Mechanik.

A. Allgemeine Grundbegriffe.

§ 7. Die Grundlage der Mechanik, d. h. der Lehre vom Gleichgewicht und von der Bewegung der Körper, bilden die 3 **Newtonschen Bewegungsgesetze,** von denen übrigens die beiden ersten schon Galilei bekannt waren:

1) Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung, solange keine neue Kraft eine Änderung dieses Zustandes bewirkt.

Dieses sogenannte Trägheitsgesetz (Trägheit = Beharrungsvermögen) ist eine Erfahrungstatsache und erklärt es z. B., warum man in einem Eisenbahnzuge etc. nach vorn fällt, wenn er plötzlich hält.

2) Die Änderung der Bewegung ist proportional der einwirkenden Kraft und erfolgt geradlinig zu dieser.

Ein starker Stoß bringt z. B. einen größeren Ausschlag eines Pendels hervor als ein schwacher. Da beim Zusammenwirken mehrerer Kräfte jede einzelne derselben ohne Rücksicht auf die anderen bezw. auf eine bereits vorhandene Bewegung ihren Einfluß ausübt, so heißt das Gesetz auch Unabhängigkeitsprinzip.

3) Wenn zwischen zwei Körpern Kräfte tätig sind, so ist ihre Wirkung stets wechselseitig und gleichgroß. (Actioni aequalis est reactio).

Dieses Prinzip der Wechselwirkung besagt z. B., daß ein Brett ebenso stark ein auf ihm liegendes Gewicht drückt, wie umgekehrt; daß die Wagen eines Zuges die Lokomotive ebenso stark anziehen, wie diese die Wagen etc. Bei ungleichen Kräften kommt es natürlich zu einer fortschreitenden Bewegung in der Richtung der stärkeren, d. h. also, das Brett wird zerdrückt, die Wagen werden fortgezogen etc. Immer ist aber hierbei ein Teil der stärkeren Kraft durch das Maximum der schwächeren neutralisiert.

Zum genaueren Verständnis dieser Bewegungsgesetze ist es nun nötig, die in ihnen enthaltenen Begriffe einzeln zu betrachten.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0012-3
DFG

§ 8. **Ruhe** ist Negation der Bewegung. Da nun überall bewegende Kräfte existieren, so ist Ruhe vorhanden, wenn die einwirkenden Kräfte einander aufheben. Es gibt aber keine absolute Ruhe, nur relative. Fährt man z. B. in einem Wagen, so kann man in Beziehung auf diesen in Ruhe sein. Der Wagen aber bewegt sich auf der Erde, diese dreht sich um sich selbst und um die Sonne, und auch das ganze Sonnensystem zeigt eine fortschreitende Bewegung. In gewissem Sinne ist also alles in Bewegung (*πάντα ῥεῖ* des HERAKLIT). Bei der Bewegung kommt in Betracht die

§ 9. **Geschwindigkeit,** d. i. der Weg, der in einer bestimmten Zeit (in der Regel 1 Sekunde) durchlaufen wird. Sie ist um so größer, ein je längerer Weg in derselben Zeit zurückgelegt wird, andererseits um so kleiner, je mehr Zeit man dazu braucht. Daher sagt man, Geschwindigkeit ist direkt proportional dem Wege, umgekehrt proportional der Zeit; mathematisch[1] ausgedrückt:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Daraus folgt: $s = v\,t \quad t = \frac{s}{v}.$

Einheit der Geschwindigkeit ist die, bei der die Einheit des Weges (1 cm) in der Zeiteinheit (1 Sek.) zurückgelegt wird.

Eine Geschwindigkeit kann nun gleichförmig sein, wenn sie in jedem Augenblick gleichgroß ist, oder ungleichförmig. Die ungleichförmige Geschwindigkeit muß nach dem ersten Bewegungsgesetze durch Kräfte bedingt sein, die entweder eine Beschleunigung oder eine Verlangsamung bewirken. Letztere kann auch negative Beschleunigung genannt werden.

§ 10. **Beschleunigung** ist demnach der Zuwachs an Geschwindigkeit bezogen auf die Zeit. Sie ist nämlich um so größer, je größer die resultierende Geschwindigkeit ist, und in je kürzerer Zeit dies geschieht.

$$a = \frac{v}{t}.$$

Einheit der Beschleunigung ist die, bei der die Einheit der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit erreicht wird. Die Beschleunigung kann ebenfalls wieder gleichförmig oder ungleichförmig sein. Eine gleichförmige Beschleunigung ist z. B. beim freien Fall vorhanden, eine gleichförmige Verlangsamung beim Wurf in die Höhe.

[1] Die üblichen Abkürzungen sind: v oder c für Geschwindigkeit (velocitas oder celeritas), a für Beschleunigung (acceleratio), g für Beschleunigung durch Erdanziehung (gravitas), s für Weg (spatium), t für Zeit (tempus).

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0013-8

Eine gleichförmig beschleunigte Bewegung kann man sich auch ersetzt denken durch eine Bewegung von mittlerer gleichförmiger Geschwindigkeit. Hat z. B. ein Körper zuerst die Geschwindigkeit 0, und steigt dieselbe innerhalb einer Sekunde an bis v, so ist das Resultat dasselbe, als hätte es sich mit der gleichförmigen Geschwindigkeit $\frac{v}{2}$ bewegt. Der Körper legt somit in 1 Sekunde $\frac{v}{2}$ cm zurück in t Sekunden $\frac{1}{2}vt$.

Die durch Druck oder Zug auf einem Körper entstehende Einwirkung bezeichnet man als Kraft.

§ 11. **Kraft** ist nach dem zweiten Newton'schen Gesetze Ursache einer Bewegungsänderung, und dadurch auch allein wahrnehmbar und meßbar. Bezeichnet man das Produkt aus Masse in ihre Geschwindigkeit $(m . v)$ als Bewegungsgröße, so ist eine Kraft proportional der Bewegungsgröße, die sie in der Zeiteinheit hervorbringen kann.

$$F = \frac{(m\,v)}{t}.$$

Da man $\frac{(m\,v)}{t}$ auch $m\frac{v}{t}$ schreiben kann, $\frac{v}{t}$ aber, wie gezeigt, = Beschleunigung ist, so kann man Kraft auch definieren als Produkt aus Masse und Beschleunigung [vgl. Anhang]. Allen Massen wird nun durch die Erde die Beschleunigung $g = 9{,}81$ erteilt [§ 17], d. h. sie werden von der Erde angezogen mit einer Kraft P (Pondus) $= m\,g$. Diese auf sie ausgeübte Kraft äußern sie durch den Druck auf ihre Unterlage, mit andern Worten durch ihr Gewicht. Daraus folgt: 1) Kräfte können durch Gewichte gemessen werden; als praktische Einheit[1] der Kraft wird daher in der Mechanik das Kilogramm benutzt, das somit das Gravitationsmaß der Kraft vorstellt; 2) daß die Gewichte den Massen proportional sind, da g für jeden Ort auf der Erde eine konstante Zahl ist.

Kräfte sind sogenannte gerichtete Größen, d. h. sie haben neben einer bestimmten Größe auch eine bestimmte Richtung. Daher lassen sie sich durch Linien von bestimmter Länge und Richtung graphisch darstellen. Wenn also eine Kraft positiv genannt wird, heißt die entgegengesetzt gerichtete Kraft negativ.

Die wichtigste Form der Kraft, auf die sich in letzter Linie alle anderen zurückführen lassen, ist die Anziehung und Abstoßung zweier Massen. Die Anziehung zwischen den Teilchen desselben Körpers heißt Kohäsion, zwischen zwei verschiedenen Körpern Adhäsion. Auf letzterer beruht z. B. das Leimen etc. Speziell die Anziehungs-

[1] Die absolute Krafteinheit ist die Dyne, über die Näheres im Anhang gesagt ist.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0014-4
DFG

kraft der Weltkörper heißt Gravitation, zu der auch die Anziehungskraft der Erde, die Schwerkraft, gehört. Nach NEWTON ziehen sich nun zwei Massen M und m in der Entfernung r an mit der Kraft

$$F = \frac{Mm}{r^2} k$$

wobei k, der sogen. Proportionalitätsfaktor, eine Zahl darstellt, die von der Natur der Körper abhängt. In Worten: die anziehende Kraft ist direkt proportional dem Produkt der Massen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung.

Das Wesen der Gravitation ist ein bisher ungelöstes Rätsel. Jedenfalls darf man sich dieselbe nicht als Fernwirkung vorstellen, d. h. als Wirkung durch den leeren Raum; denn ein solcher existiert nicht. Vielleicht ist die Gravitation wie alle scheinbaren Fernkräfte von gewissen Spannungszuständen des Äthers abhängig.

§ 12. **Arbeit** im physikalischen Sinne heißt das Produkt aus Kraft und dem von ihr zurückgelegten Weg.

$$A = Fs$$

Als praktisches Arbeitsmaß[1] gilt das Kilogrammmeter oder Meterkilogramm, d. i. also die Arbeit, welche geleistet wird, wenn 1 kg 1 m gehoben wird.

Die Arbeit wird $= 0$, wenn in dem Produkte Fs ein Faktor 0 wird. Hängt z. B. ein Gewicht an einem Faden, so wirkt hier zwar eine Kraft, nämlich die Anziehung der Erde, aber der Körper wird nicht verschoben. Folglich ist s und somit auch die geleistete Arbeit $= 0$.

Gewöhnlich wird auch als Beispiel angeführt, daß, wenn ein Gewicht im ausgestreckten Arme gehalten wird, im physikalischen Sinne keine Arbeit geleistet wird. Das ist falsch. Denn jede dauernde Muskelkontraktion (Tetanus) setzt sich aus einer Reihe von Zuckungen zusammen.

Es kann aber auch $F = 0$ werden, wie dies z. B. der Fall ist, wenn sich ein Gas in einen luftleeren Raum ausdehnt [vgl. auch § 18]; dann wird ebenfalls keine Arbeit geleistet.

§ 13. **Nutzeffekt** oder **Effekt** heißt die Arbeit, die in einer gegebenen Zeit geleistet wird. Als praktische Einheit[1] dient die Pferdekraft, d. i. eine Arbeit von 75 Meterkilogramm pro Sekunde. Sie entspricht ungefähr der Arbeitsleistung von kräftigen Männern in einer Sekunde.

---

[1] Die absoluten Einheitsmaße der Arbeit und des Effektes sind das Erg und Joule bezw. das Sekundenerg und Watt, über die Näheres im Anhang gesagt ist.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0015-0 DFG

§ 14. **Energie.** Die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu leisten, bezw. sein Arbeitsvorrat, wird Energie genannt, und zwar unterscheidet man aktuelle und potentielle Energie.

Aktuelle oder kinetische[1] Energie, Energie der Bewegung, auch wohl lebendige Kraft[2] genannt, ist die Energie, die ein Körper jeden Augenblick durch seine Bewegung besitzt. Sie entspricht der Arbeit, die er leistet, wenn er die Bewegung verliert.

Ein einfaches Beispiel ist eine abgeschossene Kanonenkugel, die durch ihre Bewegung befähigt wird, die dicksten Mauern zu zertrümmern. Als eine Form der Arbeit wird die kinetische Energie ausgedrückt durch $Fs = \frac{mv}{t} . s$. Da es sich hier nun um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt, bei der die Geschwindigkeit am Anfange 0, am Ende v ist, so ist hier nach § 10 $s = \frac{1}{2} vt$. Daraus folgt:

$$\text{kinetische Energie} = \frac{mv}{t} \cdot \frac{1}{2} vt = \frac{1}{2} mv^2.$$

Die kinetische Energie ist also direkt proportional der Masse und dem Quadrate der Geschwindigkeit. Bei der Wucht, wie die kinetische Energie auch noch genannt wird, spielt also die Geschwindigkeit des bewegten Körpers die Hauptrolle.

Potentielle Energie, auch Energie der Lage oder Spannkraft genannt, ist die zweite Form der Energie. Hier leistet ein Körper zwar noch nicht Arbeit, aber er besitzt vermöge seiner Lage oder Spannung die Möglichkeit (potentia), sie jeden Augenblick zu leisten. So erklären sich die Namen. Ein Stein auf dem Dache hat z. B. durch seine Lage zur Erdoberfläche potentielle Energie; denn wenn er fällt, kann er Arbeit leisten. Hieraus geht schon hervor, daß potentielle Energie eine relative Größe ist, da man ja von Lage eines Punktes immer nur in Beziehung auf einen andern sprechen kann. Also ein Stein auf dem Dache hat potentielle Energie in Bezug auf das Niveau der Erdoberfläche, ein Stein auf dieser potentielle Energie etwa in Bezug auf einen tiefen Schacht etc. Auch die Atome in einem Molekül besitzen potentielle Energie, wie sich dies besonders markant bei den explosiven Körpern zeigt. Wenn z. B. beim Schießpulver durch äußere Einwirkung die Moleküle gesprengt werden, so nehmen die Atome zueinander ganz andere Lagen ein;

---

[1] κινέω bewegen.

[2] Die „lebendige Kraft“ ist, streng genommen, keine Kraft, sondern eine Arbeit, ebenso wie die „Pferdekraft“ ein Effekt ist.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0016-5
DFG

es entstehen Gase mit großem Ausdehnungsbestreben, wodurch die Sprengwirkung erklärt wird. Auch eine gespannte Feder hat potentielle Energie.

Interessant ist der Gegensatz zwischen Tier- und Pflanzenwelt. Letztere bereitet durch Reduktionsprozesse Spannkräfte, die im tierischen Organismus durch Oxydation in kinetische Energie (Bewegung, Wärme, Elektrizität etc.) übergeführt werden.

§ 15. **Gesetz von der Erhaltung der Energie.** Diese beiden Formen der Energie sind der Ausdruck für alle existierenden Kräfte resp. Arbeitsleistungen. Wie die einzelnen Formen der kinetischen Energie ineinander übergeführt werden können, z. B. mechanische Arbeit in Wärme, so kann auch die kinetische Energie übergehen in potentielle, und umgekehrt. Nie aber kann Energie aus Nichts entstehen, nie kann bei solchen Umwandlungen ein Plus oder Minus an Energie resultieren. In einem abgeschlossenen System, z. B. im Sonnensystem, ist die Summe der kinetischen und potentiellen Energie eine konstante Größe. Die Vermehrung der einen von beiden Formen bedingt eine Verminderung der anderen. Dieses Gesetz, welches das schon durch die Erfahrung widerlegte Prinzip des Perpetuum mobile auch logisch für immer beseitigt, heißt das Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft, besser das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Zuerst ausgesprochen wurde es 1842 von Robert Mayer, einem Arzte in Heilbronn, mathematisch formuliert von Helmholtz.

Zwei Beispiele mögen es noch besser erläutern:

1) Wenn ein Pendel (Fig. 2) durch einen Stoß aus der Ruhelage AB gebracht wird und nach einer Seite schwingt, wird seine potentielle Energie, d. h. seine Entfernung von der Erde, größer. Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie muß seine kinetische Energie um ebensoviel kleiner werden. Das beweist auch die Erfahrung; denn nach einer gewissen Zeit bleibt der Pendel stehen, etwa in C. Dann kommt er wieder langsam in Bewegung und schwingt in umgekehrter Richtung ebenso weit über den Ruhepunkt hinaus, etwa bis D, und so fort. Bei C ist also die kinetische Energie $= 0$, die potentielle hat ihr Maximum erreicht. Bei der umgekehrten Bewegung wird die potentielle Energie kleiner, dafür wächst die kinetische, die dann in B ihr Maximum hat.

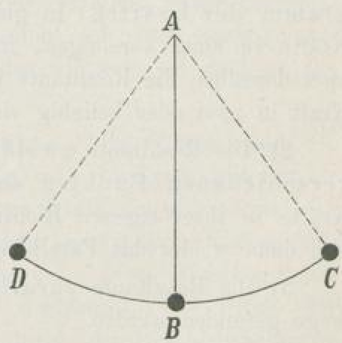

Fig. 2.

2) Die Planeten bewegen sich um die Sonne in elliptischen Bahnen. In der Sonnennähe, dem sogenannten Perihel, ist ihre potentielle Energie

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0017-1 DFG

klein, folglich muß ihre kinetische Energie groß sein, d. h. sie bewegen sich an dieser Stelle schnell. Fern von der Sonne, im Aphel, ist es natürlich umgekehrt. Daraus folgt ohne weiteres, daß ihre Verbindungslinien mit der Sonne, die Radii vectores, in gleichen Zeiten gleiche Flächen durchmessen (zweites Gesetz von Kepler).

B. Gesetze der festen Körper.

§ 16. **Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.** Für manche Betrachtungen ist es nötig, mehrere Kräfte durch eine einzige zu ersetzen und umgekehrt. Dies geschieht nach folgenden Grundsätzen:

1) Es handelt sich zunächst um zwei Kräfte, die an einem Punkte angreifen. Entweder haben sie genau die gleiche oder genau die entgegengesetzte Richtung. Im ersten Falle können sie ersetzt werden durch eine Kraft gleich ihrer Summe, im zweiten durch eine Kraft gleich ihrer Differenz. Zwischen diesen Extremen liegen noch viele andere Möglichkeiten, wenn nämlich die Kräfte miteinander einen Winkel bilden. In Punkt A (Fig. 3) greifen z. B. die Kräfte AB und AC an. Dann ist die Wirkung die gleiche, wie wenn allein die Kraft AD angegriffen hätte. AD heißt die Resultante, AB und AC die Komponenten. Die Resultante läßt sich nun leicht finden: sie ist die Diagonale des Parallelogramms, zu dem sich die ursprünglichen Kräfte vervollständigen lassen (Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte). In gleicher Weise kann man beliebig viele Kräfte zu einer vereinigen, indem man nacheinander immer zu je zwei derselben die Resultante konstruiert. Umgekehrt läßt sich jede Kraft in zwei oder beliebig viele Komponenten zerlegen.

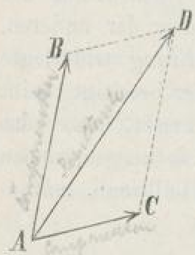

Fig. 3.

2) Die Resultante zweier nicht paralleler Kräfte, die an verschiedenen Punkten angreifen, findet man, wenn man die Kräfte in ihrer eigenen Richtung verschiebt, bis sie sich schneiden, und dann wieder das Parallelogramm der Kräfte konstruiert.

3) Die Resultante paralleler Kräfte kann nur auf einem Umwege gefunden werden.

Um z. B. die Resultante der an AB (Fig. 4) angreifenden parallelen Kräfte P und Q zu finden, denke man sich auf A und B die gleich großen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräfte E und E^1 wirkend, wodurch ja der Bewegungszustand des Systems nicht geändert wird. Aus AE und AP ergibt

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0018-7 DFG

sich die Resultante AC, aus BQ und BE^1 die Resultante BD. Verschiebt man nun AC und BD in ihrer eigenen Richtung, bis sie sich in F schneiden, und zerlegt sie dort wieder in zwei Kräfte, so daß GF und FH gleich und parallel AE und BE^1 sind, so ist die in F angreifende Resultante erstens parallel P und Q, und, da FJ und FL in einer Richtung wirken, auch gleich der Summe von P und Q. Diese Resultante läßt sich nun in ihrer eigenen Richtung so weit verschieben, daß ihr oberes Ende auf AB fällt. MN ist dann die gesuchte Größe.

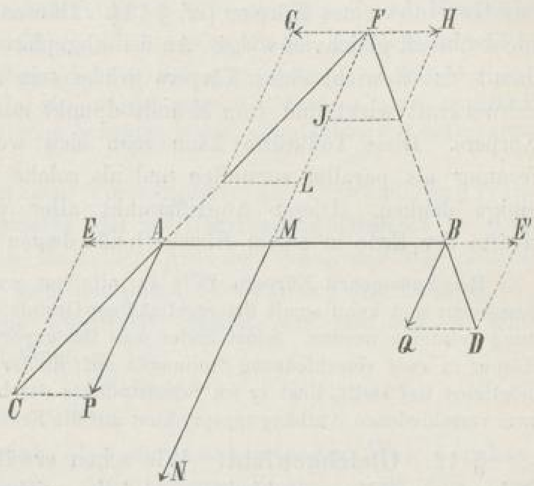

Fig. 4.

Zwei (und natürlich auch beliebig viele) parallele, gleichgerichtete Kräfte lassen sich also ersetzen durch eine Resultante, die gleich ihrer Summe ist und dieselbe Richtung hat wie sie. M heißt Mittelpunkt der parallelen Kräfte und ist von der Richtung der parallelen Kräfte ganz unabhängig.

4) Wenn parallele Kräfte nach entgegengesetzten Richtungen angreifen, so läßt sich eine Resultante nur finden, wenn sie verschieden groß sind. Zwei gleichgroße, parallele, entgegengesetzt gerichtete Kräfte lassen sich nämlich nicht zu einer einzigen vereinigen. Sie bewirken eine Drehung des Körpers, an dem sie angreifen, und heißen ein Kräftepaar.

§ 17. **Schwere und Schwerpunkt.** Alle Körper sind der Schwere unterworfen. Damit bezeichnet man die Kraft, mit der sie von der Erde angezogen werden. Diese Kraft denkt man sich im Mittelpunkt der Erde lokalisiert. Ein nicht unterstützter Körper fällt also in der Richtung nach dem Erdzentrum. Diese Richtung heißt vertikal, die dazu senkrechte Ebene horizontal. Die Größe der Schwerkraft (gravitas) wird gemessen durch die Beschleunigung g, die sie einem fallenden Körper erteilt; dieselbe ist identisch mit der Geschwindigkeit desselben am Ende der ersten Sekunde (9,81 m). Da nach dem Gravitationsgesetze die Anziehung zwischen zwei Körpern

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0019-5 DFG

um so größer wird, je kleiner die Entfernung ist, so muß g um so größer sein, je näher ein Körper dem Erdzentrum ist. Das Produkt aus Masse und Beschleunigung durch die Schwerkraft, mg, heißt nun das Gewicht eines Körpers [cf. § 11]. Daraus folgt, daß ein Körper nicht überall gleichviel wiegt. An den abgeplatteten Polen wird g und damit das Gewicht eines Körpers größer sein als am Äquator. Die Schwerkraft wirkt nun vom Erdmittelpunkt aus auf alle Teilchen des Körpers. Diese Teilkräfte kann man sich wegen der großen Entfernung als parallel vorstellen und als solche in einem Punkte vereinigt denken. Dieser Angriffspunkt aller parallelen anziehenden Kräfte der Erde in einem Körper heißt dessen Schwerpunkt.

Bei homogenen Körpern fällt er mit dem geometrischen Mittelpunkt zusammen und kann somit bei regelmäßiger Gestalt des Körpers durch Rechnung gefunden werden. Sonst findet man ihn experimentell: Man hängt den Körper in zwei verschiedenen Stellungen auf; da der Schwerpunkt sich immer möglichst tief stellt, liegt er im Schnittpunkte der beiden Lote, die von den zwei verschiedenen Aufhängungspunkten auf die Erdoberfläche gefällt werden.

§ 18. **Gleichgewicht.** Wie schon erwähnt, ist ein Körper in Ruhe, wenn die verschiedenen auf ihn wirkenden Kräfte sich aufheben. Man nennt den Zustand der Ruhe auch Gleichgewicht, besonders wenn eine der wirkenden Kräfte die Schwerkraft ist. Man unterscheidet nun drei Arten des Gleichgewichts:

1) Indifferentes oder neutrales Gleichgewicht, wenn Schwerpunkt und Unterstützungspunkt zusammenfallen (z. B. bei Rädern) oder wenn der Schwerpunkt stets senkrecht über dem Unterstützungspunkte liegt (z. B. bei Kugeln). Die Folge hiervon ist, daß der Körper bei jeder Verschiebung in der neuen Lage verharrt. Da also der Schwerpunkt in derselben Entfernung vom Erdmittelpunkt bleibt, bleibt auch die potentielle Energie des Körpers gleich groß. Mit anderen Worten, die Arbeit (gegen die Schwerkraft) ist hier bei der Verschiebung $= 0$ [cf. § 12]. In Wirklichkeit ändert die Reibung etc. dieses Resultat. Trotzdem bleibt ein Rad und eine Kugel sehr leicht beweglich.

2) Stabiles Gleichgewicht: Hierbei ist ein Körper so aufgehängt, daß der Schwerpunkt unter den Unterstützungspunkt fällt. Macht man eine Verschiebung, so kehrt der Körper in die ursprüngliche Lage zurück. Das beste Beispiel hierfür ist das Pendel. Beim stabilen Gleichgewicht liegt also das Schwergewicht so tief wie möglich, die potentielle Energie ist somit ein Minimum.

3) Labiles Gleichgewicht: ist dadurch charakterisiert, daß der Schwerpunkt senkrecht über dem Unterstützungspunkt liegt,

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0020-7

und daß der geringste Anstoß genügt, um den Körper in einen neuen Gleichgewichtszustand, nämlich den stabilen, überzuführen (z. B. ein auf die Spitze gestelltes Pendel). Anders ausgedrückt, die potentielle Energie ist hier ein Maximum. Übrigens ist auch der Mensch im labilen Gleichgewicht. Daher fallen kleine Kinder und Bewußtlose hin.

Für gewisse Betrachtungen, z. B. in der Physiologie, ist noch das sogenannte dynamische Gleichgewicht aufgestellt worden. Darunter versteht man denjenigen Zustand einer bewegten Masse, wenn ebensoviel hinzukommt wie fortgeht.

§ 19. **Maschinen** sind Vorrichtungen zur Umwandlung (Transformation) von Energietomen oder zur Übertragung derselben an einen andern Ort. Für alle Maschinen gilt der Satz, daß die Arbeitsleistung der Kraft P stets der durch Überwindung der Last Q verrichteten Arbeitsleistung gleich ist. Macht man also mittelst einer Maschine eine Verschiebung, so ist

$$Ps = Qs'$$
$$P : Q = s' : s.$$

Die Kraft verhält sich also zur Last wie der Weg der Last zum Wege der Kraft. Mit anderen Worten heißt dies, daß niemals eine Maschine, ohne daß von außen Energie zugeführt wird, selbsttätig Kräfte erzeugen kann, daß also ein Perpetuum mobile unmöglich ist [vgl. § 15]. Wenn daher auch durch Maschinen eine kleine Kraft eine große Last überwinden kann, so muß sie dafür einen um so größeren Weg zurücklegen. Die Arbeit bleibt also stets dieselbe.

Auch die Organismen, die auf den ersten Blick als selbständige Kräftequellen erscheinen könnten, sind ja von den zugeführten Spannkräften, der Nahrung etc., durchaus abhängig.

Im Folgenden sollen nur die einfachen Maschinen besprochen werden.

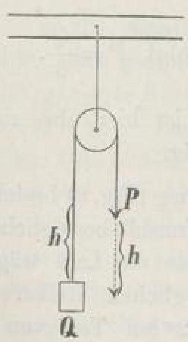

Fig. 5.

§ 20. Die **Rolle** ist eine kreisförmige Scheibe, die um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse drehbar ist, und an ihrem Umfange Seile etc. aufnehmen kann. Es gibt feste und bewegliche Rollen.

a) Bei der festen Rolle (Fig. 5) ist die Achse befestigt. Verschiebt man die Kraft P um die Strecke h, so wird die Arbeit Ph geleistet. Die Last Q geht

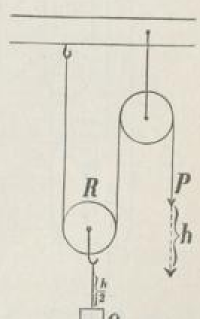

Fig. 6.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0021-2

um ebensoviel in die Höhe, erfordert also die Arbeit Qh. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn $Ph = Qh$ oder $P = Q$ ist.

Das heißt, die angewandte Kraft ist ebensogroß wie die Last. Die feste Rolle dient also nicht zur Kraftersparnis, sondern nur, um die Richtung der Kraft zu ändern, bezw. die Reibung zu vermindern.

b) Bei der beweglichen Rolle (Fig. 6) ist auch die Achse beweglich. Verschiebt man die Kraft P um h, so wird die Arbeit Ph geleistet. Diese Verschiebung h verteilt sich nun auf beide Schnüre der beweglichen Rolle R. Q wird also nur um $\frac{h}{2}$ gehoben, somit die Arbeit $Q\,\frac{h}{2}$ geleistet. Gleichgewicht besteht, wenn

$$Ph = Q\frac{h}{2} \text{ oder } P = \frac{Q}{2} \text{ ist.}$$

Um die Last zu heben, ist also nur die halbe Kraft nötig. Freilich muß sie den doppelten Weg wie die Last zurücklegen.

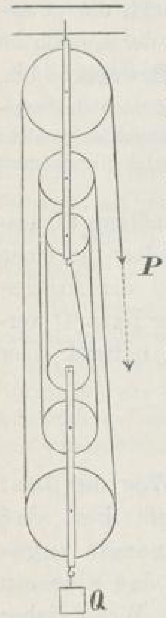

Fig. 7.

§ 21. Der **Flaschenzug** ist eine Kombination von festen und beweglichen Rollen.

a) Der gewöhnliche Flaschenzug (Fig. 7) besteht aus einer Anzahl fester und ebensoviel beweglicher Rollen, die durch ein Seil verbunden sind, das immer von einer festen zu der entsprechenden beweglichen Rolle geht. Verschiebt man P um h, so wird die Arbeit Ph geleistet. Dann wird Q nur um den sovielten Teil von h gehoben, als Rollen vorhanden sind. In Fig. 7 herrscht also Gleichgewicht, wenn

$$Ph = Q\frac{h}{6} \text{ ist. Daraus folgt } P = \frac{Q}{6}.$$

Um die Last zu heben, ist hier also nur der sechste Teil der Kraft nötig.

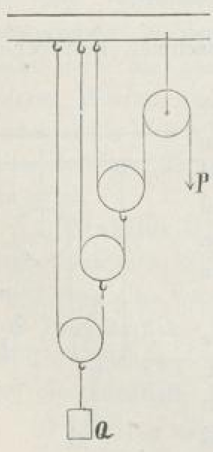

Fig. 8.

b) Der Potenzflaschenzug (Fig. 8) besteht aus einer festen und einer Anzahl beweglicher Rollen, von denen die unterste die Last trägt. Verschiebt man bei n beweglichen Rollen P um h, so wird Q um den 2^nten Teil von h gehoben.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0022-8

Gleichgewicht ist also vorhanden, wenn

$$Ph = Q\frac{h}{2^n} \text{ ist; daraus folgt } P = \frac{Q}{2^n}.$$

Also zum Heben der Last ist nur ein Teil der Kraft nötig, welcher der sovielten Potenz von 2 entspricht, als bewegliche Rollen vorhanden sind. In Fig. 8 wäre somit nur der $2^3 =$ achte Teil der Kraft nötig.

§ 22. Das **Wellrad** (Fig. 9) besteht aus einer Walze, der sogenannten Welle, vom Radius r, die um ihre Achse drehbar ist, und aus einem mit ihr fest verbundenen Rade vom Radius R, das oft auch gezähnt ist. Die Kraft P greift am Umfange des Rades an, die Last Q am Umfange der Welle. Verschiebt man nun P um H, so bewegt sich auch das Rad um den Bogen H, die damit verbundene Welle um den Bogen h. Q wird also um h gehoben. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$PH = Qh \text{ ist.}$$

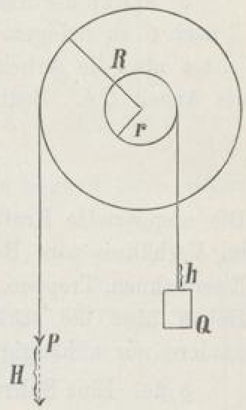

Fig. 9.

Nun verhalten sich aber die Bogen H und h wie die entsprechenden Radien. Es ist also

$$PR = Qr$$

$$P = \frac{r}{R}Q.$$

Zur Hebung der Last ist daher nur ein Bruchteil der Kraft nötig, der um so geringer ist, je größer das Rad und je kleiner die Welle ist. Dieselbe Wirkung erzielt man natürlich, wenn man zwei verschieden große Räder durch Ketten oder Riemen verbindet, bezw. sie mittelst Zähne ineinandergreifen läßt.

§ 23. **Schiefe Ebene** heißt eine gegen den Horizont geneigte Ebene, die zum Heben von Lasten dient (Fig. 10). AB heißt die Basis (b), BC die Höhe (h), AC die Länge (l) der schiefen Ebene. Die Last Q soll heraufgezogen werden:

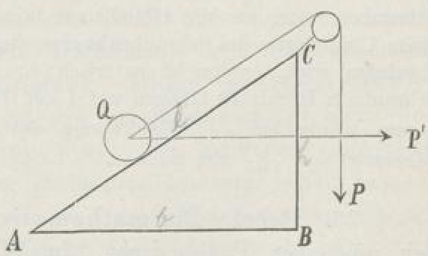

Fig. 10.

a) durch eine der schiefen Ebene parallele Kraft P. Wird Q von A nach C gezogen, so legt P den Weg l zurück, leistet also die Arbeit Pl.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0023-4 DFG

Die Last wird dabei um BC gehoben, also die Arbeit Qh geleistet. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$Pl = Qh$$
$$P:Q = h:l.$$

Die aufgewandte Kraft ist also um so geringer, je kleiner die Höhe im Verhältnis zur Länge, d. h. je weniger steil die Ebene ist.

b) Wirkt die Kraft P^1 parallel zur Basis, so legt sie, um Q von A nach C zu bringen, in ihrer eigenen Richtung den Weg AB zurück, leistet also die Arbeit $P^1 b$. Die Hebung der Last erfordert wieder die Arbeit Qh. Bedingungen des Gleichgewichts:

$$P^1 b = Qh$$
$$P^1 : Q = h:b.$$

Die angewandte Kraft ist also um so geringer, je kleiner die Höhe im Verhältnis zur Basis ist. Diese Gesetze kommen bei Straßen, Eisenbahnen, Treppen, Rampen etc. zur Anwendung. Die Arbeit beim Heben über die schiefe Ebene ist natürlich unabhängig vom Weg, sondern nur abhängig von dem Gewicht der Last und der Höhe (Qh).

§ 24. Eine **Schraube** kann man sich dadurch entstanden denken, daß eine schiefe Ebene um einen Zylinder gewickelt wird. Bei der Schraubenspindel sind die Windungen erhaben; die Schraubenmutter ist ein Hohlzylinder mit entsprechenden Vertiefungen. Nach den Gesetzen der schiefen Ebene verhält sich hier die Kraft zur Last wie die Höhe einer ganzen Windung (Ganghöhe) zum Umfang der Schraube. Es wird also um so mehr Kraft gespart, je flacher die Schraubengänge sind.

Unter anderm dient die Schraube zu feinen Dickenmessungen als Mikrometerschraube: Wird der oberste Teil der Schraube, der sogenannte Schraubenkopf, einmal ganz herumgedreht, so bewegt sich die Spindel in der Schraubenmutter um die Höhe einer Windung, die bekannt ist. Eine teilweise Umdrehung des Schraubenkopfes, deren Größe an einer Kreiseinteilung abgelesen wird, entspricht natürlich einem Bruchteil dieser Höhe. Eine Schraube z. B. mit 10 Gängen auf 1 cm Höhe, also mit einer Ganghöhe von 1 mm würde bei $\frac{1}{100}$ Umdrehung des Schraubenkopfes eine Bewegung (Messung) von $\frac{1}{100}$ mm machen.

§ 25. **Hebel.** Ein mathematischer Hebel ist eine Linie, die sich um einen Punkt dreht. In Wirklichkeit gibt es nur einen physischen Hebel, d. i. eine unbiegsame, um eine feste Achse drehbare Stange, an der Kräfte angreifen. Der Punkt der Achse, um den die Drehung erfolgt, heißt Unterstützungspunkt, Drehungs-

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0024-9 DFG

punkt oder Hypomochlion; von ihm gehen die Hebelarme aus. Beim zweiarmigen Hebel (Fig. 12) greifen Kraft und Last auf verschiedenen Seiten des Unterstützungspunktes an, wirken aber nach derselben Richtung. Beim einarmigen Hebel (Fig. 11) greifen sie auf derselben Seite an, wirken aber nach entgegengesetzten Richtungen. Beim Winkelhebel bilden die Hebelarme einen Winkel.

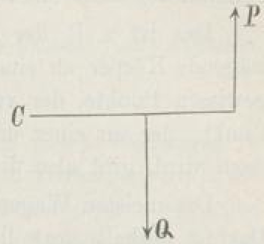

Fig. 11.

Um die Gleichgewichtsbedingungen am Hebel zu finden, werde (Fig. 12) die Kraft P um h verschoben, dann wird Q um h' gehoben.

Nach der Verschiebung hat der Hebel die Lage $A'CB'$. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$Ph = Qh' \text{ oder}$$
$$P:Q = h':h.$$

Aus den ähnlichen Dreiecken $A'CD$ und $B'CE$ folgt nun

$$h':h = B'C:A'C$$
$$= BC:AC.$$

Bezeichnet man AC mit p und BC mit q, so ist

$$P:Q = q:p$$

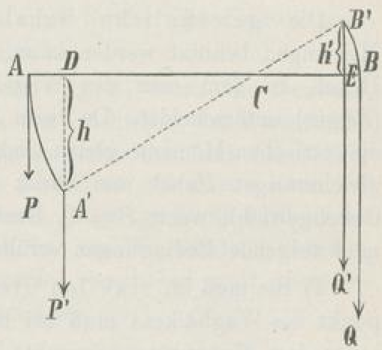

Fig. 12.

d. h. Kraft und Last verhalten sich umgekehrt wie ihre Hebelarme. Aus der Gleichung folgt ferner unmittelbar:

$$P.p = Q.q.$$

Das Produkt aus angreifender Kraft und ihrem senkrechten Abstand vom Drehungspunkte (Hebelarm) heißt nun statisches Moment oder Drehungsmoment. Mithin ist Gleichgewicht am Hebel vorhanden, wenn die entgegengesetzt wirkenden statischen Momente gleich sind. Bei mehreren angreifenden Kräften muß die Summe der statischen Momente gleich sein. Es folgt, daß eine kleine Kraft, die am langen Hebelarm angreift, einer großen am kurzen Arm angreifenden das Gleichgewicht hält.

Angewandt wird der Hebel vielfach, z. B. als Schere, ein einarmiger Hebel als Nußknacker, als Hebebaum, ein Winkelhebel beim Klingelzuge etc. Eine der wichtigsten Formen des Hebels ist die

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0025-5

§ 26. **Wage.** Nur die wenigsten Wagen dienen dazu, wie man vermuten könnte, das Gewicht der Körper direkt zu bestimmen, d. h. das Produkt aus Masse und Beschleunigung durch die Schwerkraft, $m g$ [§ 17].

Das ist z. B. der Fall bei der Federwage. Hier wird der zu wägende Körper an eine Feder gehängt, die er natürlich bis zu einem gewissen Punkte, der von seiner Schwere abhängt, ausdehnt. Dieser Punkt, der an einer dahinter angebrachten empirischen Skala abgelesen wird, gibt also direkt das Gewicht des Körpers an.

Die meisten Wagen dienen dagegen zur Massenvergleichung. Das ist deshalb vorteilhaft, weil ja, wie erwähnt, g und damit das Gewicht der Körper an verschiedenen Orten nicht ganz gleich ist. Wenn nun auf der gewöhnlichen Hebelwage zwei Körper m und m' sich das Gleichgewicht halten, so ist $m g = m' g$. Dadurch wird also g eliminiert, und es ist $m = m'$.

Die gewöhnliche Schalenwage, die zu den subtilsten Messungen benutzt werden kann, ist ein zweiarmiger, gleicharmiger Hebel, an dem man den Wagebalken, die Schalen und die Zunge (Zeiger) unterscheidet. Da beim Hebel Gleichgewicht herrscht, wenn die statischen Momente gleich sind, also $Pp = Qq$ ist, so besteht beim gleicharmigen Hebel und somit auch bei der Wage, wo $p = q$ ist, Gleichgewicht, wenn $P = Q$, Kraft gleich Last ist. Eine gute Wage muß folgende Bedingungen erfüllen:

1) Sie muß im stabilen Gleichgewicht sein, d. h. der Schwerpunkt des Wagbalkens muß bei horizontaler Lage desselben senkrecht unter dem Unterstützungspunkte liegen.

2) Sie muß richtig sein, d. h. beide Arme des Wagbalkens müssen in einer Ebene liegen, gleiche Länge und gleiche statische Momente haben; die Wagschalen müssen ferner gleich schwer sein und genau horizontal stehen.

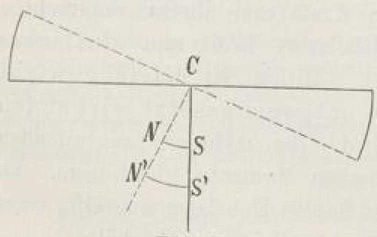

Fig. 13.

3) Sie muß empfindlich sein, d. h. sie muß bei einem kleinen Übergewicht auf der einen Seite einen gewissen Ausschlag geben. Als Maß der Empfindlichkeit nimmt man gewöhnlich den Ausschlag an, den eine Mehrbelastung von 0,001 g bewirkt.

Die Empfindlichkeit ist um so größer,

a) je näher der Schwerpunkt dem Unterstützungspunkte liegt. Es sei (Fig. 13) C der Unterstützungspunkt, S der Schwerpunkt. Durch ein Über-

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0026-1 DFG

gewicht rechts nehme die Wage die punktierte Stellung ein. Dann beschreibt S den Weg SN. Ein in S' liegender Schwerpunkt müßte bei demselben Ausschlag den größeren Weg $S'N'$ beschreiben, wozu natürlich eine größere Belastung nötig ist;

b) je länger die Wagbalken sind: denn dadurch wachsen ja die statischen Momente;

c) je leichter Wagbalken und Wagschalen sind.

Zu genauen Resultaten ist das Mittel aus vielen Wägungen zu nehmen, Temperatur und Barometerstand zu berücksichtigen, sowie das gefundene Gewicht auf den leeren Raum zu reduzieren [cf. § 51]. Sind die Wagbalken nicht genau gleich lang, so umgeht man diesen Fehler durch Tarieren. Hierbei kommt die zu wägende Substanz auf die eine Schale, auf die andere legt man z. B. Schrotkugeln, bis die Zunge auf dem 0-Punkte der Skala steht. Dann ersetzt man die Substanz durch Gewichte, bis die Zunge wieder auf 0 steht. Wenn zwei Größen (Substanz und Gewichte) einer dritten (den Schrotkugeln) gleich sind, sind sie untereinander gleich.

Sehr wichtig sind die Brückenwagen, wozu die Dezimal-, Zentesimalwagen etc. gehören. Nicht das ist hierbei das Wesentliche, daß durch 10 oder 100 mal kleinere Gewichte der Last das Gleichgewicht gehalten wird; das ist ja leicht zu erreichen, wenn der Hebelarm des Gewichts 10 oder 100 mal länger gemacht wird als der der Last; sondern die Hauptsache ist, daß die Wagschale („Brücke") für die Last stets mit sich selbst parallel verschoben wird, mag der Körper in der Mitte oder am Rande liegen.

Es ist nämlich (Fig. 14) $ab : ac = ef : ed$ konstruiert, z. B. $= 1 : 4$. Durch die Belastung Q geht h und dadurch auch f ein bestimmtes Stück n herunter, folglich d 4 mal soviel; ebenso auch der mit d verbundene Punkt c; b und der damit verbundene Punkt g wieder um n. g und h werden also gleichmäßig um n verschoben, bewegen sich mithin parallel zur früheren Ebene.

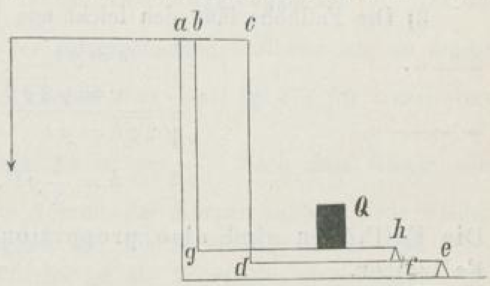

Fig. 14.

Wir kommen nun zu den speziellen Bewegungen.

§ 27. **Fallgesetze.**

1) Der freie Fall ist eine durch die Anziehungskraft der Erde gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Geschwindigkeit ist am

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0027-6
DFG

Anfang $= 0$, am Ende der ersten Sekunde $g = 9{,}81$ m, am Ende der zweiten Sekunde $2g$, nach t Sekunden tg.

$$v = g\,t.$$

Es sind also die Fallgeschwindigkeiten proportional den Fallzeiten. Diese Formel geht unmittelbar aus der Definition der Beschleunigung $g = \frac{v}{t}$ hervor [§ 10].

2) Die Fallgeschwindigkeit läßt sich auch aus der durchfallenen Strecke (Höhe) berechnen.

Um einen Stein vom Gewicht $m\,g$ auf ein Dach von der Höhe h zu bringen, ist eine Arbeit $m\,g\,h$ (Kraft mal Weg) nötig. Die potentielle Energie des Steins ist natürlich auch $= m\,g\,h$, da nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie keine Kraft verschwunden oder zugekommen sein kann. Fällt der Stein dieselbe Höhe herab, so verwandelt sich die potentielle Energie in die entsprechende, gleichgroße, kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$. Also

$$m\,g\,h = \frac{1}{2}mv^2$$

$$g\,h = \frac{1}{2}v^2$$

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

d. h. die Fallgeschwindigkeiten sind also auch proportional den Quadratwurzeln aus den Fallhöhen.

3) Die Fallhöhe läßt sich leicht aus 1) und 2) finden.

$$v = g\,t$$

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

$$\sqrt{2\,g\,h} = g\,t$$

$$h = \frac{1}{2}g\,t^2.$$

Die Fallhöhen sind also proportional den Quadraten der Fallzeiten.

Alle Fallgesetze sind nur für den luftleeren Raum streng gültig. In Wirklichkeit hat der Widerstand der Luft und das spezifische Gewicht großen Einfluß auf die Fallgeschwindigkeit.

§ 28. Beim **Fall über die schiefe Ebene** kann man sich die auf den Körper M einwirkende Schwerkraft g, in Fig. 15 dargestellt durch mh, in die beiden Komponenten mf und me zerlegt denken,

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0028-2

von denen erstere parallel AC, letztere senkrecht dazu gerichtet ist. Da me durch den Widerstand der Unterlage AC aufgehoben wird, kommt für die Fortbewegung von M nur $mf = g'$ in Betracht. Fällt M von C nach B, so ist $v = \sqrt{2gh}$ [§ 27]; fällt es von C nach A, so ist $v' = \sqrt{2g'.AC}$. Da nun $g' = g.\sin\alpha$ und $AC = \frac{h}{\sin\alpha}$ ist, so folgt daraus $v' = v$, d. h. die Endgeschwindigkeit bezw. Wucht ist beim Falle von C nach A dieselbe wie beim Falle von C nach B, also von der Neigung der schiefen Ebene ganz unabhängig. Dagegen dauert natürlich die Fallbewegung um so länger, je mehr die Ebene geneigt ist.

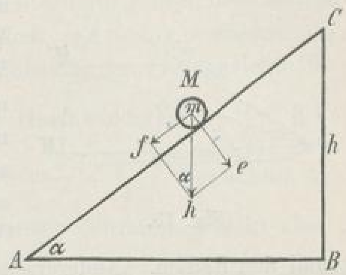

Fig. 15.

§ 29. Bei der **Wurfbewegung** erhält der Körper eine willkürliche Anfangsbeschleunigung und wird dann der Wirkung der Schwerkraft überlassen. Die Wurfbewegung ist geradlinig, wenn der Körper senkrecht auf- oder abwärts geworfen wird. Im letzten Falle wirkt die Summe von Anfangsgeschwindigkeit c und Fallgeschwindigkeit gt [§ 27], im ersten die Differenz. Hier muß also ein Zeitpunkt kommen, wo der Körper frei in der Luft schwebt, um bald darauf zu fallen. Dieser Punkt ist erreicht, wenn die aufwärts gerichtete Geschwindigkeit $v = c - gt$ gleich Null geworden ist, wenn also $c = gt$ ist. Dann ist die Dauer des Aufstieges $t = \frac{c}{g}$. Da die Wurfhöhe identisch mit der entsprechenden Fallhöhe ist, so ergibt sie sich, wenn man in die Formel $h = \frac{1}{2} g t^2$ [§ 27] für t den eben gefundenen Wert $\frac{c}{g}$ einträgt: sie ist $= \frac{c^2}{2g}$. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie kommt der Körper auf der Erde wieder mit derselben Geschwindigkeit an, die er anfangs hatte. Bei allen anderen Richtungen des Wurfes ist die Wurfbahn eine Parabel, als Resultante der die Anfangsrichtung bedingenden Kraft und der Schwerkraft.

§ 30. Bei der **drehenden Bewegung** ist zu unterscheiden: 1) die lineare Geschwindigkeit, d. i. der Weg, den der Körper in gegebener Zeit zurücklegt; 2) die sog. Winkelgeschwindigkeit, d. i. der Winkel, der in einer gegebenen Zeit vom Radius be-

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0029-1

schrieben wird. Zwei Körper M und m (Fig. 16) bewegen sich im Abstande R und r (dieser Abstand heißt Radius oder Radius vector) um den festen Punkt C. Bei gleicher Winkelgeschwindigkeit, d. h. um den Winkel α in gleicher Zeit zu durchmessen, muß der entferntere Körper M natürlich eine größere lineare Geschwindigkeit haben. Die linearen Geschwindigkeiten sind also bei gleicher Winkelgeschwindigkeit direkt proportional den Radien. Andererseits sind die Winkelgeschwindigkeiten bei gleicher linearer Geschwindigkeit umgekehrt proportional den Radien. Bedeutet w Winkelgeschwindigkeit, v lineare Geschwindigkeit, r den Radius, so ist

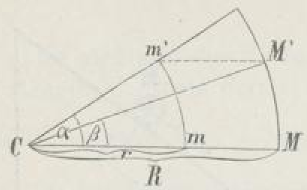

Fig. 16.

$$w = \frac{v}{r}$$

$$v = w\,r.$$

Daraus folgt $\frac{1}{2}\,m\,v^2 = \frac{1}{2}\,mr^2w^2$. Da mr^2, das Produkt aus Masse und dem Quadrat des Radius, Trägheitsmoment heißt, so ist also die kinetische Energie (Wucht) direkt proportional dem Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment kommt besonders im Schwungrad der Maschinen zur Anwendung, bei dem die größte Masse an der Peripherie, also möglichst weit von der Drehungsachse angebracht ist. Es dient dazu, um den gleichmäßigen Gang der Maschine zu erhalten und ihr über die sog. toten Punkte fortzuhelfen.

Eine wichtige Form der drehenden Bewegung ist

§ 31. die **Zentralbewegung**, bei der ein Körper in Kreisen, Ellipsen etc. sich um einen Punkt bewegt. Sie heißt gebunden, wenn der Körper mit demselben verbunden ist, wenn also z. B. ein Gewicht an einem Seil herumgeschwungen wird, anderenfalls frei, wie z. B. die Bewegung der Planeten um die Sonne. Eine kreisförmige Bewegung setzt nun das fortwährende Bestehen einer Kraft voraus, da ohne diese nach dem Trägheitsgesetz [§ 7] der Körper geradlinig in der Richtung der Tangente fortfliegen würde. So würde sich z. B. (Fig. 17) eine Masse m, welche die Geschwindigkeit v besitzt, in der Zeiteinheit von A nach B bewegen. Da sie in Wirk-

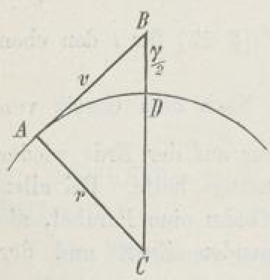

Fig. 17.

lichkeit aber nach D gelangt, so muß eine nach dem Zentrum hin gerichtete Kraft, die sogenannte Zentripetalkraft[1] auf sie eingewirkt und ihr eine gleichförmige Beschleunigung nach dem Zentrum hin erteilt haben, die in der Zeiteinheit von 0 bis γ wächst. Der von m unter dem Einflusse dieser Beschleunigung zurückgelegte Weg BD entspricht daher einer mittleren Geschwindigkeit $\frac{\gamma}{2}$ [cf. § 14]. Es ist nun $r^2 + v^2 = \left(r + \frac{\gamma}{2}\right)^2 = r^2 + r\gamma + \frac{\gamma^2}{4}$. Betrachtet man die Bewegung während eines sehr kleinen Zeitraums, rückt also D dicht an A heran, so wird $BD = \frac{\gamma}{2}$ so klein, daß $\frac{\gamma^2}{4}$ unberücksichtigt bleiben kann. Es ist also $\gamma = \frac{v^2}{r}$, und

$$\text{die Zentripetalkraft } m\gamma = \frac{mv^2}{r}.$$

Um die Zentripetalkraft auch durch die Winkelgeschwindigkeit auszudrücken, benutzt man die Formel $w = \frac{v}{r}$. Dann ist $w^2 = \frac{v^2}{r^2}$, $\frac{v^2}{r} = rw^2$. Mithin

$$F = mrw^2.$$

Der Zentripetalkraft gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, ist die Zentrifugalkraft[2]), die also strebt den Körper vom Zentrum zu entfernen. Auf ihr beruht es z. B., daß man an scharfen Kurven leicht aus dem Wagen geschleudert wird, daß man in einer Flüssigkeit suspendierte feste Bestandteile leicht von dieser trennen kann (z. B. Urinzentrifuge), daß aus einem mittelst einer Schnur schnell im Kreise bewegten Glase Wasser nichts ausfließt etc. Auf ihr beruht auch die Abplattung der Erde an den Polen und die Anhäufung der größten Masse am Äquator. Die Zentrifugalkraft ist natürlich der Schwerkraft entgegengerichtet, da diese ja zentripetal wirkt, sie muß sie also schwächen. Auch aus diesem Grunde folgt, daß g am Äquator kleiner ist als an den Polen [§ 17].

§ 32. **Keplers Gesetze** über die Bewegung der Planeten:

1) Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2) Die Radii vectores beschreiben in gleichen Zeiten gleiche Flächen [cf. § 15].

---

[1] *peto* sich nach einer Richtung hin bewegen.
[2] *fugio* fliehen.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0031-8 DFG

3) Die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich wie die Kuben der großen Bahnachsen.

§ 33. **Pendel.** Ein Pendel[1]) ist ein Körper, der um eine horizontale Achse schwingen kann (physisches Pendel). Die Pendelgesetze sind zunächst für das mathematische Pendel abgeleitet, das man sich als punktförmige Masse an einem gewichtslosen Faden befestigt denkt.

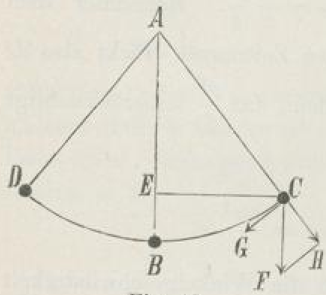

Fig. 18.

Wird das Pendel AB (Fig. 18) aus der Gleichgewichtslage gebracht, so schwingt es etwa bis C, bleibt stehen, schwingt dann umgekehrt über den Ruhepunkt B hinaus bis D und wieder zurück usf. Ein mathematisches Pendel, das aber nicht wirklich existiert, wäre somit ein Perpetuum mobile, insofern es, einmal in Gang gebracht, sich selbst in Bewegung erhielte. Man nennt nun AB die Länge des Pendels (l), die Entfernung aus der Gleichgewichtslage EC bezw. $\angle BAC$ die Schwingungsweite (auch Elongation oder Amplitude), und die Zeit, in der es den Weg $BCBDB$, d. i. eine ganze Schwingung, beschreibt, Schwingungsdauer (T).

Die Kraft, welche das Pendel von C zurückführt, ist die Schwerkraft, dargestellt durch CF. Diese läßt sich in zwei Komponenten zerlegen: CH, welche durch die Festigkeit des Fadens kompensiert wird, und die für die Pendelbewegung allein in Betracht kommende $CG = FH$. Aus den ähnlichen Dreiecken FCH und AEC folgt $HF : CF = EC : AC$; mithin $HF = \frac{CF \cdot EC}{AC}$. Hierbei stellt CF die Schwerkraft dar, gemessen durch g, AC die Pendellänge, EC die Amplitude. Da die beiden ersten Größen konstant sind, folgt also als erstes Pendelgesetz:

Die Intensität der Pendelschwingung ist direkt proportional der Schwingungsweite, d. h. die Geschwindigkeitsänderung, also die Beschleunigung bezw. Verzögerung, der Pendelbewegung (nicht die Geschwindigkeit!) ist am größten an den Umkehrungspunkten, am kleinsten, wenn der Pendel die Ruhelage passiert.

[1] *pendulus* herabhängend.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0032-4 DFG

Das zweite Pendelgesetz, dessen mathematische Ableitung zu weit führen würde, lautet:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Daraus folgt:

a) Die Schwingungszeit ist proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge (Galilei), umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung durch die Erdanziehung.

b) Die Schwingungszeit ist unabhängig von der Schwingungsweite (falls sie 5^0 nicht übersteigt) und von dem Gewichte des Pendels (Galilei, Newton).

Diese Formel ist sehr wichtig. Wenn von den 3 Größen T, l, g zwei bekannt sind, läßt sich ja ohne weiteres die dritte finden. So kann man z. B. die Länge eines Sekundenpendels, d. h. eines Pendels, dessen Schwingungszeit 1 Sekunde beträgt, berechnen, wenn g (= Fallbeschleunigung, Intensität der Schwerkraft) bekannt ist. Andererseits kann man aus der Schwingungsdauer eines Pendels von bekannter Länge (und zwar kommt hier die sogenannte korrespondierende Pendellänge in Betracht) g an den verschiedenen Orten der Erde finden.

Ein physisches Pendel kann man sich aus vielen, verschieden langen mathematischen Pendeln zusammengesetzt denken, deren Schwingungsdauer — vorausgesetzt, daß sie für sich schwingen — teils größer, teils kleiner wäre als die Schwingungsdauer der analogen Punkte der Pendelstange; denn diese schwingen wegen ihrer starren Verbindung natürlich alle gleichmäßig mit einer mittleren Geschwindigkeit. Es wird nun einen Punkt der Pendelstange geben, der so schwingt wie ein gleich langes mathematisches Pendel. Dieser Punkt heißt Schwingungs(mittel)punkt. Seine Entfernung vom Unterstützungspunkt heißt reduzierte oder korrespondierende Länge des physischen Pendels. Vertauscht man Schwingungspunkt und Unterstützungspunkt, so wird die Schwingungszeit nicht geändert (Huygens). Ein Pendel, das dafür eingerichtet ist, indem die Pendelstange zwei Schneiden zum Aufhängen des Pendels besitzt, die ihre Schärfe einander zukehren, heißt Reversionspendel. Durch Verschiebung von Gewichten, die an der Pendelstange angebracht sind, kann man nun erzielen, daß das Pendel gleich schwingt, mag es nun um die eine oder die andere Schneide schwingen. Ein solches Reversionspendel dient daher zur experimentellen Bestimmung der korrespondierenden Pendellänge, die eben dem Abstand der beiden Schneiden entspricht.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0033-9 DFG

Da die Schwingungszeit eines Pendels von seiner Länge abhängt, alle Körper aber durch Wärme ausgedehnt werden, so gibt es sogenannte Kompensationspendel, bei denen die Pendelstange aus 2 Metallen von verschiedener Ausdehnungsfähigkeit so zusammengesetzt ist, daß keine Längenveränderung stattfindet.

Von den vielen Anwendungen des Pendels sei hier nur das Echappement der Pendeluhren besprochen. An der Welle W (Fig. 19) ist ein Gewicht P aufgewunden, das durch seinen Fall die Welle dreht. Um die Beschleunigung durch das Gewicht in eine gleichmäßige Geschwindigkeit zu verwandeln, greift der an der Pendelstange befestigte Doppelhaken hh' in das mit der Welle w verbundene Zahnrad ein, so dass das Rad, und damit auch die Welle, bei jeder Doppelschwingung nur um einen Zahn vorrücken kann. Zugleich wird aber auch die Reibung, welche die Pendelbewegung allmählich vernichten würde, kompensiert, indem das Pendel jedesmal einen kleinen Stoß bekommt, wenn der Haken aus dem Zahnrad herausgeht.

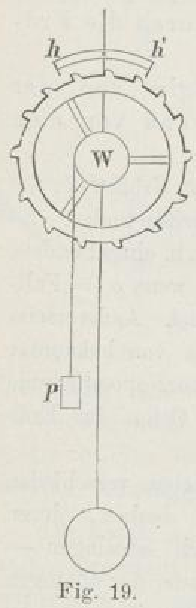

Fig. 19.

Erwähnt sei noch der Foucault'sche Pendelversuch. Foucault zeigte nämlich, daß ein sehr langes, mit möglichst geringer Reibung aufgehängtes, schweres Pendel allmählich scheinbar seine Schwingungsebene ändert. In Wirklichkeit beruht dies auf der Achsendrehung der Erde, die somit hierdurch zum ersten Male direkt nachgewiesen wurde. An den Polen würde die scheinbare Drehung der Pendelebene innerhalb von 24 Stunden 360° betragen; am Äquator ist sie = 0, an anderen Orten dem Sinus der geographischen Breite proportional.

§ 34. **Elastizität**[1] heißt die Eigenschaft eines Körpers, nach einer Deformation die ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen. Doch versteht man darunter auch den Widerstand gegen eine Formveränderung (s. u.) Alle elastischen Körper — und dazu gehören in gewissem Sinne auch Gase und Flüssigkeiten — sind im Pendelgleichgewicht. Es gilt also der Satz: Die Elastizität ist proportional der Intensität der deformierenden Kraft. Nach den einwirkenden Kräften unterscheidet man Zug-, Druck-, Biegungs-, Drehungs-(Torsions-)Elastizität. Ein Körper heißt vollkommen elastisch, wenn er nach Aufhören der Kraft seine frühere Gestalt wieder vollkommen annimmt, z. B. Kautschuk. Im Gegensatz dazu steht z. B. Wachs. Elastische Wirkung findet aber stets nur bis zu einer gewissen Grenze, der Elastizitätsgrenze, statt. Wird die einwirkende Kraft zu groß, so nimmt der Körper dauernd eine andere Form an, er wird zertrümmert, reißt etc. Unter Größe der Elasti-

[1] ἐλαστής der Treiber, von ἐλαύνω treiben, stoßen.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0034-5
DFG

zität versteht man dagegen die Kraft, die nötig ist, um eine bestimmte Formveränderung herbeizuführen, also z. B. um einen Körper von 1 qmm Durchmesser um seine eigene Länge zu dehnen, vorausgesetzt, daß er nicht reißt. Das Maß dafür heißt Elastizitätsmodul.[1] Kautschuk hat also, entgegen der gewöhnlichen Ausdrucksweise, eine vollkommene, aber kleine Elastizität. Der reciproke Wert des Elastizitätsmoduls ist der Elastizitätskoeffizient. Er gibt an, um welchen Bruchteil der Länge ein Körper von 1 qmm Querschnitt durch 1 kg gedehnt wird. Er mißt also, genauer ausgedrückt, die Dehnbarkeit. Der Elastizitätskoeffizient des Kautschuks ist z. B. groß.

§ 35. **Bewegungshindernisse.** Die Bewegungsfähigkeit der Körper findet wesentliche Einschränkungen durch die verschiedenen Bewegungshindernisse. Vor allem gehört hierzu die Reibung, die durch die Unebenheiten zweier sich gegeneinander verschiebender Körper bedingt ist. Sie ist, abgesehen vom Drucke, um so größer, je rauher die Oberflächen sind; darum schmiert man die der Reibung ausgesetzten Teile mit Öl, Fett etc. ein. Man unterscheidet gleitende Reibung, bei der immer dieselben Teile eines Körpers betroffen sind, und rollende Reibung, bei der die Berührungsfläche wechselt. Im allgemeinen ist letztere geringer; daher setzt man z. B. Wagen auf Räder und wendet beim Transport schwerer Gegenstände Rollen an. Die Reibung ist z. B. Ursache davon, daß soviel vom Nutzeffekt der Maschinen verloren geht. Andererseits ist es ihr zu danken, daß eine Lokomotive einen Zug fortbewegt; überwiegt nämlich die Schwere des Zuges die Reibung der Lokomotivräder, so drehen diese sich nur auf derselben Stelle um ihre Achse. Reibung findet auch zwischen den kleinsten, unsichtbaren Teilchen der Körper statt, sogenannte innere Reibung, die besonders bei Flüssigkeiten und Gasen eine wichtige Rolle spielt. — Ein Bewegungshindernis ist ferner der Widerstand des Mediums. Derselbe wächst mit der Dichte desselben, sowie mit der Geschwindigkeit und der Oberfläche des bewegten Körpers.

C. Gesetze der flüssigen Körper.

§ 36. **Grundeigenschaften der Flüssigkeiten.**[2] Flüssige Körper haben zwar ein bestimmtes Volumen, aber keine bestimmte Gestalt, da ihre Teilchen leicht gegeneinander verschieblich sind. Man kann

[1] *modulus* kleines Maß.

[2] Im folgenden sind die Flüssigkeiten im engeren Sinne (tropfbaren Flüssigkeiten) gemeint; die gasförmigen Flüssigkeiten sind im nächsten Abschnitt behandelt.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0035-1 DFG

dies auch so ausdrücken: Flüssigkeiten besitzen nur Elastizität des Volumens, aber nicht (wie die festen Körper) auch Elastizität der Gestalt. Zur Erklärung nimmt man an, daß ihre Moleküle in labilem Gleichgewicht schwingen und zugleich eine fortschreitende Bewegung haben. Aus dieser leichten Verschieblichkeit folgt, daß die einzelnen Teilchen unter dem Einflusse der Schwerkraft sich möglichst tief stellen; mit anderen Worten, die Oberfläche einer Flüssigkeit ist genau horizontal. Nur in engen Röhren findet eine Ausnahme statt [cf. § 42]. Da den Flüssigkeiten Poren fehlen, so sind sie auch fast inkompressibel. Sehr wichtig ist ferner, daß ein an beliebiger Stelle ausgeübter Druck sich in einer Flüssigkeit gleichmäßig nach allen Richtungen fortpflanzt. Darauf beruht z. B. das Messen des Blutdruckes, da derselbe ja im Arterienrohr auch seitlich wahrnehmbar ist. Eine Anwendung dieses Gesetzes ist ferner die hydraulische[1] oder Brahma'sche Presse, deren Prinzip aus Fig. 20 erhellt.

Wird der Kolben k durch eine Kraft p um h verschoben, so wird die Arbeit $p\,h$ geleistet. Dadurch wird ein Druck auf das Wasser in dem Röhrensystem erzeugt, und der Kolben k' mit einer Kraft p' um h' gehoben, also die Arbeit $p'\,h'$ geleistet. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$p\,h = p'\,h' \text{ oder}$$
$$p : p' = h' : h \text{ ist.}$$

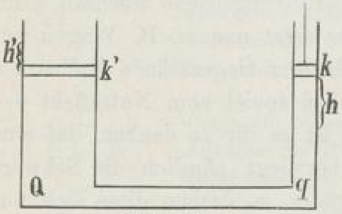

Fig. 20.

Da nun in beiden Schenkeln eine gleiche Wassermasse bewegt wird, ist, wenn q und Q die betreffenden Querschnitte bedeuten:

$$h' : h = q : Q \text{ mithin}$$
$$p : p' = q : Q.$$

Der im weiten Rohr erzeugte Druck übertrifft also um so mehr die angewandte Kraft, je größer der Querschnitt des weiten Rohrs im Verhältnis zu dem des engen ist. Natürlich ist dies wieder nur auf Kosten des Weges möglich [§ 19].

§. 37. **Hydrostatischer Druck** heißt der Druck, den eine Flüssigkeit auf die Flächeneinheit ausübt. Betrachten wir zunächst den Bodendruck. Für diesen gilt das sogenannte hydrostatische Paradoxon: er hängt nämlich für dieselbe Flüssigkeit ausschließlich ab von der Größe der Grundfläche und der Höhe der Flüssigkeitssäule, aber nicht von der Form des Gefäßes. Es ist also z. B. in Fig. 21 A—C der Bodendruck überall gleich groß. Dies kann experimentell bewiesen werden, ergibt sich aber auch durch folgende

[1] ὕδωρ Wasser, αὐλός Röhre.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0036-6 DFG

Überlegung: Das Flächenteilchen a trägt die Flüssigkeitssäule ab, erleidet also einen Druck, entsprechend ihrem Gewicht. Da sich nun in Flüssigkeiten der Druck allseitig gleichmäßig fortpflanzt, erleiden alle Flächenteile des Bodens denselben Druck, auch wenn direkt über ihnen die Flüssigkeit nicht so hoch steht. Ihre Gesamtheit entspricht aber der Grundfläche. Ferner folgt auch, daß der Seitendruck an einer Seite der Wand nur abhängt von der Größe dieser Stelle und von ihrer Entfernung von der Oberfläche der Flüssigkeit. Daraus ergibt sich unmittelbar das

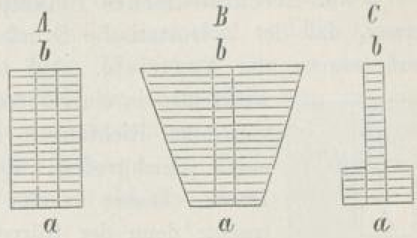

Fig. 21.

Gesetz der kommunizierenden Röhren: Sind zwei miteinander verbundene Röhren mit ein und derselben Flüssigkeit gefüllt, so steht diese in beiden gleichhoch, ganz unabhängig von der Form der Röhren. Denn wenn Gleichgewicht vorhanden sein soll, muß z. B. an der Stelle ab (Fig. 22) beiderseits gleicher Druck herrschen. Das kann aber, da die Fläche ab beiderseits gleichgroß ist, nur dann der Fall sein, wenn die Flüssigkeit in den Röhren gleich hoch steht. Ist die eine Röhre zu kurz, so wird die Flüssigkeit herausspritzen bis zum Niveau in der anderen Röhre. Darauf beruhen z. B. die Springbrunnen.

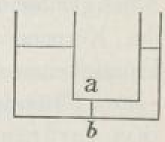

Fig. 22.

Die Ausflußgeschwindigkeit in diesem Falle und überhaupt aus seitlichen Öffnungen ist $v = \sqrt{2gh}$, also ebensogroß, als wäre die Flüssigkeit die Strecke zwischen Spiegel und Ausflußöffnung heruntergefallen (Torricelli's Theorem). Die Ausflußmenge ist theoretisch gleich dem Produkt aus der Ausflußgeschwindigkeit und der Größe der Ausflußöffnung. In Wirklichkeit ist sie kleiner, da die Flüssigkeit eine Zusammenziehung erfährt (Contractio venae).

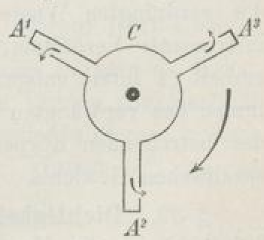

Fig. 23.

Auf dem Seitendruck beruht auch das Segner'sche Wasserrad: An dem um seine Achse drehbaren vertikalen Hohlzylinder C, den Fig. 23 im Querschnitt darstellt, befinden sich unten die gleichfalls hohlen Arme A^1, A^2, A^3, aus denen Wasser in der Richtung der kleinen Pfeile ausfließt, wenn C damit gefüllt wird. Da der Seitendruck an der Ausflußöffnung verringert wird, bekommt er an der gegenüberliegenden Stelle das

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0037-2
DFG

Übergewicht und dreht den Apparat in der Richtung des großen Pfeiles (sog. *Reaktionswirkung*).

§ 38. **Archimedisches Prinzip.** Aus dem Vorstehenden folgt ferner, daß der hydrostatische Druck auch nach oben gerichtet sein muß (sogenannter *Auftrieb*). Auf einen festen Körper A (Fig. 24) wirkt also in einer Flüssigkeit der hydrostatische Druck von allen Richtungen her. Die Seiten erleiden dabei einen gleichgroßen, aber entgegengesetzt gerichteten Druck. Dieser kommt für das Gewicht nicht in Betracht; denn der Körper kann dadurch nur komprimiert werden, was in großen Tiefen auch wirklich geschieht. Beeinflußt wird aber das Körpergewicht durch den hydrostatischen Druck von oben her (Abtrieb) und von unten her (Auftrieb). Der Auftrieb muß größer sein als der Abtrieb, weil er dem Gewicht der Flüssigkeitssäule qh' entspricht, der Abtrieb nur dem der kleineren Flüssigkeitsmenge qh. Das Körpergewicht wird also vermindert um die Differenz zwischen Auf- und Abtrieb, oder um die Gewichtsdifferenz der Flüssigkeitssäulen qh' und qh. Nun ist aber $qh' - qh$ das Volumen des Körpers A, somit auch das Volumen der von A verdrängten Flüssigkeitsmenge. Daraus ergibt sich: *jeder Körper verliert in einer Flüssigkeit soviel von seinem Gewichte, als die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt.* Es folgt zunächst, daß ein Körper in einer Flüssigkeit untertauchen wird, wenn er trotz seines Gewichtsverlustes noch mehr wiegt als das Volumen der von ihm verdrängten Flüssigkeit, oder, anders ausgedrückt, wenn der Auftrieb kleiner ist als die Summe des Körpergewichts und des Abtriebs. Im umgekehrten Falle *schwimmt* der Körper.

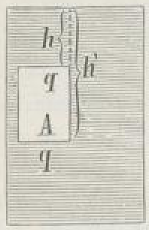

Fig. 24.

Wählt man als Flüssigkeit Wasser, so gibt wieder die Differenz zwischen dem Gewicht des Körpers in Luft und Wasser das Gewicht des verdrängten Wassers an. Beim Wasser besteht nun aber das interessante Verhältnis, daß die Gewichtseinheit (1 kg) der Volumseinheit (1 Liter) entspricht [§ 5]. Somit erhält man auch das Volumen des verdrängten Wassers, oder, was dasselbe ist, das Volumen des betreffenden Körpers. Das ist wichtig für die Berechnung des spezifischen Gewichts.

§ 39. **Dichtigkeit und spezifisches Gewicht.** *Dichtigkeit* [cf. § 4] ist die Masse eines Körpers bezogen auf sein Volumen $D = \frac{M}{V}$. Dies ist also eine physikalische Größe von einer bestimmten Dimension [s. Anhang]. *Gewicht* eines Körpers heißt das

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0038-8

Produkt aus Masse und Beschleunigung durch die Erdanziehung $P = mg$ [cf. § 17]. Daraus folgt, daß das Gewicht gleicher Volumina von der Dichtigkeit der Körper abhängt; denn größere Dichtigkeit bedeutet ja eben mehr Masse in der Volumenseinheit. 1 Liter Quecksilber z. B. wiegt mehr als 1 Liter Weingeist. Es ist nun ein praktisches Bedürfnis, dadurch schnell die Dichtigkeit resp. das Gewicht eines Körpers zu beurteilen, daß man es mit der Dichtigkeit resp. dem Gewicht eines bekannten Körpers, gewöhnlich Wasser von 4° C., vergleicht. In diesem Sinne spricht man vom spezifischen Gewichte (s) eines Körpers.

Spezifisches Gewicht eines Körpers heißt also das Verhältnis seiner Dichte zur Dichte des Wassers; anders ausgedrückt: das spezifische Gewicht gibt an, wieviel mehr ein Körper wiegt, als das gleiche Volumen Wasser von 4° C. Nicht immer wird Wasser als Einheit gewählt, sondern bei Gasen meistens Luft, bei den Elementen der Chemie Wasserstoff. Jedenfalls ist spezifisches Gewicht stets nur eine Verhältniszahl, der natürlich keine Dimension zukommt. Es wird jetzt klar sein, daß man die Gesetze vom Schwimmen auch so aussprechen kann: Ein Körper schwimmt in einer Flüssigkeit, wenn er spezifisch leichter ist als sie, sonst sinkt er unter.

§ 40. **Libelle.** Da luftförmige Körper spezifisch leichter sind als Flüssigkeiten, so steigen sie in ihnen auf. Darauf beruht u. a. die Libelle[1] oder Wasserwage (Fig. 25), die zur Bestimmung der Horizontalebene dient. Es ist dies eine kleine Glasröhre oder Dose, die bis auf eine kleine Luftblase mit Wasser etc. gefüllt ist. Die Blase l steigt nun immer so hoch wie möglich, steht also bei horizontaler Lage des Behälters genau unter der etwas ausgebuchteten Mitte ab seiner oberen Wand.

Fig. 25.

§ 41. **Bestimmung des spezifischen Gewichts.** Das Gewicht eines Körpers läßt sich auch ausdrücken durch das Produkt aus Volumen und spezifischem Gewicht $P = Vs$. Daraus folgt $s = \frac{P}{V}$. Es handelt sich also darum, das Volumen des Körpers zu finden. Dies entspricht aber nach dem Archimedischen Prinzip dem Gewicht des von ihm verdrängten Wassers bezw. der Gewichtsdifferenz in Luft und Wasser. Nennt man das Gewicht im Wasser P', so ist $s = \frac{P}{P - P'}$. Darauf beruhen die meisten Methoden.

1) Hydrostatische Wage: Das absolute Gewicht wird festgestellt, indem der Körper an einen Wagbalken gehängt und die Wagschale der

[1] *libella* Diminutiv von *libra* Wage.

anderen Seite mit den entsprechenden Gewichten belastet wird. Dann wird unter den Körper ein Gefäß mit Wasser geschoben, so daß er ganz hineintaucht, und sein Gewicht wieder bestimmt. Die Differenz ergibt sein Volumen.

2) Nicholsons Gewichtsaräometer[1]: Wird der Körper auf die Schale S (Fig. 26) gebracht, so sinkt der Apparat im Wasser etwa bis m ein. An Stelle des Körpers werden nun soviel Gewichte auf den Teller gelegt, bis derselbe Effekt erreicht ist. So wird das absolute Körpergewicht bestimmt. Bringt man dann den Körper in das Körbchen k und legt oben auf den Teller so viel Gewichte zu, daß der Apparat wieder bis m einsinkt, so erhält man den Gewichtsverlust im Wasser, mithin das Volumen des Körpers.

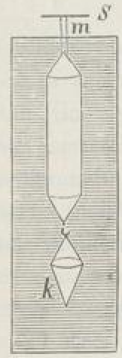

Fig. 26.

3) Das Skalenaräometer dient zur Bestimmung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten. Es besteht aus einer geschlossenen, unten beschwerten Glasröhre, mit einer empirischen Skala, an der das spezifische Gewicht direkt abgelesen wird. Je größer nämlich das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit ist, um so weniger tief wird das Aräometer einsinken. Auf diesem Prinzip beruhen u. a. die Urometer (für Urin), Alkoholometer etc.

4) Das Pyknometer[2] dient ebenfalls zur Bestimmung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten. Es ist ein kleines Fläschchen, das man bis zu einer bestimmten Marke einmal mit Wasser und dann mit der betreffenden Flüssigkeit gefüllt wiegt. Das Verhältnis der gefundenen Gewichte ergibt unmittelbar das spez. Gewicht. Das Pyknometer ist aber auch für zerkleinerte feste Substanzen, besonders solche in Pulverform, verwendbar. Wiegt es nämlich mit Wasser gefüllt P, mit Wasser und der Substanz gefüllt P', während letztere G wiegt, so ist das Gewicht des durch die Substanz verdrängten Wassers $P + G - P'$.

5) Auch durch kommunizierende Röhren läßt sich das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten finden. Sind (Fig. 27) in beiden Röhren verschiedene Flüssigkeiten, so steht die spezifisch leichtere höher; sie hat z. B. die Höhe h', die spezifisch schwerere die Höhe h. An einer beliebigen Stelle $a\,b$ vom Querschnitt c ist Gleichgewicht vorhanden, wenn

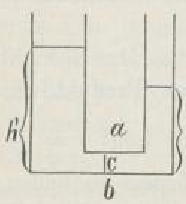

Fig. 27.

$$c\,h\,s = c\,h'\,s'$$
$$h\,s = h'\,s'$$
$$s : s' = h' : h.$$

Die spezifischen Gewichte verhalten sich also umgekehrt wie die Höhen. Kennt man daher das spezifische Gewicht der einen Flüssigkeit, so läßt sich das der anderen leicht berechnen.

§ 42. **Kohäsion und Adhäsion.** Zwischen den einzelnen Teilchen der Flüssigkeiten (und festen Körper) findet eine Anziehung

[1] ἀραιός dünn.
[2] πυκνός dicht.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0040-8 DFG

statt (Kohäsion[1]). Darauf beruht es, daß kleine Tropfen Kugelgestalt annehmen. Gewöhnlich wirkt dieser Kohäsion die Schwerkraft entgegen [cf. § 36]. Eliminiert man aber dieselbe, so nehmen auch größere Flüssigkeitsmengen Kugelform an. Zuerst zeigte dies Plateau, indem er Öl vorsichtig in eine Flüssigkeit von gleichem spezifischen Gewicht brachte. Befinden sich Flüssigkeiten in engen Röhren, so wirkt der Kohäsion auch noch die Adhäsion[2] entgegen, d. h. die Anziehung zwischen Gefäßwand und Flüssigkeit. Überwiegt die Adhäsion, so ist die Oberfläche der Flüssigkeit konkav, z. B. bei Wasser in Glasröhren; überwiegt die Kohäsion, so ist sie konvex, z. B. bei Quecksilber in Glasröhren. Eine solche gekrümmte Oberfläche heißt auch Meniskus.

§ 43. **Oberflächenspannung und Kapillarität.** Die obersten Schichten von Flüssigkeiten zeigen die interessante Eigenschaft, daß sie dichter sind als die übrigen. Sie bilden gewissermaßen ein Häutchen. Darauf beruht es, daß manche Insekten auf dem Wasser laufen können, daß eine Nadel auf Wasser schwimmt etc. Diese Eigenschaft heißt Oberflächenspannung.

Man kann dies so erklären: Während bei einem kugelförmigen Teilchen im Innern einer Flüssigkeit die anziehenden Kräfte sich von allen Seiten das Gleichgewicht halten, werden an der Oberfläche die anziehenden Kräfte in *a b c* (Fig. 28) nicht kompensiert, sie werden also *d e* nach unten zu ziehen suchen. Aus Fig. 29 erhellt nun ohne weiteres, daß die Spannung bei konvexen Oberflächen größer, bei konkaven aber kleiner ist als bei ebenen. Da geht aus den betreffenden Größen des Stückes *a b c* hervor, das ja durch seine Anziehung die Oberflächenspannung hervorruft. Hierdurch finden die Erscheinungen in Kapillaren[3] ihre Erklärung. Ohne auf die komplizierten Verhältnisse hier näher einzugehen, sei nur bemerkt, daß, wenn man ein solches enges

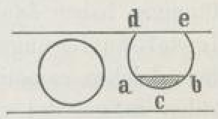

Fig. 28.

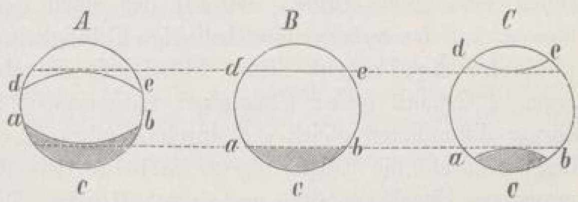

Fig. 29.

[1] *cohaereo* zusammenhangen.
[2] *adhaereo* anhaften.
[3] *capillus* Haar; also Haarröhrchen, d. h. sehr feine Röhren.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0041-4

Röhrchen in eine Flüssigkeit einsetzt, das Niveau im Röhrchen entweder höher ist als das der anderen Flüssigkeit (Kapillarattraktion) oder tiefer (Kapillardepression). Kapillarattraktion, die gewöhnliche Erscheinung, muß natürlich stattfinden, wenn die Oberflächenspannung im Röhrchen geringer ist als in der anderen Flüssigkeit, wenn also der Meniskus in ihm konkav ist [cf. § 42]. Auf der Kapillarität beruhen viele wichtige Erscheinungen, z. B. das Sickern von Wasser durch poröse Wände, das Aufsteigen von Wasser in Zucker, wenn nur eine Stelle benetzt ist etc.

§ 44. **Diffusion und Osmose.** Diffusion[1] heißt die Eigenschaft zweier Flüssigkeiten (oder Gase), sich, wenn sie übereinander geschichtet sind, allmählich zu durchdringen. Das ist z. B. bei Wasser und Alkohol der Fall. Flüssigkeiten, deren Kohäsion größer ist als die gegenseitige Adhäsion, diffundieren aber nicht, z. B. Wasser und Öl. Sind die Flüssigkeiten (oder Gase) durch poröse Scheidewände, besonders tierische oder pflanzliche Membranen (Schweinsblasen etc.) getrennt, so erfolgt die Vermischung ev. durch diese hindurch und heißt dann Osmose[2] oder Endosmose. Bei hinreichender Verdünnung haben äquimolekulare[3] Lösungen, die mit gleichen Volumina desselben Lösungsmittels hergestellt sind, bei gleicher Temperatur den gleichen osmotischen Druck; und zwar ist dieser (von den Molekülen ausgeübte) osmotische Druck gleich dem Druck eines Gases von gleicher Temperatur, das in gleichen Raumteilen ebensoviel Moleküle enthält wie die Lösung Moleküle gelösten Stoffes (van't Hoff'sche Gesetze). Dieser Vorgang spielt bei der Ernährung der Zellen eine große Rolle. Ist auf der einen Seite der Membran Wasser, auf der anderen eine beliebige Flüssigkeit, so heißt das osmotische Äquivalent dieser Flüssigkeit die Menge Wasser, die gegen 1 Gramm dieser Flüssigkeit ausgetauscht wird. Nicht alle Körper diffundieren gleich gut durch Membranen. Graham teilte in dieser Hinsicht die Körper ein in kolloide (leimähnliche), zu denen besonderes Eiweiß gehört, und kristalloide. Die ersteren diffundieren fast gar nicht durch Membranen, mit anderen Worten, ihr osmotisches Äquivalent ist unendlich groß; letztere gehen leicht hin-

---

[1] *diffundo* ausbreiten.

[2] ὠσμός das Stoßen.

[3] Äquimolekular oder isomolekular heißen Lösungen, die in gleichen Volumina dieselbe Anzahl Moleküle des gelösten Stoffes enthalten. Anders ausgedrückt: die in gleichen Volumina enthaltenen Massen der gelösten Stoffe verhalten sich hier wie deren Molekulargewichte. [Cf. Avogadro'sche Hypothese § 45].

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0042-9 DFG

durch. Man hat somit ein bequemes Mittel, kolloide von kristalloiden Körpern zu trennen. Das Verfahren heißt Dialyse, der Apparat Dialysator. Befindet sich zwischen der Lösung eines Stoffes und dem reinen Lösungsmittel eine sog. halbdurchlässige Membran (d. h. eine solche, die nur das Lösungsmittel, nicht aber den gelösten Stoff hindurchläßt), so tritt auf Seite der Lösung ein Überdruck (osmotischer Druck) ein, der die Membran nach außen vorwölbt, bis der von ihr geleistete Gegendruck einen Gleichgewichtszustand herbeiführt. Dieser osmotische Druck hängt nach van't Hoff nicht von der Natur der halbdurchlässigen Membran, sondern nur von der Temperatur, Konzentration und chemischen Beschaffenheit der Lösung ab.

Der osmotische Druck läßt sich also bei bekannter Temperatur aus dem Molekulargewicht berechnen. Bezeichnet man nämlich als Gramm-Molekel oder Mol eine solche Anzahl Gramm, die dem Molekulargewicht der betreffenden Substanz entspricht (also z. B. 2 Gramm Wasserstoff, 32 Gramm Sauerstoff, 28 Gramm Stickstoff etc.), und berücksichtigt, daß nach Avogadro alle Gase in gleichgroßen Volumina gleichviel Moleküle enthalten, so folgt zunächst der Satz: Die Gramm-Moleküle der Gase besitzen bei gleichen Druck- und Temperaturverhältnissen alle dasselbe Volumen. Was für Gase gilt, gilt aber auch nach van't Hoff für verdünnte Lösungen [s. o.]. Da nun 1 Mol Wasserstoff bei 0° und 760 mm Druck das Volumen von 22,4 Liter besitzt, muß auch jedes andere Mol eines Gases bezw. einer Substanz in sehr verdünntem Lösungsmittel das gleiche Volumen einnehmen. 1 Mol Rohrzucker z. b. ($C_{12}H_{22}O_{11}$) wiegt 342 Gramm. 1 Gramm Rohrzucker würde daher in Gasform bei 0° und 760 mm Druck $\frac{22,4}{342}$ Liter = 65,5 Kubikzentimeter ausfüllen. Löst man dagegen 1 Gramm Rohrzucker in 100 Gramm Wasser auf, so beträgt das Volumen dieser Lösung bei 0° und 760 mm Druck 100,6 Kubikzentimeter. Zur Berechnung des osmotischen Druckes dient nun das Boyle-Mariotte'sche Gesetz [§ 48], das auch für verdünnte Lösungen gilt. Es verhält sich also der (osmotische) Druck in der Lösung zum Druck des Dampfes umgekehrt wie die entsprechenden Volumina, $x : 760 = 65,5 : 100,6$. Der osmotische Druck in der 1 % Zuckerlösung beträgt somit bei 0° $x = \frac{760 \, . \, 65,5}{100,6}$ = zirka 495 mm Quecksilber. Bei t^0 beträgt er nach dem Gay-Lussac'schen Gesetze [§ 82] $\frac{495 \, . \, T}{273}$. Danach kann man auch den osmotischen Druck bei der Gefrierpunktstemperatur berechnen [cf. § 89].

D. Gesetze der luftförmigen Körper.

§ 45. **Grundeigenschaften.** Die luftförmigen Körper oder gasförmigen Flüssigkeiten teilt man ein in Gase und Dämpfe, die sich dadurch unterscheiden, daß Gase schon bei gewöhnlicher Tem-

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0043-5

peratur luftförmig sind, Dämpfe erst bei erhöhter Temperatur. Luftförmige Körper sind ohne bestimmtes Volumen und ohne bestimmte Gestalt; sie haben das Bestreben, sich auszudehnen und jeden gegebenen Raum als homogene Masse auszufüllen. Das erklärt man durch die Annahme, daß die Moleküle sich gegenseitig nicht anziehen, sondern im Gegenteil eine geradlinige, fortschreitende Bewegung besitzen, bis sie aneinander oder an die Wand anprallen (sog. kinetische Gastheorie). Da also die Größe der Molekel gegenüber den Intermolekularräumen verschwindend klein ist, so sind nach der Hypothese von Avogadro in gleichen Volumina von Gasen bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl Moleküle enthalten. Gase und Dämpfe haben mit Flüssigkeiten das gemein, daß ein Druck in ihnen allseitig fortgepflanzt wird, daß sie infolge ihres Gewichts einen bestimmten Druck auf den Boden ausüben, der allerdings gewöhnlich sehr klein ist, und daß ein Körper in ihnen soviel an Gewicht verliert, als das gleiche Volumen des betreffenden Gases wiegt. Sie unterscheiden sich aber dadurch von ihnen, daß sie sehr leicht kompressibel sind, und daß abgeschlossene nicht zu große Gasvolumina auf alle Wände des Gefäßes an allen Stellen gleichen Druck ausüben. Letztere Tatsache findet ihre Erklärung darin, daß die Moleküle fortwährend an die Wand des Gefäßes anprallen.

§ 46. **Luftdruck.** Daß luftförmige Körper auch der Schwere unterworfen sind, erkennt man wegen ihrer geringen Dichte (1 l Luft wiegt z. B. ca. 1 gr) nur bei großen Gasmassen, z. B. bei der Atmosphäre. Diese ist im wesentlichen ein Gemenge von 80 % Stickstoff und 20 % Sauerstoff und hat eine Höhe von ca. 150 km. Die große Bedeutung des Luftdrucks erkannte zuerst Torricelli, indem er auf ihn die Erscheinung zurückführte, daß Wasser in luftleere Räume eindringt. Vorher hatte man angenommen, dies geschehe, weil die Natur keine leeren Räume dulde (horror vacui). Um zu zeigen, daß doch ein Vakuum vorkommt, füllte er eine am oberen Ende geschlossene 1 m lange Röhre mit Quecksilber und stülpte sie in ein ebenfalls mit Quecksilber gefülltes Gefäß um; dann fiel zuerst das Quecksilber in der Röhre, blieb dann aber in einer Höhe von 76 cm stehen; darüber ist ein luftleerer Raum (Torricelli's Vakuum). Der Luftdruck, der von oben auf das Gefäß drückt, hält also der 76 cm hohen Quecksilbersäule in der Röhre das Gleichgewicht. Man sagt dann: der Luftdruck beträgt 76 cm Quecksilber. (Da Wasser leichter ist als Quecksilber [spez. Gew. 13,6], so gehört eine 10 m hohe Wassersäule dazu, dem Luftdruck das Gleichgewicht zu halten.)

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0044-1

Demnach ist die Größe des Luftdrucks auf 1 qcm = 76 . 13,6, also ca. 1 kg. Diese Druckeinheit nennt man eine Atmosphäre; demnach ist z. B. ein Druck von 2 Atmosphären vorhanden, wenn ein Dampf oder eine Flüssigkeit auf 1 qcm ihrer Wandung einen Druck von 2 kg ausübt. Der Luftdruck auf die gesamte Oberfläche eines Menschen beträgt ca. 15000 kg. Daß dadurch der Mensch nicht zerdrückt wird, beruht darauf, daß auch im Innern des Körpers der gleiche Luftdruck herrscht. Der Luftdruck ist es auch z. B., der den Oberschenkelknochen in der Pfanne des Beckens hält.

§ 47. Das **Barometer**[1] dient zum Messen des Luftdrucks.

1) Die Gefäßbarometer (Fig. 30) entsprechen genau dem TORRICELLI'schen Apparate [§ 46] und sind deshalb nicht sehr praktisch, weil sie schlecht transportabel sind, und weil das Flüssigkeitsniveau im unteren Gefäß, und damit auch der Nullpunkt der Skala, fortwährend wechselt. Das beste Gefäßbarometer ist das von FORTIN, bei dem das Quecksilber sich unten in einem Lederbeutel befindet, der durch eine Schraube gehoben und gesenkt werden kann So kann das Quecksilberniveau stets auf die gleiche Höhe eingestellt werden.

Fig. 30.

2) Die Heberbarometer (Fig. 31) bestehen aus einer heberartigen Glasröhre mit offenem kurzen und geschlossenem langen Schenkel. Die Größe des Luftdrucks wird hier durch den Niveauunterschied der Quecksilbersäulen in beiden Röhren gemessen.

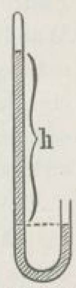

Fig. 31.

Gute (Gefäß- und Heber-) Barometer müssen folgende Bedingungen erfüllen:

1) Das TORRICELLI'sche Vakuum muß ganz luftleer sein. Man erreicht das durch Auskochen des Quecksilbers in der Röhre; dadurch wird nämlich die der Glaswand anhaftende Wasserhaut ausgetrieben, die sonst in das Vakuum verdampfen würde.

2) Die Glasröhre muß genau kalibriert sein, d. h. die einzelnen Striche der Skala müssen gleichen Volumsteilen der Röhre entsprechen.

3) Das Quecksilber muß rein sein, da sonst sein spezifisches Gewicht beeinflußt wird. Da auch die Temperatur einen Einfluß hat, indem das Quecksilber durch die Ausdehnung bei der Erwärmung ein kleineres spezifisches Gewicht bekommt, so reduziert man die Beobachtungen auf eine Temperatur von 0°, d. h. man berechnet, welche Höhe das Quecksilber bei 0° haben würde. Man spricht dann von reduziertem Barometerstand. Abgelesenen Barometerstand nennt man dagegen die Niveaudifferenz

[1] βάρος Schwere, μέτρον Maß.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0045-6
DFG

des Quecksilbers in dem luftleeren und in dem mit Luft in Verbindung stehenden Gefäß.

4) Die Barometerröhre darf nicht zu eng sein, weil sonst die Kapillardepression zu groß wird. Beim Heberbarometer ist dieses Übel eliminiert, da es in beiden Röhren gleich ist.

3) Die Aneroidbarometer[1] beruhen darauf, daß kreisförmig gebogene, luftleere, metallische Röhren sich um so stärker krümmen, je größer der äußere Luftdruck wird. Dabei nähern sich also ihre Enden, während sie bei abnehmendem Luftdruck auseinandergehen. Diese Bewegung der Enden wird durch einen Winkelhebel auf einen Zeiger übertragen, der an einer empirisch bestimmten Skala vorbeigeht. Diese Barometer sind bequem zum Transport, aber nicht sehr genau.

Das Barometer dient also vor allem zur Bestimmung des Luftdrucks, dann aber auch zur Höhenmessung. Es ist ja klar, daß in höheren Regionen, auf denen eine kleinere und weniger dichte Luftsäule lastet, der Luftdruck geringer sein muß. Schließlich dient das Barometer auch zur Wetterbestimmung. Er steigt z. B., wenn die Lufttemperatur sinkt, wenn die Luft trockener wird, dagegen fällt es, wenn starke Luftströmungen herrschen. Die Linien, welche Orte gleichen Luftdrucks verbinden, heißen Isobaren. Sie wechseln natürlich beständig.

§ 48. **Boyle-Mariotte'sches Gesetz.** Unter Spannung eines Gases (oder Dampfes) versteht man sein mehr oder minder großes Bestreben, sich auszubreiten, mithin auch den Druck, den es auf die Wand des einschließenden Gefäßes ausübt. Dieser Druck ist natürlich ebensogroß wie der Druck der Wand auf das Gas. Wird nun ein Gas von bestimmtem Volumen v in einen engeren Raum v' zusammengepreßt, so wird es unter höheren Druck p_1 gebracht, oder anders ausgedrückt, seine Spannung wird größer:

$$p : p_1 = v_1 : v.$$

Also: bei gleichbleibender Temperatur ist die Spannung eines Gases dem Volumen umgekehrt proportional. Da nun ein und dieselbe Gasmenge in einem größeren Raume weniger dicht ist als in einem kleinen, so heißt das Gesetz auch:

Bei gleichbleibender Temperatur ist die Spannung eines Gases der Dichte proportional.

Da $p_1 v_1 = p_2 v_2 = p_x v_x$ ist, so folgt daraus, daß pv für eine bestimmte Gasmenge (bei derselben Temperatur) eine konstante Größe vorstellt [cf. § 82]. Das Boyle-Mariotte'sche Gesetz gilt indes nur innerhalb bestimmter Grenzen.

[1] α privativum, νηρός feucht, flüssig.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0046-2 DFG

§ 49. Auf diesen Gesetzen beruhen u. a. folgende Erscheinungen:

Das **Saugen** geschieht dadurch, daß im Munde ein luftverdünnter Raum hergestellt wird, in den durch den äußeren Luftdruck Flüssigkeit hineingetrieben wird. Man benutzt gewöhnlich eine Pipette dazu, d. i. eine graduierte Glasröhre mit Bauch in der Mitte. Nimmt man sie aus dem Munde und hält schnell das obere Ende mit dem Finger zu, so kann die Flüssigkeit nicht herausfließen, da sie vom äußeren Luftdruck getragen wird.

Das **Einatmen** beruht darauf, daß der Brustraum durch die Atemmuskeln erweitert wird. Dadurch wird der Luftdruck zwischen Lungen und Brustwand kleiner als der äußere; es strömt Luft in die Lungen. Beim Ausatmen ist es umgekehrt.

Der **Schenkelheber** (Fig. 32) besteht aus einer gekrümmten Röhre, deren eines Ende in die Flüssigkeit *c* taucht. Solange bei *a* gesaugt wird, fließt natürlich wieder wegen der Differenz des Luftdruckes die Flüssigkeit durch die Röhre nach unten. Dies dauert aber noch fort, auch nachdem das Saugen aufgehört hat. Denn sonst würde ja bei *b* ein luftleerer Raum entstehen. Es ist ohne weiteres klar, daß der aufsteigende Schenkel des Hebers, wenn die Flüssigkeit z. B. Quecksilber ist, nicht höher als 76 cm sein darf.

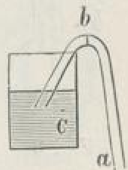

Fig. 32.

Wasserpumpen sind Apparate, um Wasser in die Höhe zu befördern.

Die Saugpumpen haben folgendes Prinzip: In dem Saugrohr *a* (Fig. 33) ist oberhalb des Wasserspiegels ein Ventil *b* (Bodenventil), das sich nur nach oben öffnet. Darüber kann der in der Mitte durchbohrte Kolben *c* durch das Hebelwerk *d* wasser- und luftdicht auf- und niederbewegt werden. Die Öffnung im Kolben ist durch ein Kolbenventil geschlossen, das sich auch nur nach oben öffnet. Wird nun der Kolben von unten nach oben gezogen, so entsteht unter ihm ein luftverdünnter Raum, in den Wasser einströmt. Da nun durch das Bodenventil nichts zurückfließen kann, sammelt sich nach einigen Zügen über demselben soviel Wasser an, daß es durch den Kolben hindurchdringt. Ist es einmal über dem Kolben, so kann es nicht mehr zurück und wird bis zur Ausflußöffnung *e* gehoben. Es ist leicht einzusehen, daß Saugpumpen Wasser nie über 10 m heben können.

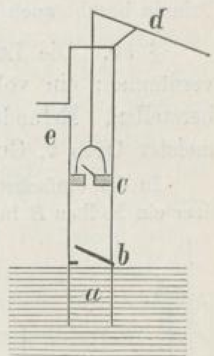

Fig. 33.

Die Druckpumpen haben ebenfalls ein Bodenventil *a* (Fig. 34). Der Kolben ist aber nicht durchbohrt; über dem Bodenventil ist seitlich eine Steigröhre mit einem Ventil, das sich in der Richtung des Pfeils öffnet. Wenn hier das Wasser über das Bodenventil gekommen ist, wird es durch den niedergehenden Kolben, der event. durch Dampfkraft getrieben wird, in die Steigröhre zu beliebiger Höhe gepreßt.

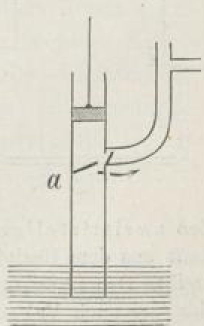

Fig. 34.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0047-8 DFG

Manometer[1] sind Apparate, um die Spannung (Druck) von Gasen in einem Raum von außen anzuzeigen. Die offenen M. bestehen aus doppelt gebogenen Röhren (Fig. 35), die mit einer Flüssigkeit, z. B. Quecksilber, gefüllt sind und durch das eine Ende *b* mit der Luft, durch das andere *a* mit dem betreffenden Raum, z. B. einem Dampfkessel, kommunizieren. Ist der Druck in letzterem gleich dem Atmosphärendruck, so steht beiderseits die Flüssigkeit gleich hoch. Ist aber der Druck im Kessel höher, so steigt die Flüssigkeit im Schenkel *b*. Die Höhendifferenz plus dem Barometerstande entspricht dann dem Druck im Kessel. Für hohe Spannungen verwendet man geschlossene M., bei denen der Schenkel *b* oben geschlossen ist und über der Sperrflüssigkeit eine bestimmte Luftmenge enthält. Ist deren Volumen bei einem Atmosphärendruck bekannt, so entspricht nach dem Mariotte'schen Gesetze der halben Länge der Luftsäule ein Druck von 2 Atmosphären etc.

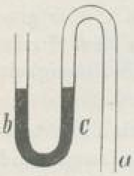

Fig. 35.

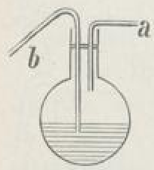

Fig. 36.

Der **Heronsball** ist ein Gefäß, aus dem durch komprimierte Luft Flüssigkeit herausgespritzt wird. Hierher gehört z. B. die Spritzflasche der Chemiker (Fig. 36). Wird durch *a* Luft eingeblasen, so wird die Luft in der Flasche komprimiert und drückt das Wasser durch die Röhre *b* heraus. Auf diesem Prinzip beruht auch der Windkessel der Feuerspritze.

§ 50. Die **Luftpumpe** dient dazu, die Luft in einem Raum zu verdünnen; ein vollständig luftleerer Raum läßt sich natürlich nicht herstellen. Erfunden wurde sie 1650 von dem Magdeburger Bürgermeister Otto v. Guericke.

In der einfachsten Form besteht sie aus einem Stiefel *AA* (Fig. 37), in dem ein Kolben *B* luftdicht auf und nieder bewegt wird. Vom Stiefel geht eine Röhre zur Glasglocke *D*, dem sogenannten Rezipienten, in dem die Luft verdünnt werden soll. Der Hahn *C* hat eine doppelte Bohrung: wenn der Kolben *B* in die Höhe gezogen wird, kann die Luft aus *D* durch *C* hindurchgehen. Damit beim Niedergehen des Kolbens die Luft aber nicht zurück nach *D* geht, wird der Hahn *C* so gedreht, daß er diesen Weg versperrt, durch eine zweite Öffnung aber mit der Außenluft kommuniziert. Die Luftverdünnung kann wegen des sogenannten schädlichen Raums, d. i. der Raum zwischen dem am unteren Ende seines Weges angelangten Kolben *B* und dem Hahn *C*, einen bestimmten Grad nicht übersteigen. Bei den zweistiefeligen Luftpumpen steigt immer der eine Kolben und saugt Luft aus dem Rezipienten, während der andere heruntergeht und Luft austreibt. Den Luftdruck im Rezipienten mißt man durch ein Manometer [§ 49], das hier auch Vakuummeter heißt.

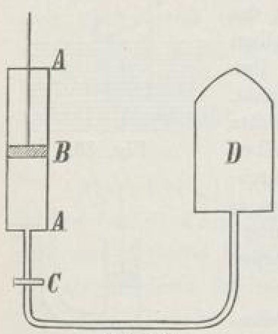

Fig. 37.

[1] μανός dünn.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0048-3

Die Wirkung der Luftpumpe demonstrierte GUERICKE durch den berühmten Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln (1654). Er setzte zwei hohle Halbkugeln zusammen und pumpte aus ihnen die Luft so weit aus, daß jederseits acht Pferde sie nicht auseinanderbringen konnten; dies beruht natürlich auf dem Überwiegen des äußeren Luftdruckes.

Vollkommener sind die Quecksilberluftpumpen nach GEISSLER, die auf dem TORRICELLI'schen Vakuum basiert sind und Verdünnungen von $^1/_{100000}$ Atmosphäre zu erreichen gestatten.

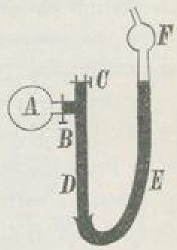

Fig. 38.

Das Glasrohr D (Fig. 38) ist durch den Gummischlauch E mit dem oben offenen Gefäß F verbunden und kann durch den Hahn B mit dem auszupumpenden Gefäß A, durch den Hahn C mit der atmosph. Luft verbunden resp. davon abgesperrt werden. D und E sind mit Quecksilber gefüllt. Wird C geschlossen und F gesenkt, so fällt das Quecksilber in D, und es entsteht oben ein luftleerer Raum, in den nach Öffnung von B aus A Luft abströmt. Wird nun B geschlossen, C geöffnet, so wird durch Heben von F diese Luft durch C hinausgedrängt. Dies wird öfters wiederholt.

§ 51. Das **Archimedische Prinzip** gilt auch für Luftarten; und zwar beträgt der Auftrieb in gewöhnlicher Luft 1,2 mg pro ccm, also 1,2 kg pro cbm. Da also in der Luft sowohl die zu wiegenden Körper wie die Gewichtsstücke einen Gewichtsverlust erleiden gleich dem Gewicht der von ihnen verdrängten Luft, so ist von zwei scheinbar gleich schweren Körpern in Wirklichkeit derjenige schwerer, der das größere Volumen besitzt. Um ganz genaue Resultate zu erhalten, ist es daher nötig, die Wägungen auf den luftleeren Raum zu reduzieren. Ist p das Gewicht des Körpers, p' das der Gewichtsstücke, a und a' der Auftrieb in Luft, so ist beim Gleichgewicht $p - a = p' - a'$, also $p = p' + a - a'$. a und a' findet man als Produkt aus Volumen (= Gewicht dividiert durch spezif. Gewicht) und 1,2 mg. — Ferner müssen spezifisch leichtere Körper als die Luft in ihr aufsteigen. Darauf beruht der Luftballon. Die ersten von MONTGOLFIER konstruierten waren mit erwärmter Luft gefüllt. Später wendete man Wasserstoff und jetzt meist Leuchtgas an. Das Problem eines lenkbaren Luftballons ist bisher noch nicht vollkommen gelöst.

§ 52. **Bewegung der Luftarten.** Auch für die Gase gilt das Gesetz, daß die Ausflußgeschwindigkeit aus einem Gefäß $v = \sqrt{2gh}$ ist [cf. § 37]. Gase haben nun aber keine bestimmte Höhe, sondern diese hängt von der Dichtigkeit ab. Je dichter eine Gasmenge

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0049-2 DFG

ist, desto geringer ist natürlich ihre Höhe, oder mit anderen Worten: die Höhen sind umgekehrt proportional den Dichten. Daher heißt obiges Gesetz für die Gase: Die Ausflußgeschwindigkeiten sind umgekehrt proportional den Quadratwurzeln aus den Dichten resp. spezifischen Gewichten. Dasselbe Gesetz gilt übrigens auch für die Geschwindigkeit der Diffusion und Osmose von Gasen [§ 44].

Wenn ein Gas aus einem engen Rohr in ein weites überströmt, so dehnt es sich aus, seine Dichtigkeit nimmt also an dieser Stelle ab. Es entsteht daher ein negativer Druck, der Luft und Flüssigkeiten ansaugen kann. Sehr schön zeigt dies ein Versuch von Faraday: Bläst man durch die Spalten der ausgestreckten, aneinandergelegten Finger gegen ein nicht zu großes Stück Papier auf der anderen Seite, so wird dieses angesaugt. Wird z. B. bei *a* (Fig. 39) stark geblasen, so steigt die Flüssigkeit in *c*. Darauf beruhen die Inhalatorien, Flüssigkeitszerstäuber etc., u. a. auch der

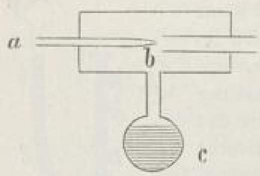

Fig. 39.

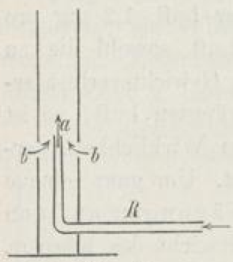

Fig. 40.

Bunsenbrenner. Durch *R* (Fig. 40) zugeleitetes Leuchtgas strömt bei *a* aus und saugt durch die Öffnungen *b* des Mantels Luft an, mit der es sich innig mengt. Zündet man das Gasgemenge an der oberen Öffnung des Brenners an, so resultiert infolge der reichlichen Sauerstoffzufuhr eine vollkommene Verbrennung des Kohlenstoffes, und man erhält eine sehr heiße, nicht rußende, aber wenig leuchtende Flamme. Durch Verschluß von *b* entsteht natürlich eine gewöhnliche Gasflamme.

§ 53. **Adsorption und Absorption.** Zwischen Gasen und der Oberfläche fester Körper findet eine starke Anziehung statt. Die Gase bilden dort eine dicke Schicht, sie werden verdichtet (Adsorption). So haben verschiedene Körper (z. B. Chlorkalzium) die Fähigkeit, den Wasserstoff der Luft zu Wasser zu verdichten; sie heißen daher hygroskopisch[1]. Bei der Verdichtung muß Wärme entstehen, die mitunter sehr groß ist. Wenn z. B. Wasserstoff auf mit Sauerstoff gesättigten Platinschwamm (d. i. fein verteiltes Platin) strömt, wird diese Wärmeentwicklung so stark, daß das Platin, glühend wird und der Wasserstoff sich entzündet (Doebereiner's Feuerzeug). Hierauf beruhen auch einige moderne Gasselbstzünder.

[1] ὑγρός feucht.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0050-3

Absorption heißt die Erscheinung, daß Gase von festen und flüssigen Körpern „verschluckt" werden. Von festen Körpern kommen besonders die porösen, z. B. Kohle, in Betracht. Die Fähigkeit gewisser Metalle, Gase aufzunehmen und so gewissermaßen Legierungen mit ihnen einzugehen, hat den besonderen Namen Occlusion. So kann z. B. Palladium das 900fache seines Volumens an Wasserstoff aufnehmen.

Bei der Absorption durch Flüssigkeiten ist zu unterscheiden die chemische und physikalische. Bei ersterer verbindet sich das Gas mit der Flüssigkeit zu einer festen Verbindung, aus der es nur auf chemischem Wege freigemacht werden kann, z. B. Absorption von Kohlensäure in Kalilauge.

Die physikalische Absorption hängt ab 1) vom Druck, 2) von der Temperatur, 3) von der Natur der Flüssigkeit. Es wird ceteris paribus umsomehr Gas absorbiert, je größer der Druck (Henry) und je niedriger die Temperatur ist. Um also Gase aus Flüssigkeiten freizumachen, hat man zwei Wege: den Druck herabzusetzen oder die Temperatur zu erhöhen. Bezüglich des Drucks ist noch zu bemerken, daß bei Gasgemengen nur der Partiärdruck in Frage kommt, d. h. der Druck jedes einzelnen Gases, unabhängig von dem der anderen (Dalton). So hängt z. B. die Absorption von Sauerstoff im Wasser nicht vom ganzen Luftdruck, sondern nur vom Druck des Sauerstoffs der Luft ab. Wird also über eine Flüssigkeit, die ein Gas absorbiert enthält, ein anderes Gas geleitet, so wird, da der Partiärdruck des ersten Gases = 0 ist, das Gas aus der Flüssigkeit entweichen.

§ 54. **Reibung.** Wenn Gase und auch Flüssigkeiten in Gefäßen strömen, so erleiden sie an der Wand und auch in ihrem Inneren eine Reibung (äußere und innere R.). Man stellt sich nun vor, daß die äußerste Schicht infolge der Adhäsion zur Wand sich gar nicht bewegt, die mittelste Schicht am schnellsten, und daß zwischen beiden Extremen ein allmählicher Übergang der Geschwindigkeiten stattfindet.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf urn:nbn:de:hbz:061:2-22454-p0051-9