewichtsverlust des untergetauchten Körpers durch das Gewicht einer Flüssigkeitsmenge von gleichem Rauminhalte genau aufgewogen wird.

Man stelle ferner ein mit Wasser gefülltes Gefäß auf die eine Schale einer gewöhnlichen Wage, den leeren Hohlzylinder nebst Tara bis zum Einspielen auf die andere Schale, und senke den an einem festen Ständer aufgehängten Vollzylinder in das Wasser. Obgleich das Gewicht des Zylinders von dem Ständer völlig getragen wird, senkt sich die Wage auf dieser Seite; das Gleichgewicht wird aber wieder hergestellt, wenn man den Hohlzylinder auf der anderen Seite mit Wasser vollfüllt. Taucht man also einen Körper in eine Flüssigkeit, so gewinnt diese scheinbar soviel an Gewicht, als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit beträgt (Umkehrung des Archimedischen Satzes). Es steigt nämlich das Wasser im Gefäß so hoch, als ob man bei Abwesenheit des Körpers eine ihm an Rauminhalt gleiche Wassermenge zugegossen hätte, und der eingetauchte Körper, indem er dem Druck der umgebenden Flüssigkeit allseitig einen gleichgroßen Gegendruck entgegensetzt, wirkt wie ein an seiner Stelle befindliches gleichgroßes Stück Wasser.

Der Archimedische Satz gilt übrigens nicht bloß für zylindrische oder prismatische, sondern für beliebig gestaltete Körper; denn man kann jeden Körper in dünne vertikale Prismen zerlegt denken, für deren jedes der Satz gilt, und demnach auch für ihre Gesamtheit. Mit völliger Allgemeinheit ergibt er sich auch aus folgender Überlegung. Wenn ein Körper vom Gewicht P in einer Flüssigkeit um die Strecke h herabsinkt, so wird gleichzeitig ein gleiches Volumen Flüssigkeit vom Gewicht Q ebenso hoch gehoben, und die Fallarbeit Ph des Körpers allein wird um die zu dieser Hebung erforderliche Arbeit Qh vermindert. Die schließlich geleistete Arbeit ist also dieselbe, als ob der Körper mit dem Gewicht $P - Q$ durch die Strecke h frei herabgefallen wäre.

64. Bestimmung des Volumens. Spezifisches Gewicht (Dichte).

Hängt man an die kürzere Schale der hydrostatischen Wage mittels eines feinen Drahtes oder Haares einen Körper (welcher für sich im Wasser untersinken würde), so geben die Gewichtsstücke, welche man bis zum Einspielen der Wage auf die andere Schale legen muß, das Gewicht des Körpers (in Grammen) an. Nun werde der Körper in Wasser getaucht und die Wage durch Auflegen von Gewichtsstücken auf die kürzere Schale ins Gleichgewicht gebracht; die hier aufgelegten Gewichte geben den erlittenen Gewichtsverlust, d. h. das Gewicht einer dem Körper an Rauminhalt gleichen Wassermenge an; da jedes Kubikzentimeter Wasser 1 g wiegt, so beträgt das verdrängte Wasser, also auch der Rauminhalt des untergetauchten Körpers selbst, so viele Kubikzentimeter, als der Gewichtsverlust Gramm beträgt (vorbehaltlich einer kleinen Korrektur wegen der Ausdehnung des Wassers durch die Wärme); auf diese Weise läßt sich also der Rauminhalt (das Volumen) eines noch so unregelmäßig gestalteten Körpers mit großer Genauigkeit ermitteln. Durch dasselbe Verfahren ergibt sich auch sofort das spezifische Gewicht des Körpers, d. h. das Verhältnis seines Gewichtes zu dem Gewichte eines gleichen Volumens Wasser, oder die Zahl, welche angibt, wievielmals schwerer der Körper ist, als ein gleiches Volumen Wasser von 4° C.; man braucht ja nur, um diese Verhältniszahl zu finden, das Gewicht des Körpers, welches durch die auf der tiefer hängenden Wagschale liegenden Gewichte gegeben ist, zu dividieren durch den Gewichtsverlust, welcher durch die auf die kürzer aufgehängte Schale aufgelegten Gewichte dargestellt ist. Auch das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten läßt sich mittels der hydrostatischen Wage leicht finden. Man bringt nämlich einen unter der kürzeren Wagschale aufgehängten beliebigen Körper, z. B. ein Glasstück, in der Luft durch auf die andere Wagschale gelegte Gewichte (Tara) ins Gleichgewicht und bestimmt nun seinen Gewichtsverlust zuerst in der zu untersuchenden Flüssigkeit und dann in Wasser; jener Verlust, durch diesen dividiert, gibt das gesuchte spezifische Gewicht. Die Gewichtsverluste, welche ein und derselbe Körper in verschiedenen Flüssigkeiten erleidet, stehen offenbar in demselben Verhältnis wie deren spezifische Gewichte. Auf diesen Satz gründet sich die Mohrsche Wage (Fig. 69); an dem einen Arm des Wagebalkens hängt mittels eines feinen Platindrahtes das Senkgläschen *A*, ein zugeschmolzenes, zum Teil mit Quecksilber gefülltes oder ein kleines Thermometer enthaltendes Glasröhrchen, welches durch die Wagschale *B* gerade im Gleichgewicht gehalten wird. Die Gewichte bestehen aus hakenförmig gebogenen Messingdrähten *P*, von denen zwei gleichviel und zwar genau so viel wiegen, wie der Gewichtsverlust des Senkgläschens im Wasser ausmacht, während ein drittes $\frac{1}{10} P$, ein viertes $\frac{1}{100} P$ wiegt. Der Arm des Wagebalkens, an welchem das Senkgläschen hängt, ist in zehn gleiche Teile geteilt. Will man nun das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit bestimmen, so bringt man sie in das Standgefäß *CC* und taucht

das Senkgläschen in sie ein. Ist die Flüssigkeit z. B. konzentrierte Schwefelsäure, so muß man, um das Gleichgewicht herzustellen, das eine Gewicht P an das Ende h des Wagebalkens, das andere Gewicht P bei 8, das Gewicht $\frac{1}{10} P$ bei 4 und das Gewicht $\frac{1}{100} P$ wieder bei 8 anhängen und hat hiermit das spezifische Gewicht der Schwefelsäure = 1,848 gefunden.

Aber auch ohne Benutzung des Archimedischen Prinzips kann man das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten und festen Körpern bestimmen (und zwar sehr genau) mit Hilfe des Pyknometers (Tariierfläschchens), eines 8 bis 20 ccm fassenden Glasfläschchens (Fig. 70), dessen eingetriebener Stöpsel aus einem Stück Thermometer-
röhre verfertigt ist, damit bei etwaiger Erwärmung ein Teil der

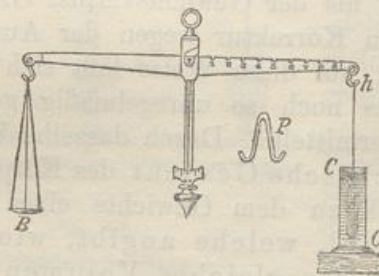


Fig. 69.
Mohrsche Wage.



Fig. 70.
Pyknometer.

Flüssigkeit durch die feine Öffnung austreten könne, ohne den Stöpsel zu heben oder das Gefäß zu gefährden. Wägt man das tarierte Fläschchen zuerst mit der Flüssigkeit, deren spezifisches Gewicht bestimmt werden soll, sodann mit Wasser gefüllt, so erfährt man das spezifische Gewicht sofort durch Division des ersten Gewichtes durch das zweite. Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester Körper wägt man zuerst das Fläschchen mit Wasser gefüllt, legt den in Stückchen von Schrotgröße zerkleinerten Körper daneben auf die nämliche Wagschale, bringt die Wage abermals zum Einspielen und erfährt dadurch sein Gewicht. Wirft man nun die Stückchen in das Fläschchen, so muß notwendig soviel Wasser ausfließen, als von den hineingeworfenen Stückchen verdrängt wird, und man erfährt durch eine abermalige Wägung des sorgfältig abgetrockneten Fläschchens, wieviel eine den Körperstückchen an Rauminhalt gleiche Wassermenge wiegt.

Die folgende Tabelle enthält die spezifischen Gewichte einiger fester und flüssiger Körper.

A. Feste Körper:			
Iridium	22,4	Messing	8,38
Platin (gewalzt)	21,50	Eisen (geschmiedet)	7,79
Gold (gehämmert)	19,32	Eisen (gegossen)	7,21
Blei (gegossen)	11,37	Zinn (gegossen)	7,29
Silber (gegossen)	10,50	Zink (gegossen)	7,10
Kupfer (gegossen)	8,93	Antimon	6,62
		Schwerspat	4,48
		Diamant (höchstens)	3,53

Flintglas	3,33	Lindenholz	0,60
Flußspat	3,15	Lithium	0,59
Marmor	2,84	Pappelholz	0,38
Kalkspat	2,70	Kork	0,24
Bergkristall	2,65		
Aluminium	2,60		
Flaschenglas	2,64		
Spiegelglas	2,45		
Porzellan	2,40		
Gips (kristallisiert)	2,32		
Schwefel (natürlich)	2,07		
Elfenbein	1,92		
Phosphor	1,83		
Magnesium	1,74		
Buchsbaumholz	1,33		
Ebenholz	1,23		
Eichenkernholz	1,17		
Bernstein	1,08		
Wachs, weißes	0,97		
Natrium	0,98		
Eis	0,92		
Kalium	0,87		
Buchenholz	0,80		

B. Flüssige Körper:

Quecksilber	13,596
Schwefelsäure (konzentriert)	1,84
Salpetersäure	1,52
Chloroform	1,49
Schwefelkohlenstoff	1,27
Glyzerin	1,26
Salzsäure	1,21
Milch	1,03
Meerwasser	1,02
Leinöl	0,95
Oliveneröl	0,91
Petroleum	0,89
Terpentinöl	0,87
Benzol	0,87
Alkohol	0,79
Äther	0,72

Mit dem Ausdruck „Dichte“ bezeichnet man die Masse der Volumeneinheit eines Körpers. Im absoluten Maßsystem, in dem die Masse eines Kubikzentimeters Wasser als Masseneinheit gilt, bezeichnen die obigen Zahlen auch unmittelbar die Dichten.

Spezifisches Volumen heißt das Volumen der Masseneinheit; es ist sonach der umgekehrte Wert der Dichte.

65. **Schwimmen.** Ein untergetauchter Körper, dessen Gewicht demjenigen der verdrängten Flüssigkeitsmenge genau gleich ist, verliert sein ganzes Gewicht und schwebt daher in der Flüssigkeit ohne Bestreben, zu sinken, oder zu steigen; ist sein Gewicht größer, so wird er untersinken; ist es kleiner als dasjenige der verdrängten Flüssigkeit, so steigt er in die Höhe, taucht teilweise aus der Oberfläche empor und schwimmt nun an der Oberfläche, sobald der Auftrieb von seiten der Flüssigkeit, nämlich das Gewicht der von seinem untergetauchten Teil verdrängten Flüssigkeitsmenge, dem ganzen Gewicht des Körpers gleich und dieses sonach zu tragen imstande ist. Dieser Satz kann mit Hilfe des Gefäßes Fig. 71, welches mit einem seitlichen Abflußröhrchen versehen ist, leicht bewiesen werden. Nachdem das Gefäß bis zur inneren Öffnung des Röhrchens mit Wasser gefüllt ist, senkt man den schwimmenden Körper langsam und vorsichtig ein; durch das Röhrchen wird alsdann das verdrängte Wasser in ein untergestelltes Becherglas abfließen. Bringt man jetzt dieses Glas, welches vorher tariert worden, auf die eine, den abgetrockneten Schwimmer auf die andere Schale einer Wage, so spielt diese ein und zeigt somit, daß der schwimmende Körper ebenso schwer ist, wie das von seinem untergetauchten Teil verdrängte Wasser.

Das nach abwärts ziehende Körpergewicht greift im Schwerpunkt S (Fig. 72) des schwimmenden Körpers, der Auftrieb im Schwerpunkt A der verdrängten Flüssigkeit an. Diese beiden entgegengesetzten Kräfte heben sich auf, und der Körper schwimmt im Gleichgewicht, wenn diese beiden Punkte in derselben Vertikalen liegen. Sie bilden dagegen ein Kräftepaar, welches den Körper zu drehen sucht, wenn man ihn aus der Gleichgewichtslage herausbringt; dabei bleibt der Schwerpunkt des Körpers an seiner Stelle (z. B. bei einem Schiff, dessen Querschnitt Fig. 72 darstellt, in S auf der nunmehr geneigten Mittellinie), der Schwerpunkt der verdrängten Wassermenge, die nun eine andere Gestalt angenommen hat, rückt seitwärts nach A' . Trifft die durch A' gezogene Vertikale die Mittellinie in einem Punkte M oberhalb des Schwerpunktes S , so ist ersichtlich, daß das Kräftepaar den Körper in die frühere Lage zurückzudrehen sucht; der Körper schwimmt im stabilen Gleichgewicht. Liegt dagegen M unterhalb S , so wird der Körper durch das Kräftepaar umgestürzt

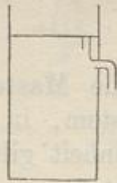


Fig. 71.

Zum Schwimmen der Körper.

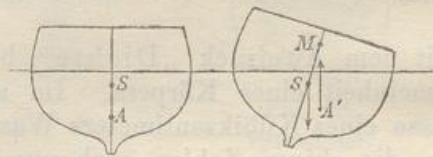


Fig. 72.

Metazentrum.

und sucht eine neue Gleichgewichtslage auf. Den Schnittpunkt M der Richtung des Auftriebs mit der Mittellinie nennt man das Metazentrum. Das Gleichgewicht des schwimmenden Körpers ist stabil, wenn sein Schwerpunkt unter dem Metazentrum, labil, wenn er oberhalb liegt, und indifferent, wenn das Metazentrum mit dem Schwerpunkt zusammenfällt, wie z. B. bei einer homogenen Kugel.

66. Aräometer. Man kann das verschieden tiefe Eintauchen eines und desselben Körpers beim Schwimmen in verschiedenen Flüssigkeiten benutzen, um das spezifische Gewicht der Flüssigkeiten zu messen. Derartige Vorrichtungen nennt man Aräometer oder Senkwagen. Die gebräuchlichen Skalenaräometer (Fig. 73) bestehen aus einem hohlen zylindrischen Glaskörper, der mit Schrot oder Quecksilber passend beschwert ist und nach oben in eine überall gleich dicke zylindrische Röhre (x) ausläuft. In dieser Röhre befindet sich die Skala, an der man die Tiefe des Eintauchens abliest. Sie kann so geteilt werden, daß sie unmittelbar die spezifischen Gewichte angibt; bei solchen Aräometern, welche man Densimeter nennt, sind die Teilstriche nicht mehr gleich weit voneinander entfernt, sondern rücken nach dem unteren Ende der

Skala immer näher zusammen. Im täglichen Verkehr wünscht man durch das Aräometer nicht sowohl das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit zu erfahren, als vielmehr ihren Prozentgehalt an denjenigen Bestandteilen, welche ihren Kaufwert bedingen. Der käufliche Weingeist z. B. ist ein Gemisch von Wasser und Alkohol und ist um so wertvoller, je mehr Prozente er von letzterem enthält. Zu seiner Prüfung verfertigt man daher Aräometer, deren Skala unmittelbar die Prozente Alkohol angeben, und nennt dieselben Alkoholometer. Solche Prozentaräometer sind unter dem Namen Alkalimeter, Säuremesser, Salzspindeln, Milchwagen, Mostwagen usw. im Gebrauch; jedes derselben kann natürlich nur zur Untersuchung derjenigen Flüssigkeit dienen, für welche es besonders verfertigt ist. Außer den genannten gibt es noch Aräometer mit willkürlicher Skala, deren Teilstriche man „Grade“ nennt. Dahin gehören namentlich die Aräometer von Beaumé, Beck, Cartier u. a., welche unmittelbar weder über das spezifische Gewicht, noch über den Prozentgehalt der Flüssigkeit Auskunft geben; um diese zu erfahren, muß man sich einer Tabelle bedienen; gleichwohl sind dieselben am weitesten verbreitet. — Da das spezifische Gewicht der Flüssigkeiten mit der Temperatur sich ändert, so sind die Angaben der Aräometer selbstverständlich nur bei derjenigen Temperatur richtig, bei welcher sie verfertigt sind, die daher auf dem Instrument angegeben sein muß. Um zugleich die Temperatur der untersuchten Flüssigkeit ablesen und danach die Angabe des Aräometers verbessern zu können, ist häufig ein Thermometer in dasselbe eingeschmolzen, dessen Kugel zugleich das beschwerte untere Ende des Aräometers bildet.

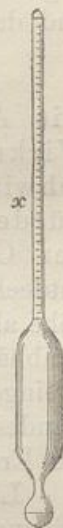


Fig. 73.
Skalen-
aräometer.

67. **Ausfließen der Flüssigkeiten.** Bringt man in der Wand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes an einer Stelle, auf die die Flüssigkeit mit dem Drucke P drückt, eine Öffnung an, so spritzt die Flüssigkeit durch sie heraus mit einer Geschwindigkeit, die um so größer ist, je größer P ist, wie wir an jeder Wasserspritze beobachten. Man kann sich die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von dem Drucke leicht durch folgende Überlegung klar machen. Der Druck der Flüssigkeit preßt die in der Öffnung enthaltene Flüssigkeitsmenge durch die Öffnung hindurch und leistet dabei eine gewisse Arbeit. Ist P der Druck, d. h. die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft, und ist ω der Querschnitt der Öffnung, ϵ die Dicke der Wand, so ist $P\omega\epsilon$ die auf die Flüssigkeit in der Öffnung wirkende Kraft, $P\omega\epsilon s$ die Arbeit bei der Verschiebung dieser Flüssigkeitsmasse durch die Wand hindurch. Diese Arbeit erzeugt die lebendige Kraft, mit der die Flüssigkeit aus der Öffnung heraustritt. Ist s das spezifische Gewicht der Flüssigkeit, so ist $s\omega\epsilon$ die Masse der Flüssigkeit in der Öffnung, und ist v die Austrittsgeschwindigkeit, so ist

Lommel, Experimentalphysik. 14. bis 16. Aufl.

$$\rho \cdot F = P \quad 8$$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = P \rho$$

oder

$$v = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

Rührt der Druck P von dem Gewicht der über der Öffnung liegenden Flüssigkeitssäule von der Höhe h her, so ist $P = h \rho g$ und daher

$$v = \sqrt{2gh}$$

Die Ausflußgeschwindigkeit einer Flüssigkeit unter der Wirkung ihrer eigenen Schwere ist also gleich der Geschwindigkeit, welche ein freifallender Körper erlangen würde, wenn er vom Flüssigkeitsspiegel bis zum Niveau der Öffnung herabfiel. Nach diesem von Torricelli (1644) entdeckten Satze ist die Ausflußgeschwindigkeit nur von der Druckhöhe abhängig und der Quadratwurzel derselben proportional, dagegen unabhängig von der Beschaffenheit der Flüssigkeit, so daß z. B. Weingeist, Wasser, Quecksilber bei gleicher Höhe des Flüssigkeitsstandes gleich schnell ausfließen. Diese Folgerungen werden durch die Erfahrung bestätigt.

Läßt man den Flüssigkeitsstrahl mittels einer in die Ausflußöffnung eingesetzten, nach oben umbogenen Röhre aufwärts strömen (Springbrunnen), so sollte nach Torricellis Lehrsatz der Strahl bis zu der Druckhöhe, von welcher die Flüssigkeit herabkommt, emporspringen; er erreicht jedoch kaum $\frac{9}{10}$ dieser Höhe, da Reibung an der Wand der Röhre, Luftwiderstand und die zurückfallenden Tropfen die Geschwindigkeit vermindern.

Die Ausflußmenge pro Sekunde wird in Kubikzentimetern ausgedrückt gefunden, wenn man den in Quadratcentimetern gegebenen Querschnitt der Öffnung mit der nach dem obigen Gesetz aus der Druckhöhe in Zentimetern berechneten Ausflußgeschwindigkeit multipliziert. Die wirkliche Ausflußmenge beträgt aber nur etwa $\frac{2}{3}$ (genauer 62 Proz.) von der so berechneten, weil der ausfließende Strahl nicht den Querschnitt der Öffnung behält, sondern sich infolge der im Gefäß stattfindenden seitlichen Zuströmung der Flüssigkeit nach dem Austritt bis zu einem Querschnitt von etwa $\frac{2}{3}$ der Öffnung zusammenzieht (Zusammenziehung des Flüssigkeitsstrahls, Contractio venae).

68. **Ausfließen durch Röhren.** Der Torricellische Satz gilt nur für das Ausströmen durch Öffnungen in dünner Wand, deren Ränder keinen erheblichen Reibungswiderstand verursachen. Strömt die Flüssigkeit z. B. durch eine am Boden angebrachte horizontale Röhre (Fig. 74) aus, so nimmt der Druck bei gleichförmigem Fließen vom Ansatzpunkte a der Röhre bis zu ihrer Mündung o gleichmäßig ab, wie man an dem Stand der Flüssigkeit in den vertikalen Röhren erkennt, welche in die horizontale Röhre in gleichen Ab-

ständen eingesetzt sind; denn die Gipfel der Flüssigkeitssäulen liegen in der geraden Linie ob , so daß auf gleich lange Rohrstücke gleiche Druckunterschiede kommen, welche die Fallarbeit liefern, die zur Überwindung der Reibung in jedem Rohrstück erforderlich ist. Demnach wird die Fallarbeit durch die Höhe ab (Widerstandshöhe) zur Überwindung des Reibungswiderstandes in der ganzen Röhre verbraucht, und nur die Fallarbeit durch die noch darüber befindliche Höhe bc (Geschwindigkeitshöhe) erzeugt die Wucht der ausströmenden Flüssigkeit.

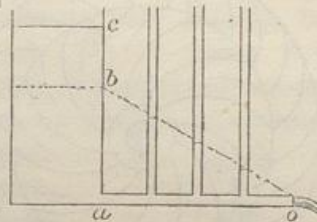


Fig. 74.

Ausfließen durch eine Röhre.

Dieses Beispiel zeigt, daß der Druck der strömenden Flüssigkeit, der hydrodynamische Druck, kleiner ist als der Druck der ruhenden Flüssigkeit, der hydrostatische Druck. Indem sich die potentielle Energie der ruhenden Flüssigkeit in die kinetische Energie der strömenden Flüssigkeit verwandelt, nimmt der Flüssigkeitsdruck, der diese Arbeit leistet, um den in der Volumeneinheit enthaltenen Betrag an kinetischer Energie ab. Ist μ die Dichtigkeit, v die Geschwindigkeit der Flüssigkeit, so ist der hydrodynamische Druck gleich dem hydrostatischen vermindert um $\frac{1}{2} \mu v^2$.

69. **Reaktion ausströmender Flüssigkeiten.** Bringt man in der Seitenwand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes eine Ausflußöffnung an, so vermindert sich der Druck der Flüssigkeit auf diese Wand um denjenigen Anteil, welcher auf den Querschnitt der Öffnung treffen würde, während die gegenüberliegende Wand noch den vollen Druck der Flüssigkeit erleidet. Es bleibt also ein Überschuß von Druck auf letztere Wand, vergleichbar dem Rückstoß eines Geschützes, übrig, welcher dem Druck, der die Flüssigkeit ausströmen macht, als Gegenwirkung (Reaktion) gleichkommt, und das Gefäß, wenn dasselbe beweglich, z. B. auf einen Schwimmer von Kork aufgesetzt ist, in einer der Ausströmung entgegengesetzten Richtung zurücktreibt. Hierauf beruht das Segnersche Reaktionsrad (Fig. 75);

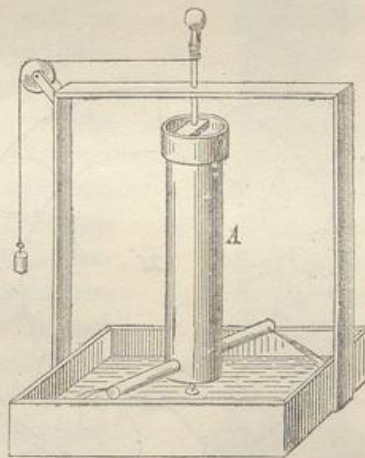


Fig. 75.

Segners Reaktionsrad.

an einem um eine lotrechte Achse drehbaren Gefäß (A) sind unten wagrechte Ansatzröhren mit seitlichen Öffnungen angebracht; gießt man Wasser in das Gefäß, so dreht es sich in der den ausströmenden Wasserstrahlen entgegengesetzten Richtung. Eine für die praktische Anwendung brauchbare Ausgestaltung hat derselbe Grundsatz in der Konstruktion der Turbinen gefunden. Die Turbinen sind wagrechte, unter dem Spiegel des Gefälles liegende Wasserräder.

Die Fourneyronsche Turbine (Fig. 76) besteht aus zwei konzentrisch ineinanderliegenden Rädern, von welchen das innere festliegende, das Leitrad *B*, das von oben zufließende Wasser entlang seinen gekrümmten Schaufeln senkrecht gegen die ebenfalls gekrümmten Schaufeln des Turbinenrades *A* leitet. Dieses wird durch den Stoß des ankommenden und den Rückstoß des an seinem Rand ausströmenden Wassers in der Richtung des Pfeils umgedreht. Bei den neueren Francis-Turbinen ist die Anordnung umgekehrt. Das Wasser strömt durch den als Leitrad dienenden, feststehenden äußeren Schaufelkranz ein und versetzt das innen liegende Laufrad in Drehung.



Fig. 76.
Fourneyrons Turbine.

70. Wassermotoren. In anderer Weise wird durch die gewöhnlichen vertikalen Wasserräder mit horizontaler Achse die in einem Wasserfälle vorhandene Energie in nutzbare Arbeit umgesetzt. Das unterschlächtige Wasserrad in seiner neueren Form (Fig. 77) trägt an seinem Umfang Schaufeln, mit welchen es unten in das dem Radumfang sich anschmiegende Gerinne taucht. Es wird vornehmlich durch

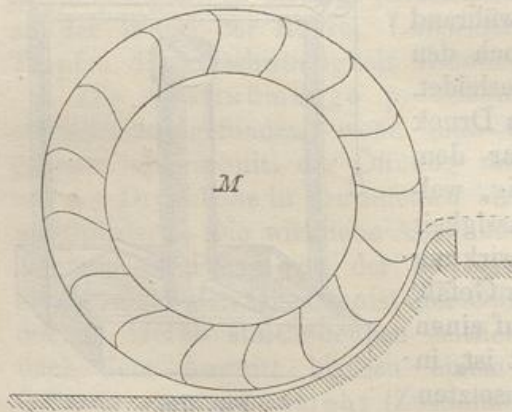


Fig. 77.
Unterschlächtiges Wasserrad.

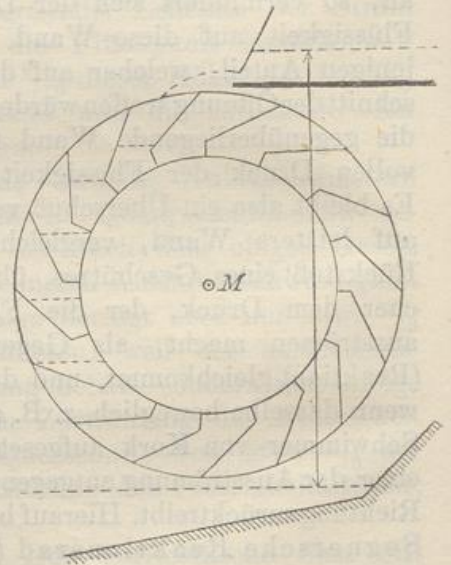


Fig. 78.
Oberschlächtiges Wasserrad.

den Stoß des fließenden Wassers gegen die Schaufeln in Bewegung gesetzt, indem dieses einen Teil seiner beim Herabfließen erlangten Geschwindigkeit an das Rad abgibt. Man benutzt es vorzugsweise, wenn eine große Wassermenge von geringem Gefälle zu Gebote steht. Beim

überschlächtigen Wasserrad (Fig. 78), welches bei geringer Wassermenge und größerem Gefälle zur Anwendung kommt, strömt das Wasser von oben her auf den mit Zellen besetzten Radkranz und dreht das Rad, indem es die nach aufwärts gekehrten Zellen der Vorderseite füllt, vorzugsweise durch sein Gewicht. Die Arbeit, welche ein Gefälle pro Sekunde zu leisten vermag (der Effekt), ist gleich der Arbeit, welche erfordert würde, um das in dieser Zeit herabgeflossene Wassergewicht von dem unteren Wasserstand wieder bis zum oberen zu heben. Sie wird daher, in Meterkilogrammen ausgedrückt, gefunden, wenn man dieses Wassergewicht (in Kilogrammen) mit der (nach Metern gemessenen) Höhe des Gefalles (Stauhöhe) multipliziert. Diese Arbeitsfähigkeit kann jedoch, abgesehen von den Verlusten durch Reibung, schon darum nicht vollständig nutzbar gemacht werden, weil das Wasser niemals seine ganze durch den Fall erlangte Geschwindigkeit an das Rad abgibt, sondern vom Radkranz noch mit einer Geschwindigkeit abfließt, welche derjenigen des Radumfangs mindestens gleich ist. Die überschlächtigen Räder liefern 70—80 Proz. der berechneten Leistung; auch für die unterschlächtigen Räder kann der Wirkungsgrad bei zweckmäßiger Anlage bis auf 80 Proz. steigen. Bei Turbinen soll er nicht unter 70 Proz. liegen und kann unter günstigen Verhältnissen bis zu 85 Proz. steigen.

71. Zusammendrückbarkeit (Kompressibilität) der Flüssigkeiten. Die Flüssigkeiten sind durch äußere Kräfte so wenig zusammendrückbar, daß man sie lange Zeit für unzusammendrückbar gehalten hat (57). Die Florentiner Akademiker (1661) bearbeiteten eine mit Wasser gefüllte und dann zugelötete Silberkugel mit dem Hammer. Da bei der geringsten Formänderung einer Hohlkugel ihr Rauminhalt kleiner wird, so hätte das Wasser in ihr zusammengedrückt werden müssen. Es ergab sich jedoch, daß bei jedem Hammerschlag Wasser durch die Silberhülle drang und dieselbe außen mit feinen Tröpfchen betaute, woraus geschlossen wurde, daß das Wasser eher durch eine Metallwand dringe, als sich zusammenpressen lasse. Canton (1761) war der erste, der bewies, daß auch die Flüssigkeiten zusammendrückbar sind. Da ein Gefäß einem einseitigen Druck von innen elastisch nachgibt, und sich erweitert, so muß man, um die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten nachzuweisen und zu messen, einen ebenso starken Druck auf die äußere Gefäßwand wirken lassen, damit der Rauminhalt des Gefäßes ungeändert bleibe. Oersted (1822) bediente sich hierzu des folgenden Verfahrens. Die

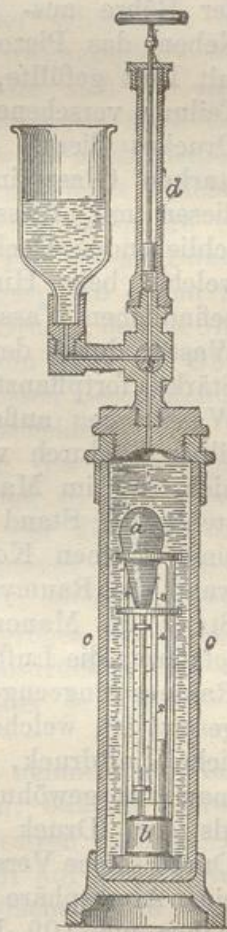


Fig. 79.
Piezometer.

Flüssigkeit befindet sich in einem birnförmigen Glasgefäß (*a*, Fig. 79) mit angeschmolzener enger Glasröhre, dem Piezometer; auf der Röhre wird eine Teilung angebracht und genau festgestellt, wie sich der Rauminhalt eines zwischen zwei Teilstrichen befindlichen Röhrenstücks zum Inhalt des ganzen Gefäßes verhält. Nachdem das Piezometer mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, z. B. reinem, ausgekochtem Wasser, gefüllt worden, stellt man es mit dem offenen Ende der Röhre nach unten in ein Gefäß mit Quecksilber (*b*) und bewirkt durch Erwärmen und Abkühlen, daß ein wenig Wasser aus der Röhre aus- und dafür etwas Quecksilber in dieselbe eintritt. Neben das Piezometer stellt man noch eine überall gleich weite, mit Luft gefüllte, unten offene und oben zugeschmolzene, mit einer Teilung versehene Glasröhre, die als „Manometer“ zur Messung des Druckes dient. Die ganze Vorrichtung stellt man nun in einen starken Glaszylinder *cc* (Oersteds Kompressionsapparat), füllt diesen mit Wasser und preßt dann mittels einer auf dem festschließenden Deckel angebrachten Druckpumpe noch mehr Wasser, welches beim Hinaufgehen des Pumpenkolbens aus einem daneben befindlichen Wasserbehälter angesaugt wird, hinein. Da der auf das Wasser durch den Kolben ausgeübte Druck sich allseitig mit gleicher Stärke fortpflanzt, so wird das Piezometer durch das umgebende Wasser von außen ebenso stark gedrückt, wie durch das Quecksilber hindurch von innen. Man sieht nun, daß das Quecksilber nicht nur im Manometerrohr, sondern auch in der Piezometeröhre steigt; der Stand des Quecksilbers im Piezometer gibt alsdann nach einer kleinen Korrektur wegen der Zusammendrückung der Glaswand die Raumverminderung des in ihm enthaltenen Wassers, der Stand im Manometer den ausgeübten Druck an; ist nämlich in letzterem die Luft auf $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ usf. ihres anfänglich innegehabten Raumes eingeeengt worden, so weiß man, daß sie einem Druck ausgesetzt ist, welcher zwei-, drei-, viermal so groß ist wie der anfängliche Luftdruck, also 2, 3, 4 usw. „Atmosphären“ beträgt, wenn man den gewöhnlichen Luftdruck, welcher 1 kg auf 1 qcm beträgt, als den Druck „einer Atmosphäre“ bezeichnet (vgl. 82 und 84). Durch solche Versuche hat man gefunden, daß bei 0° durch den Druck einer Atmosphäre Quecksilber um 3, Wasser um 50, Weingeist um 84, Äther um 109 Milliontheile seines ursprünglichen Rauminhalts zusammengedrückt wird. Hört der Druck auf, so nimmt die Flüssigkeit sofort ihren früheren Raum wieder ein.

72. **Kohäsion der Flüssigkeiten.** Ungeachtet der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen einer Flüssigkeit ist zwischen ihnen doch noch molekulare Anziehungskraft, die Kohäsion, tätig. Wenn man in einer oben geschlossenen Glasröhre möglichst luftfreies Wasser über Quecksilber hat, so kann man auf das Quecksilber eine beträchtliche Saugwirkung, also einen negativen Druck, oder einen Zug auf das Wasser ausüben, ohne daß die Flüssigkeitssäule zerreißt oder von der Wand abreißt (Helmholtz, 1882).

Die Molekularkraft, mit welcher zwei Teilchen aufeinander wirken, nimmt mit ihrer Entfernung sehr rasch ab und wird schon in sehr geringem Abstand unmerklich. Denkt man sich um ein Teilchen mit diesem Abstand als Radius eine Kugel beschrieben, so umschließt diese Kugel, die Wirkungssphäre, alle jene Teilchen, welche auf das im Mittelpunkt gelegene Teilchen noch einwirken. Liegt das Teilchen im Innern der Flüssigkeit, so heben sich die Wirkungen von je zwei in bezug auf den Mittelpunkt symmetrisch liegenden Teilchen gegenseitig auf, und das betrachtete Teilchen erleidet von den Molekularkräften eine nach allen Seiten gleiche Spannung. Liegt das Teilchen dagegen an der Oberfläche der Flüssigkeit, so ist bloß die eine Hälfte der Wirkungssphäre von wirksamen Teilchen erfüllt, deren Anziehungskräfte sich zu einer Mittelkraft zusammensetzen, die senkrecht zur Oberfläche nach dem Innern der Flüssigkeit gerichtet ist. Eine solche, wenn auch kleinere, nach innen gerichtete Mittelkraft wirkt auch noch auf jedes Teilchen, welches um weniger als den Halbmesser der Wirkungssphäre von der Oberfläche absteht. Die der Oberfläche nahen Teilchen sind daher bis zu einer Tiefe gleich dem Radius der Wirkungssphäre einem zur Oberfläche senkrechten nach einwärts gerichteten Druck, dem Kohäsionsdruck, unterworfen und bilden gleichsam ein über die Oberfläche gespanntes dünnes, elastisches Häutchen, dessen Beschaffenheit sich von derjenigen der inneren Flüssigkeit unterscheidet.

Da der Kohäsionsdruck aus der Einwirkung der umgebenden Teilchen auf die Teilchen der Grenzschicht entspringt, so fällt er verschieden aus, je nach der räumlichen Anordnung der Teilchen, d. h. je nachdem die Fläche eben oder konkav oder konvex ist. Ist die Oberfläche der Flüssigkeit nach außen hin konkav, so ist der Kohäsionsdruck kleiner, ist sie konvex, so ist er größer als für eine ebene Fläche. Diese Veränderungen des Kohäsionsdruckes sind um so größer, je stärker die Fläche gekrümmt oder je kleiner ihr Krümmungsradius ist.

Unterliegt die Flüssigkeit der Schwere, so nehmen im Ruhezustande ihre Teilchen eine solche Anordnung an, daß die Schwerkraft keines der Teilchen mehr in Bewegung zu setzen vermag. Die freie Oberfläche der Flüssigkeit muß daher überall auf der Richtung der Schwerkraft senkrecht stehen; die freie Oberfläche ist in diesem Falle eine horizontale Ebene. Entzieht man dagegen die Flüssigkeit der Einwirkung der Schwere, bringt man z. B. eine Ölmasse in ein Gemisch von Alkohol und Wasser von gleichem spezifischem Gewicht, wobei sie durch den Auftrieb ihr ganzes Gewicht verliert, so verschieben sich unter dem Einfluß der Molekularkräfte die Teilchen so lange, bis der Kohäsionsdruck in allen Teilen der Oberfläche gleich groß ist. Das ist der Fall, wenn die Krümmung der Oberfläche an allen Seiten gleich, wenn also die Oberfläche eine Kugel ist. Der Kohäsionsdruck bewirkt also, daß die Flüssigkeitsmasse diejenige Form annimmt, bei welcher ihre Oberfläche so klein wie

möglich ist. Zwei Tropfen vereinigen sich, sobald sie in Berührung kommen, zu einem einzigen, dessen Oberfläche offenbar kleiner ist, als die der getrennten Tropfen war. Dieses Bestreben der Oberflächenschicht, sich auf eine möglichst kleine Fläche zusammenzuziehen, bezeichnet man als Oberflächenspannung.

73. Flüssigkeitshäutchen. Blasen. Taucht man Drahtgerüste, welche die Kanten von Polyedern (z. B. Tetraeder, Würfel usw.) nachahmen, in Seifenwasser und zieht sie langsam heraus, so bildet die an den Kanten haftende Seifenlösung dünne ebene Häutchen, welche im Innern des Gerüsts sich in scharfen geradlinigen Kanten durchschneiden. Diese zierlichen Figuren entstehen durch das Streben der Molekularkräfte, die kleinste Oberfläche herzustellen; man nennt sie Gleichgewichtsfiguren (Plateau), weil bei ihnen dieses Ziel erreicht ist und die Oberflächenspannungen sich gegenseitig das Gleichgewicht halten.

Eine kugelförmige Blase dagegen ist keine Gleichgewichtsfigur. Hat man eine Seifenblase mit Tabaksrauch gefüllt, so strömt unter dem Druck, welchen die flüssige Hülle auf ihren Inhalt ausübt, die Luft samt dem Rauch aus dem offenen Glasrohr, an welchem die Blase noch hängt, und zwar so heftig, daß durch den Luftstrom eine Kerzenflamme zur Seite geblasen wird; dabei verkleinert sich die Blase mehr und mehr; sie behält dagegen ihre Größe bei, wenn man die Mündung des Röhrchens zuhält, weil alsdann der Überdruck der im Innern zusammengepreßten Luft der Oberflächenspannung das Gleichgewicht hält.

Die Entstehung dieses Überdruckes aus dem Kohäsionsdruck in den Oberflächenschichten des Flüssigkeitshäutchens kann man leicht ableiten, wenn man sich vergegenwärtigt, daß das Flüssigkeitshäutchen einer Seifenblase von zwei Kugelflächen von sehr nahe gleichem Radius begrenzt wird, die in bezug auf die Flüssigkeit entgegengesetzte Krümmung haben; denn die äußere Fläche ist eine konvexe, die innere eine konkave Flüssigkeitsoberfläche. Der Überdruck der Luft im Innern ist daher nichts anderes als das Maß für die Differenz des Kohäsionsdruckes an der konvexen und der konkaven Fläche von gleicher Krümmung und ist, da die Änderung des Kohäsionsdruckes mit der Krümmung proportional geht, der Krümmung der Seifenblase direkt, oder ihrem Radius umgekehrt proportional, $P = 2H/R$, wenn H/R die von der Krümmung herührende Änderung des Kohäsionsdruckes für eine einzelne, kugelförmig gestaltete Fläche bedeutet.

Statt des Kohäsionsdruckes kann man sich auch der Vorstellung der Oberflächenspannung als einer innerhalb der Oberfläche in tangentialer Richtung wirkenden Kraft bedienen, um die Erscheinungen darzustellen. Wenn eine Seifenlamelle in einem ebenen viereckigen Drahtrahmen ausgespannt ist, so zieht sie an der Umgrenzung mit einer Kraft, die, weil die Lamelle zwei Oberflächen hat, das Doppelte von der in jeder einzelnen Fläche wirkenden Spannung ist. Bedeutet α diese Zugkraft der einzelnen Oberfläche für die Längeneinheit der Begrenzung, so ist für eine Seite des Drahtvierecks von der Länge L die Zugkraft αL . Ist die Seite beweglich und wird sie von der Spannung der Lamelle um die Strecke l nach innen gezogen, so daß sich die Oberfläche um die Fläche Ll verkürzt, so leistet die Oberflächenspannung eine Arbeit αLl für jede Oberfläche. Man kann also sagen, die Konstante α bedeutet die Zugkraft der Oberflächenspannung für die Längeneinheit, oder auch die Arbeit der Molekularkräfte bei der Verminderung der Fläche um die Flächeneinheit.

Denkt man sich nun den Radius R einer Seifenblase um die kleine Strecke r verkleinert, so verkleinert sich hierbei sowohl die äußere als die innere Oberfläche um

$$4\pi R^2 - 4\pi (R - r)^2 = 4\pi (R^2 - R^2 + 2Rr - r^2) = 4\pi r(2R - r),$$

wofür man, wenn r gegen $2R$ sehr klein ist, ohne merklichen Fehler $8\pi Rr$ setzen kann. Die Verkleinerung für beide Flächen zusammen beträgt demnach $16\pi Rr$, und die von der Oberflächenspannung geleistete Gesamtarbeit $16\pi Rr\alpha$. Andererseits läßt sich diese Arbeit als gegen den inneren Überdruck P geleistet darstellen durch den Ausdruck $4\pi R^2 P r$. Man hat also

$$4\pi R^2 P r = 16\pi Rr\alpha,$$

woraus für beide Flächen zusammen folgt: $P = \frac{4\alpha}{R}$, und für jede einzelne

$$p = \frac{2\alpha}{R}. \quad \text{Die Konstante } \alpha \text{ ist also } = H/2.$$

74. **Adhäsion. Randwinkel.** Auch zwischen Flüssigkeiten und festen Körpern wirkt molekulare Anziehung, welche man Adhäsion nennt.

Die Wassertröpfchen, mit welchen sich eine Fensterscheibe betaut, haften an ihr durch Adhäsion; diese ist auch die Ursache, daß Wasser, welches man aus einem Trinkglas ausgießen will, so leicht an der äußeren Wand herabläuft. Wasser, auf eine reine Glasplatte gebracht, zerfließt auf ihr und benetzt sie; Quecksilber dagegen benetzt die Glasplatte nicht, sondern bildet auf ihr abgerundete Tropfen, und ebenso verhält sich Wasser auf einer mit Fett bestrichenen Oberfläche. Im ersteren Falle ist offenbar die Adhäsion des Wassers zum Glas größer als die Kohäsion der Wasserteilchen unter sich, während im zweiten Falle die Kohäsion des Quecksilbers seine Adhäsion zum Glas oder die Kohäsion des Wassers seine Adhäsion zum Fett übertrifft. Man kann daher beim Ausgießen von Wasser das Herablaufen an der äußeren Gefäßwand verhüten, wenn man den Rand des Glases mit Fett bestreicht.

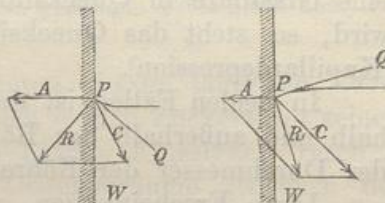


Fig. 80.
Randwinkel.

Steht eine Flüssigkeit mit einer festen Wand in Berührung, so zeigt die Flüssigkeit an der Berührungsstelle eine eigentümliche Krümmung. Auf ein der Wand anliegendes Flüssigkeitsteilchen P (Fig. 80) wirken nämlich außer der Schwerkraft noch einerseits die Adhäsion mit einer zur Wand senkrechten Kraft A nach auswärts, und die Kohäsion mit einer in die Flüssigkeit einwärts gerichteten Kraft C . In P kann die Flüssigkeit nur im Gleichgewicht sein, wenn sich ihre Oberfläche daselbst senkrecht zu der Mittelkraft R aus diesen Kräften in die Richtung PQ gestellt hat. Den Winkel QPW , welchen die Flüssigkeitsoberfläche mit der Wandfläche bildet, nennt man den Randwinkel; da seine Größe nur abhängt von dem Verhältnis der wirkenden Kräfte, so ist er bei gleichbleibender Beschaffenheit von Flüssigkeit und Gefäßwand unveränderlich. Je nachdem die Resultante R nach auswärts in die Gefäßwand hinein

oder nach einwärts in die Flüssigkeit hinein gerichtet ist, muß die Flüssigkeit am Rand höher oder tiefer stehen als in der Mitte, wo sie ihre zu Schwerkraft und Kohäsionsdruck senkrechte horizontale Oberfläche beibehält. So steht Wasser in einem Glas an der Wand etwas höher, Quecksilber etwas tiefer als in der Mitte. Man sagt im ersteren Falle, daß die Flüssigkeit die Gefäßwand benetzt, im zweiten Falle, daß sie sie nicht benetzt. Vollkommene Benetzung findet statt, wenn sich die Gefäßwand mit einer dünnen Flüssigkeitsschicht überzieht. Der Randwinkel ist dann gleich null.

75. Kapillarität. Wird eine enge Glasröhre (Kapillar- oder Haarröhrchen) in Wasser getaucht, so steigt das Wasser in ihr in die Höhe und bleibt innerhalb der Röhre höher stehen als außerhalb. Ebenso stellt sich in kommunizierenden Röhren, deren eine sehr eng ist, das Wasser in letzterer höher, entgegen den hydrostatischen Gesetzen.

Diese Erhebung (Kapillarattraktion) findet immer statt, wenn das Röhrchen von der Flüssigkeit benetzt wird; taucht man dagegen eine Glasröhre in Quecksilber, von welchem das Glas nicht benetzt wird, so steht das Quecksilber in der Röhre tiefer als außerhalb (Kapillardepression).

In beiden Fällen ist der Höhenunterschied der Flüssigkeit innerhalb und außerhalb der Röhre in demselben Verhältnis größer, als der Durchmesser der Röhre kleiner ist.

Diese Erscheinungen, welche man unter der Bezeichnung Kapillarität zusammenfaßt, erklären sich aus dem Zusammenwirken von Kohäsion und Adhäsion auf folgende Weise.

Da sich die Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche in der Nähe der Gefäßwand nur auf eine sehr geringe Entfernung erstreckt, so bleibt in einem weiten Gefäß die Oberfläche der Flüssigkeit in der Mitte eben und wagrecht; in einer engen Röhre dagegen, in welcher sich die Krümmung bis zur Mitte oder darüber hinaus geltend macht, muß die Flüssigkeitsoberfläche im Fall der Benetzung die Form einer vertieften (konkaven) Schale annehmen, im Fall der Nichtbenetzung aber eine gewölbte (konvexe) Kuppe bilden. Man nennt eine solche gekrümmte Oberfläche einer Flüssigkeit in enger Röhre „Meniskus“. In einer solchen gekrümmten Oberfläche ist aber, wie wir wissen, der Kohäsionsdruck kleiner oder größer als in einer ebenen Fläche, je nachdem die Oberfläche konkav oder konvex gekrümmt ist. In einem benetzten Haarröhrchen, in welchem die konkave Seite der Flüssigkeit nach oben gerichtet ist, besteht daher eine negative Druckdifferenz zwischen der konkaven Fläche innerhalb und der ebenen außerhalb des Röhrchens, und nach hydrostatischen Prinzipien muß die Flüssigkeit so weit emporsteigen, bis der Druck der gehobenen Flüssigkeitssäule dieser Differenz der Oberflächenspannung das Gleichgewicht hält. Ebenso begreift man, daß in der nicht benetzten Röhre die nach unten gerichtete Spannung der gewölbten Kuppe die Flüssigkeitssäule hinabdrängt. Da dieser mole-

kuläre Druck mit der Krümmung der Oberfläche wächst, diese Krümmung aber um so stärker ausfällt, je enger die Röhre ist, so sieht man auch ein, daß der Betrag der Hebung oder Senkung im umgekehrten Verhältnis zum Durchmesser des Röhrehens stehen muß. Die Steighöhe in vollständig benetzten Röhren ist nicht von dem Material der Röhren, wohl aber von der Natur der Flüssigkeit abhängig; in einer Röhre von 1 mm Durchmesser erreicht Wasser 30 mm, Schwefelsäure 17, Alkohol 12, Äther 9 mm Höhe.

In vollständig benetzter Röhre, wo der Randwinkel Null ist, bildet die Oberfläche eine nach oben konkave Halbkugel vom Radius R der Röhre, welche pro Flächeneinheit einen Zug $2\alpha/R$ nach oben ausübt, und dadurch dem hydrostatischen Druck hs , der die gehobene Flüssigkeitssäule von der Höhe h und dem spezifischen Gewichte s nach unten treibt, das Gleichgewicht hält. Man hat daher $hs = 2\alpha/R$, oder $h = 2\alpha/Rs$. Die Größe α , die Kapillaritätskonstante, kann nach Messung von h , R und s aus vorstehender Gleichung gefunden werden. — Zwischen zwei parallelen ebenen Platten ist die Erhebung ihrem Abstände R umgekehrt proportional, und zwar ist $hs = \alpha/R$. Stoßen die beiden Platten mit ihren vertikalen Kanten unter einem Winkel zusammen, so daß ihr Abstand mit der Entfernung von der gemeinschaftlichen Kante proportional zunimmt, so erscheint die gehobene Flüssigkeit oben von einer gleichseitigen Hyperbel begrenzt.

Die Wirkungen der Kapillarität treten uns im täglichen Leben vielfach entgegen. Taucht man ein Stück weißen Zuckers mit seinem unteren Ende in Kaffee, so steigt die braune Flüssigkeit rasch in ihm empor; die zahlreichen feinen Zwischenräume zwischen den kleinen Kristallen bilden nämlich ein vielverzweigtes Netz von Kapillarröhrchen. Ein auf feuchtem Grund aufgeschütteter Sandhaufen wird aus derselben Ursache bis in seine Spitze hinauf durchfeuchtet. Das Aufsaugen von Flüssigkeiten durch Löschpapier, Schwämme und andere poröse Körper, sowie das Aufsteigen des Öls in den Lampendochten beruht ebenfalls auf Kapillarität.

76. Zähigkeit. Innere Reibung. Wenn man eine Flüssigkeit mit einem Löffel oder einem anderen Gegenstande umzurühren versucht, so empfindet man einen Widerstand, der bei verschiedenen Flüssigkeiten von sehr verschiedener Größe ist. Man unterscheidet zähe Flüssigkeiten, wie Sirup, Glyzerin, im Gegensatz zu leicht beweglichen Flüssigkeiten, wie Äther oder Wasser. Doch ist dieser Unterschied nur ein solcher des Grades. Alle Flüssigkeiten besitzen eine gewisse Zähigkeit oder Viskosität. Sie ist charakterisiert durch den Umstand, daß eine bewegte Flüssigkeitsmasse eine ruhende Flüssigkeitsmasse, an der sie tangential entlang gleitet, mit sich fortzubewegen sucht. Wenn z. B. eine kreisrunde, horizontale Glas- oder Metallscheibe in einer Flüssigkeit drehende Schwingungen um eine vertikale, durch ihren Mittelpunkt gehende Achse ausführt, so werden auch die anliegenden Flüssigkeitsschichten in mitschwingende Bewegung versetzt. Ebenso kommt eine Flüssigkeit in einem zylindrischen Gefäß allmählich in Drehung, wenn das Gefäß um seine Achse in gleichförmige Umdrehung versetzt wird. Hängt man in

die Flüssigkeit einen zweiten Zylinder in konzentrischer Lage, so kommt auch dieser in Rotation, und es muß auf ihn ein entgegengerichtetes Drehungsmoment von bestimmter Größe ausgeübt werden, um diese Mitdrehung zu verhindern. Bei solchen gleitenden Bewegungen üben also die schneller bewegten Schichten der Flüssigkeit auf die langsamer bewegten eine beschleunigende, und umgekehrt, die langsameren auf die schnelleren Schichten eine verzögernde Wirkung aus. Diese tangential Zugkraft ist um so größer, je stärker in der Flüssigkeit die Änderung der Geschwindigkeit in der Richtung senkrecht zur Bewegung ist. In dem Falle der konzentrischen Zylinder z. B. muß das Drehungsmoment, das den zweiten Zylinder in Ruhe erhalten soll, um so größer sein, je größer die Geschwindigkeit des ersten Zylinders und je kleiner der Abstand zwischen beiden Zylinderflächen ist. Unter gleichen Umständen aber hat diese Zugkraft für jede Flüssigkeit einen bestimmten charakteristischen Betrag, durch den die Größe der „Zähigkeit“ oder der „inneren Reibung“ der Flüssigkeit ausgedrückt wird (Reibungskoeffizient). In Glyzerin z. B. ist diese Kraft 300 mal größer, in Äther 4 mal kleiner als in Wasser. Bei dieser Übertragung von Bewegung durch Reibung geht, geradeso wie beim unelastischen Stoß, stets Bewegungsenergie verloren; dafür entsteht Wärme (s. 127). Infolge dieses Verlustes an Bewegungsenergie sind die oben erwähnten Schwingungen einer Scheibe gedämpft, d. h. ihre Schwingungsweiten nehmen stetig ab, um so schneller je größer die Zähigkeit der Flüssigkeit ist. Aus der Abnahme der Schwingungsweiten läßt sich die Größe des Reibungskoeffizienten berechnen. Eine andere Methode zur Bestimmung dieser Größe beruht auf der Messung der Geschwindigkeit, mit der eine Flüssigkeit unter gegebenem Druck durch ein sehr enges Rohr hindurchströmt.

77. Auflösung. Unter „Lösungen“ versteht man allgemein homogene Gemenge zweier Substanzen, d. h. solche Gemenge, bei welchen durch mechanische Mittel keine Trennung der Bestandteile erzielt werden kann. Manche Flüssigkeiten mischen sich in diesem Sinne vollständig, z. B. Wasser und Alkohol, oder Wasser und Schwefelsäure. Auch feste Körper können sich in Flüssigkeiten so verteilen, „sich auflösen“, daß sie mit der Flüssigkeit ein gleichartiges flüssiges Ganzes bilden. Solche Gemische nennt man Lösungen des betreffenden Körpers in der Flüssigkeit; letztere nennt man das Lösungsmittel. Zucker, Kochsalz, Salpeter z. B. lösen sich in Wasser, Schellack in Weingeist, Gold in Quecksilber und aus der Lösung scheiden sich diese Körper beim Verdampfen des Lösungsmittels unverändert wieder ab. Bei höherer Temperatur vermögen die Flüssigkeiten meist größere Mengen der in ihnen löslichen Körper aufzunehmen als bei niedriger; heißes Wasser z. B. löst mehr Salpeter auf als kaltes, wogegen Kochsalz in kaltem wie in heißem Wasser etwa gleich gut löslich ist. Eine Lösung, welche von dem aufgelösten Körper so viel enthält, als sie bei der stattfindenden Temperatur

aufzunehmen imstande ist, heißt gesättigt. Aus einer heißgesättigten Salpeterlösung muß sich daher beim Erkalten ein Teil des gelösten Salzes in festem Zustand abscheiden, wobei die Flüssigkeit für den niedrigeren Wärmegrad, auf welchen sie abgekühlt wird, gesättigt bleibt.

Der Vorgang der Auflösung eines festen Körpers in einer Flüssigkeit hat große Ähnlichkeit mit dem weiter unten zu behandelnden Vorgange der Verdampfung. Auch für jeden als Dampf einen Raum erfüllenden Stoff besteht ein von der Temperatur abhängiger Sättigungspunkt, ein Maximum der erreichbaren Dichte.

Es kann jedoch auch vorkommen, daß trotz Abkühlung unter den Sättigungspunkt keine Abscheidung des festen Körpers eintritt; die Lösung ist alsdann übersättigt, und die Abscheidung erfolgt erst dann und zwar plötzlich, wenn durch Erschütterung, durch Hineinwerfen eines Kristalls der gelösten Substanz u. dgl. der Anstoß dazu gegeben wird. Eine bestimmte Löslichkeit besitzen nur kristallisationsfähige Körper (Kristalloide), wie z. B. die oben genannten Salze. Nicht kristallisierbare Körper, wie Leim, Gummi, Eiweiß u. dgl. (Kolloide) sind in jeder beliebigen Menge des Lösungsmittels löslich, oder quellen wenigstens mit geringen Mengen der Flüssigkeit gallertartig auf.

Bei der Auflösung fester Körper in Flüssigkeiten und der Mischung zweier Flüssigkeiten findet in der Regel eine Änderung des Volumens statt; z. B. Alkohol und Wasser miteinander gemischt, ziehen sich auf ein kleineres Volumen zusammen (Kontraktion) und erwärmen sich dabei.

78. Diffusion. Osmose. Schichtet man zwei mischbare Flüssigkeiten vorsichtig so übereinander, daß die leichtere auf der schwereren schwimmt, z. B. Alkohol über Wasser, so findet auch in diesem Falle, ohne daß äußere Kräfte (z. B. Rühren) oder die Schwerkraft die Flüssigkeiten in Bewegung setzen, eine allmählich fortschreitende, schließlich vollständige Mischung der beiden Flüssigkeiten statt. Diesen Vorgang der Mischung zweier Flüssigkeiten durch fortschreitenden Austausch von Schicht zu Schicht nennt man Diffusion. Nicht mischbare Flüssigkeiten diffundieren nicht, sondern lagern sich nach der Ordnung ihrer spezifischen Gewichte dauernd übereinander, wie z. B. Öl und Wasser.

Der gegenseitige Austausch zweier miteinander mischbarer Flüssigkeiten kann auch durch eine feinporöse Scheidewand hindurch stattfinden. Man nennt diesen Vorgang Osmose (Dutrochet, 1826). In dem Hals eines Fläschchens, dessen Boden abgesprengt ist, werde mittels eines durchbohrten Korkes eine Glasröhre befestigt und der fehlende Boden durch eine darübergebundene Schweinsblase ersetzt. Dieses mit einer Flüssigkeit, z. B. Weingeist, gefüllte Gefäß werde in ein weiteres, Wasser enthaltendes Gefäß eingesenkt. Man wird nun bemerken, daß der Weingeist in der Röhre allmählich bis zu einer Höhe von 40 bis 50 cm steigt. Es

ist demnach Wasser durch die Blase zu dem Weingeist in das Gefäß der Schwerkraft entgegen hineingedrungen (Endosmose); andererseits aber ist auch Weingeist aus dem Gefäß zu dem Wasser herausgetreten (Exosmose), wie man leicht an der Färbung des Wassers bemerkt, wenn der angewendete Weingeist gefärbt war. Das Steigen der Flüssigkeit in der Röhre beweist, daß mehr Wasser zu dem Weingeist durch die Blase hinein- als Weingeist zu dem Wasser heraustrat. Ersetzt man aber die Schweinsblase durch eine Kautschukplatte, so findet man, daß mehr Weingeist zum Wasser wandert als umgekehrt. Es kommt also bei diesem Austausch wesentlich auf die Beschaffenheit der Scheidewand an.

Ein exaktes Maß für die bei derartigen Vorgängen wirkenden Kräfte erhält man in denjenigen Fällen, in denen es möglich ist, eine Scheidewand anzuwenden, welche nur den einen der beiden diffundierenden Stoffe durchläßt. Man stellt solche „halbdurchlässigen“ Wände dadurch her, daß man eine poröse Tonzelle zunächst mit einer Lösung von Kupfersulfat tränkt, dann sorgfältig ausspült und sie darauf mit einer Lösung von Ferrocyankalium anfüllt. Es bildet sich alsdann auf und in der Tonwand der Zelle eine zusammenhängende Decke von Ferrocyankupfer, welche wohl für Wasser, aber z. B. nicht für die Zuckerteilchen einer Zuckerlösung durchlässig ist. Füllt man nun eine so vorbereitete Zelle mit einer Zuckerlösung, verschließt sie mit einem Stopfen, der ein Steigrohr enthält, und taucht sie in reines Wasser, so vollzieht sich der Diffusionsvorgang in diesem Falle ausschließlich in einer Richtung, indem nämlich Wasser in die Zelle eintritt und die Lösung in dem Steigrohr allmählich bis zu einer bestimmten, von ihrer Konzentration abhängigen Höhe ansteigt. Ist diese erreicht, so besteht Gleichgewicht; es tritt kein Wasser mehr in die Zelle ein, noch aus ihr aus. Man kann denselben Gleichgewichtszustand auch dadurch erreichen, daß man von vornherein durch einen auf die freie Oberfläche der Lösung ausgeübten Druck das Aufsteigen der Flüssigkeit verhindert; dazu ist dann ein ganz bestimmter, der Konzentration der Lösung proportionaler Druck erforderlich. Diesem Druck, bzw. dem Gewicht der gehobenen Flüssigkeitssäule wird offenbar das Gleichgewicht gehalten durch einen in der Lösung von den aufgelösten Zuckerteilchen ausgeübten Gegen-
druck. Man nennt diesen Druck, mit dem die Zuckerteilchen gewissermaßen die freie Oberfläche der Lösung emportreiben und das Wasser zum Nachströmen durch die halbdurchlässige Membran veranlassen, den osmotischen Druck des Zuckers in der Lösung. Er wird gemessen durch den hydrostatischen Druck, der ihm das Gleichgewicht hält (Pfeffer, 1877). In einer einprozentigen Zuckerlösung ist der osmotische Druck bei 0° gleich dem Druck einer Quecksilbersäule von 49,3 cm Höhe; in einer einprozentigen Salpeterlösung beträgt er sogar mehr als 228 cm Quecksilberhöhe (3 Atmosphären). Ist die Lösung in einer gewöhnlichen Tonzelle eingeschlossen, so sucht der osmotische Druck nicht bloß das Volumen der Lösung dadurch

zu vergrößern, daß er die Flüssigkeitskuppe in die Höhe drückt und dadurch das Wasser in die Zelle hineinzieht, sondern er treibt auch die Moleküle des gelösten Stoffes durch die Wand in das Lösungsmittel hinein.

In derselben Weise wirkt der osmotische Druck als treibende Kraft bei dem Vorgange der gewöhnlichen Diffusion (s. o.), wenn wir z. B. reines Wasser über eine konzentrierte Zucker- oder Salzlösung schichten. In allen diesen Fällen können wir den osmotischen Druck als Äußerung der Expansivkraft des gelösten Stoffes, seines Bestrebens, ein möglichst großes Volumen des Lösungsmittels auszufüllen, ansehen und können ihn in engste Parallele zu der Expansivkraft und dem Druck der Gase stellen, die wir im nächsten Kapitel behandeln.

Im alltäglichen Leben begegnen uns mancherlei Beispiele osmotischer Wirkung. Bohnen und Erbsen, welche man in Wasser „einweicht“, quellen auf, weil mehr Wasser durch die Zellhäute in die Zellen eindringt, als von dem Zellinhalt heraustritt. Bestreut man einen in Scheiben geschnittenen Rettich mit Kochsalz, so „zieht er Wasser“; die wässerige in den Zellen enthaltene Flüssigkeit tritt nämlich in größerer Menge zu der konzentrierten Salzlösung heraus, welche sich bei der Berührung des Salzes mit den feuchten Schnittflächen gebildet hat. Die Osmose spielt im Leben der Pflanzen und Tiere eine überaus wichtige Rolle; denn der Austausch der Säfte zwischen den rings geschlossenen Zellen und Blutgefäßen kann nur osmotisch durch deren Wandungen hindurch erfolgen. Graham hat gezeigt, daß Körper, welche im festen Zustand kristallinisch sind, und die er deshalb Kristalloidsubstanzen nennt, wie z. B. Zucker, Salze usw., viel leichter durch eine poröse Scheidewand hindurchgehen als gewisse nicht kristallisierbare Körper, wie Leim, Eiweiß, Gummi, Karamel, lösliche Kieselsäure u. a., welche mit Wasser gallertartige Massen bilden und von Graham Kolloidsubstanzen genannt werden. Man kann sich dieses Verhaltens bedienen, um Körper von beiden Arten, welche miteinander gemischt sind, durch Osmose voneinander zu trennen. Man nennt dieses Verfahren Dialyse und führt dasselbe aus mittels des Dialysators, eines flachen Gefäßes aus Hartkautschuk, dessen Boden aus Pergamentpapier besteht; diese Vorrichtung läßt man in einem eine beträchtliche Menge Wassers enthaltenden Gefäß schwimmen. Gießt man nun in den Dialysator z. B. eine aus Gummi und Zucker gemischte Lösung, so wird der Zucker nach einiger Zeit fast vollständig durch das Pergamentpapier in das Wasser übergegangen sein, während im Dialysator eine fast reine Gummilösung zurückbleibt.