H. EBERT

# LEHRBUCH DER PHYSIK

IN ZWEI BÄNDEN

ERSTER BAND

# LEHRBUCH DER PHYSIK

NACH VORLESUNGEN AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU MÜNCHEN

VON

DR. H. EBERT
WEILAND PROFESSOR DER PHYSIK AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU MÜNCHEN
ORDENTLICHEM MITGLIEDE DER KGL. BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

ERSTER BAND

MECHANIK · WÄRMELEHRE

MIT 168 ABBILDUNGEN IM TEXT

ZWEITE UNVERÄNDERTE AUSGABE

LEIPZIG
VERLAG VON VEIT & COMP.
1917

# Vorwort.

In unserer fast überreichen Lehrbücherliteratur fehlt es nicht an vorzüglichen Darstellungen des Gesamtgebietes der Physik; erinnert sei nur an die bekannten und vielverbreiteten aus Universitätsvorlesungen erwachsenen Lehrbücher der Experimentalphysik. Warum also, wird man fragen, zu all den guten Büchern, die schon vorhanden sind, noch ein neues?

Um diese Frage zu beantworten, sei gestattet, kurz zu schildern, wie das vorliegende Buch entstanden ist. Als ich Ostern 1898 die Lehraufgabe für Physik an der technischen Hochschule zu München übertragen erhielt, hatte ich bis dahin den physikalischen Unterrichtsbetrieb nur an Universitäten, teils als Lernender, teils als Lehrender genauer kennen gelernt (Leipzig, Erlangen, Leipzig, Kiel). In meiner Münchener Stellung mußte ich mir bald darüber klar werden, daß die Anforderungen an eine gedeihliche naturwissenschaftliche, insbesondere physikalische Vorbildung bei den Lehraufgaben an einer technischen Hochschule wesentlich andere sind. Speziell die Ausbildung der jungen Ingenieure erfordert eine andersgeartete Auswahl, Anordnung und Ausgestaltung des Lehrstoffes, als sie bei einer Universitätsvorlesung geboten erscheint; letztere ist ja in erster Linie für die Studierenden der Medizin, Chemie, Pharmazie und allgemeinen Naturwissenschaften bestimmt; auch Juristen und Theologen wählen sie an einzelnen Universitäten gern als eines der von ihnen geforderten „Philosophica“.

Um mich zunächst darüber zu orientieren, welche physikalischen Kenntnisse in den Fachvorlesungen einer technischen Hochschule vorausgesetzt werden müssen, in welcher Form und in welchem Umfange sie also in der „Physik“ zu bieten sind, studierte ich die betreffenden Vorlesungen meiner Herrn Kollegen der technischen Fächer (besondere Anregung verdanke ich in dieser Beziehung der technischen

Mechanik des Herrn A. Föppl, den elektrotechnischen Darstellungen des Herrn C. Heinke, der technischen Thermodynamik des Herrn M. Schröter sowie den Arbeiten, welche aus dem Laboratorium für technische Physik unter der Leitung der Herren K. von Linde und O. Knoblauch hervorgegangen sind). Außerdem gaben mir zahlreiche Vorträge in hiesigen Ingenieurvereinen, ferner Exkursionen mit Kollegen technischer Fächer sowie Besprechungen mit hervorragenden Vertretern der Technik bei den Zusammenkünften für das Deutsche Museum in München willkommene Belehrung und boten Gelegenheit, auch technische Unterrichtsfragen zu erörtern. Endlich waren die Ausführungen der Unterrichtskommission der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte hierbei von Wert.

Auf Grund aller der so erhaltenen Anregungen reifte zunächst der Entschluß, von dem üblichen Schema der Stoffanordnung abzuweichen und statt dessen alles um diejenigen Allgemeinbegriffe zu gruppieren, welche bei den Anwendungen der physikalischen Gesetze die Hauptrolle spielen: die Energie mit ihrem Erhaltungsgesetze und die Entropie mit dem Gesetze ihres unabänderlichen Anwachsens bei allen natürlichen Prozessen; eine derartige Einteilung und Anordnung ist bereits von Herrn F. Auerbach in seinem „Kanon der Physik“ mit Glück durchgeführt worden.

Hierdurch wurde zunächst der Vorteil gewonnen, daß denjenigen Hörern, welchen schon vor ihrem Eintreten in die Hochschule ein reichliches Maß physikalischer Vorkenntnisse geboten wurde, der Gesamtstoff in einer auch für sie neuen Ausgestaltung vorgeführt und gewissermaßen von einer höheren Warte aus gezeigt werden konnte. Stellt man den Satz von der Erhaltung der Energie als eines der bestbegründeten Fundamentaltheoreme unserer gesamten naturwissenschaftlichen Erkenntnis an die Spitze des ganzen Lehrgebäudes, so ergeben sich andererseits die Spezialsätze in den Gebieten aller Einzelenergieformen verhältnismäßig einfach und direkt.

Ferner wurde den graphischen Verfahren, die in der Technik eine so überaus große Bedeutung gewonnen haben, hier ein breiter Raum vergönnt, und z. B. neben dem „Spannungsdiagramme“ auch das „Wärmediagramm“ mit aufgenommen. Um eine möglichste Vertrautheit mit diesen Hilfsmitteln anzubahnen und um darzutun, wie sie nicht nur den dargestellten Prozeß veranschaulichen, sondern auch seine Bilanz liefern (durch die umfahrene Fläche), sind „Kreisprozesse“ schon bei den einfachen mechanischen Arbeitsumsetzungen eingeführt worden.

Von der Verwendung der Grundoperationen der Differential- und Integralrechnung brauchte nicht zurückgeschreckt zu werden; die Abiturienten der Oberrealschulen sind mit denselben nach den neuen Lehrplänen vertraut; den anderen Zuhörern können sie an der Hand einfacher Beispiele in der Vorlesung selbst zunächst erläutert werden; ihre Vertiefung findet dann diese Begriffswelt in den parallel gehenden mathematischen Vorlesungen. Es ist geradezu erwünscht, daß die ungeheure Fruchtbarkeit der infinitesimalen Methoden auch durch zahlreiche physikalische Verwendungsbeispiele anschaulich gemacht wird. Dies gilt insbesondere auch für die Ausbildung der Lehramtskandidaten für Mathematik und Physik, welche in Bayern nicht nur den Landesuniversitäten, sondern auch der technischen Hochschule anvertraut ist, eine Maßnahme, die sich durchaus bewährt hat.

Endlich soll durch zahlreiche Rechenbeispiele, deren Behandlung mittels Rechenschiebers empfohlen wird, die unmittelbare Anwendbarkeit des eben Erläuterten gezeigt und der übliche Horror vor dem „Ausrechnen“ von vornherein möglichst zurückgedrängt werden. Diese „Aufgaben“ sind zum großen Teile dem Übungspraktikum entnommen und können also auch für dieses als willkommene Vergleichsbeispiele dienen.

Überall ist die anschauliche Erscheinung, also das Experiment, in den Vordergrund gerückt worden; dabei wurden viele neue Anordnungen, namentlich zur Demonstration in großen Hörsälen, ausprobiert, wobei ich mich der Unterstützung meines Kollegen, des Herrn Professor Dr. K. T. Fischer, sowie des Herrn Präparator Joh. Frieß zu erfreuen hatte. Vielleicht nimmt es wunder, unter den „Versuchen“ auch vielfach solchen zu begegnen, welche in den physikalischen Elementarunterricht gehören und dort wohl auch schon in den allermeisten Fällen vorgeführt werden; sie wurden hier des Zusammenhanges halber mit aufgeführt sowie auch aus Rücksicht auf diejenigen Hörer, für welche der Physikunterricht vor der Hochschule sich noch immer auf einen „Wandtafelunterricht“ beschränkt hatte; in der Vorlesung selbst werden nur die betreffenden Apparate aufgestellt und auf diese Versuche hingewiesen. Wenn sich die Hoffnungen auf eine allgemeine Hebung und namentlich gleichmäßigere Ausgestaltung des naturwissenschaftlichen Unterrichtes an allen der Hochschule vorausgehenden höheren Schulen erfüllen, können solche Versuche bei einer eventuellen Neuauflage vielleicht ganz weggelassen oder im Telegrammstil behandelt werden, wie dies schon bei manchen Einzelheiten, zu deren Besprechung in der Vorlesung die Zeit fehlt, geschehen ist. Wo die Vorführung des betreffenden Experimentes selbst in der Vorlesung nicht möglich ist, wie bei den Wärmekraft- und Kältemaschinen, bei der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit oder den Versuchen zur Begründung der Elektronen- und Relativtheorie, wurden zur Veranschaulichung geeignete, in großem Maßstabe ausgeführte Modelle herangezogen.

Beim Vergleiche mit anderen Physikbüchern macht sich vielleicht ein gewisser Mangel an Figurendarstellungen der Apparate, namentlich im ersten Abschnitte (Mechanik) bemerkbar. Die Verlagshandlung ist jederzeit bereit gewesen, durch geeignete Ausstattung das Werk zu fördern; aber es schien entbehrlich, bekannte Anordnungen nochmals abzubilden. Auch ist Wert darauf zu legen, daß sich der Studierende die Fähigkeit aneignet, durch rasch vor, während oder nach der Vorlesung entworfene Skizzen (mit geschätztem Maßstabe) das Wesentliche eines Apparates selbst festzuhalten. Daher wurden auch in den späteren Abschnitten vorwiegend nur solche Figuren gegeben, die sich sonst selten oder gar nicht in den Lehrbüchern finden.

Besondere Mühe wurde darauf verwendet, alle Daten auf die neuesten und bestbegründeten Werte umzurechnen, z. B. auf die vom internationalen Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen in Vorschlag gebrachten; auch in den Bezeichnungen habe ich mich den Vorschlägen dieser Kommission möglichst angeschlossen, die ja auch in technische Kreise Eingang gefunden haben.

Das Buch ist aus meiner $13^1/_2$jährigen Lehrtätigkeit an der technischen Hochschule zu München hervorgegangen und daher in erster Linie als Begleit- und Ergänzungswerk zu den Vorlesungen über Experimentalphysik gedacht. Ich hoffe aber, daß es mir gelungen ist, die Ergebnisse der physikalischen Forschung auch für weitere Kreise, namentlich die in der Praxis stehenden Ingenieure, in brauchbarer Form dargestellt zu haben. Der Unvollkommenheiten der schließlichen Lösung der schwierigen und neuartigen Aufgabe bin ich mir voll bewußt und werde für jeden Verbesserungsvorschlag dankbar sein. Vor allem würde es mich freuen, aus dem Kreise meiner früheren Schüler, die nun z. T. schon in leitende Stellen aufgerückt sind, Winke und Ratschläge zu erhalten.

Bei der Bearbeitung im einzelnen verdanke ich viele wertvolle Anregungen meinem Kollegen, Herrn Professor Dr. K. T. Fischer, der auch eine Korrektur gelesen hat; Herr Kollege Professor Dr. O. Knoblauch unterwarf den zweiten Abschnitt (Wärmeenergie) einer genauen Durchsicht; Korrekturen haben ferner gelesen die Herren Privatdozent Dr. K. Kurz, Herr cand. math. et phys. W. Frieß, Herr Präparator Joh. Frieß und Frl. F. Arbeiter. Allen Genannten sowie der Verlagshandlung — letzterer für ihr Entgegenkommen bei jeder Gelegenheit — spreche ich meinen herzlichsten Dank aus.

München, September 1911.

**H. Ebert.**

# Inhaltsverzeichnis.

## I. Abschnitt.

## Die mechanischen Energieformen.

### 1. Kapitel. Der Arbeitsbegriff und seine Faktoren.



### 2. Kapitel. Arbeitsumformer.

## 3. Kapitel. Arbeiten der Oberflächenspannung.



## 4. Kapitel. Volumenänderungsarbeiten.

## 5. Kapitel. Formänderungsarbeiten.



## 6. Kapitel. Die kinetische Energie.

## 7. Kapitel. **Mechanische Ausgleichserscheinungen.**

## II. Abschnitt.

# Die Wärmeenergie.

### 1. Kapitel. Temperaturbegriff; absolute Temperaturskala; Wärmeausdehnung der Körper.

#### A. Temperaturmessung und die absolute Skala.



#### B. Die Volumenänderungen der Körper bei Temperaturänderungen.

## 2. Kapitel. Kalorimetrie.



## 3. Kapitel. Die thermischen Ausgleichserscheinungen (Wärmeleitung).



## 4. Kapitel. Die beiden Hauptsätze.

### A. Der I. Hauptsatz.

## Berichtigungen.

S. 80, Zeile 19 von unten lies: $l^2/2s$ statt $l^2/6s$

S. 115, Zeile 3 von unten lies: 11,18 m³ statt 111,8 m³.

S. 164 Zeile 12 von oben lies: $\omega = 0,649$ Atm (bei 0°) statt $\omega = 0,649$ at.

## Verzeichnis der gewählten Abkürzungen.

(Die in Klammern zugefügten Zahlen bezeichnen die Seite, auf der die betreffende Abkürzung eingeführt und erläutert wird.)

m = Meter (9).
km = Kilometer (10).
hm = Hektometer (10).
dkm = Dekameter (10).
dcm = Dezimeter (10).
cm = Zentimeter (10).
mm = Millimeter (10).
$\mu$ = Mikron (10).
$\mu\mu$ = 1/1000 Mikron = 1/1 000 000 mm (10).
l = Liter (14).
dim = Dimension (14).
kg = Kilogramm (15).
g = Gramm (17).
mg = Milligramm (17).
t = Tonne = 1000 Kilogramm-Gewicht (18).
kgm = Kilogrammeter (19).
mt = Metertonne = 1000 Kilogramm-Meter Arbeit (19).
tkm = Tonnenkilometer (Transportleistung) (20).
$\bar{v}$ = Spezif. Volumen (Räumlichkeit) (24).
$\bar{s}$ = Spezif. Gewicht (26).
V.P.L. = Vertikalprojektionslampe (27).
H.P.L. = Horizontalprojektionslampe (27).
S.R.P. = Schattenrißprojektion (27).
$v_{At}$ = Atomvolumen (40)
$v_{Mol}$ = Molekularvolumen (42).
Hg = Quecksilber (40).
Mol = eine dem Molekulargewichte (in g) entsprechende Gewichtsmenge (42).
V = Vektorprodukt (78).
at = Technische Atmosphäre = Druck von 1 kg-Gew. auf 1 cm² Fläche (= 736 mm Hg-Säule von 0 °C) (106).
Atm = Physikalische Atmosphäre = 760 mm Hg (= 1,0333 kg/cm²) (106).
C.G.S.-System = Zentimeter-Gramm-Sekunden-System (216).
dyn = Dyne (216).
erg = Erg (217).
J = Joule (217).
W = Watt (218).
kW = Kilowatt (218).
PS = Pferdestärke (218).
PSst = Pferdestärkestunde = Arbeitsmaß = 270 000 kgm (219).
Wst = Wattstunde = 367 kgm (219).
kWst = Kilowattstunde (219).
°C = Grad Celsius (380).
°K = Grad der Kelvinschen Temperaturskala (380).
S.P. = Siedepunkt (388).
E.P. = Eispunkt (388).
A.d.K. = Ausdehnungskoeffizient (397).
W.E. = Wärmeeinheit (427).
Kal = große Kalorie = kg-Kalorie (433).
kal = kleine Kalorie = g-Kalorie (433).
W.L.K. = Wärmeleitungskoeffizient (461).
W.L. = Wärmeleitung (468).
Sm.P. = Schmelzpunkt (541).
$\mathcal{A} = 1/\mathcal{J} = 1/427{,}2$ = Äquivalentwerte (485).

ERSTER ABSCHNITT

# DIE MECHANISCHEN ENERGIEFORMEN

Die Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten der Mechanik können in solche eingeteilt werden, bei denen die „Zeit“ keine Rolle spielt, und solche, bei denen diese Größe ein wesentlich mitbestimmender Faktor ist. Erstere pflegt man als die Erscheinungen der Ruhezustände oder der „Statik“ zu bezeichnen, letztere als die Bewegungsvorgänge oder die Erscheinungen der „Dynamik“. Die ersten fünf Kapitel sollen dieser „zeitlosen Mechanik“ gewidmet sein, die folgenden beiden dynamischen Betrachtungen.

Wir wollen jederzeit den wichtigsten Allgemeinbegriff der ganzen Physik, den der „Arbeit“ oder „Energie“, an die Spitze unserer Betrachtungen stellen und die Fülle von Einzelerscheinungen, die uns in diesem Abschnitte entgegentreten, geradezu einteilen nach den Energieformen, durch die sie vorwiegend beherrscht werden, wobei dann verhältnismäßig nebensächlich ist, ob die Träger, an denen sich die Wechselbeziehungen abspielen, feste, flüssige, gas- oder dampfförmige Körper sind. Dadurch tritt das ganze Gebiet in eine neue, eigenartige Gruppierung, die den Vorteil bietet, daß die namentlich auch für die technischen Anwendungen wichtigsten Fragen und Aussagen in den Vordergrund rücken. Für die einzelnen Energien selbst ist aber dadurch unmittelbar ein Einteilungsprinzip gegeben, daß wir auf ihre Bestimmungsstücke achten.

Der einfachste Fall ist der, daß Arbeit geleistet oder verbraucht wird, wenn sich der Angriffspunkt einer Kraft längs eines Weges um eine bestimmte Strecke bewegt („Streckenenergie“). Eine andere Form liegt vor, wenn der Sitz der Arbeit in Flächen oder in dem Volumen der Energieträger zu suchen ist und hier wieder, je nachdem ob die Arbeit wesentlich durch die Änderung des Volumens oder der Form bestimmt ist. Wir wollen daher in einem einleitenden Kapitel die Grundbegriffe für die weiteren, energetischen Betrachtungen kurz auseinandersetzen, hierauf an dem Beispiele der einfachen Hebezeuge das Prinzip von der Äquivalenz von geleisteter und verbrauchter Arbeit erläutern, und dann in besonderen Kapiteln die Arbeiten der Oberflächenspannung, der Volumen- und der Formänderung betrachten.

Die ganze zweite Hälfte dieses Abschnittes wird durch die Lehre von der „aktuellen oder kinetischen Energie“ ausgefüllt. Nach einer kurzen Besprechung des hier zum erstenmal auftretenden Zeitbegriffes und der Zeitmessung, sowie der durch den Zusammentritt von Orts- und Zeitbegriff bestimmten Hilfsgrößen der einfachen Bewegungslehre oder „Kinematik“, sollen die Arbeitsgrößen betrachtet werden, wie sie bei den translatorischen, rotatorischen und den oszillatorischen Bewegungen auftreten. Besonders die letzteren sind für die Physik von besonderer Wichtigkeit: bei ihrer Verbreitung mit endlicher Geschwindigkeit geben sie zu den Erscheinungen der „Wellenbewegung“ Veranlassung, deren Gesetze hier schon mit Rücksicht auf die Anwendungen, die in der Elektrophysik und der Lehre von der strahlenden Energie gemacht werden sollen, auseinandergesetzt werden.

Ein besonderes Kapitel ist schließlich den „mechanischen Ausgleichserscheinungen“ gewidmet, jenen Vorgängen der Energievernutzung oder -entwertung, welche meist unter Vermittlung der Reibung mechanische Energien in andere Formen, vornehmlich in Wärme übergehen lassen, ohne daß es möglich wäre, diese Vorgänge von selbst, d. h. ohne Zufuhr weiterer Arbeitsmengen rückgängig zu machen.

Sie finden ihr Analogon in verwandten Erscheinungen der Wärme- und Elektrizitätslehre und deuten bereits auf das Gesetz von dem bestimmten und eindeutig gerichteten Ablaufe alles natürlichen Geschehens, also auf das hin, was man unter dem „Entropiegesetze“ zusammenfaßt.

Erstes Kapitel.

# Der Arbeitsbegriff und seine Faktoren.

Wir wollen hier unmittelbar den Begriff einführen, der hinfort die Grundlage aller weiteren Betrachtungen bilden soll, den der „Arbeit“ Es wird sich schon hier zeigen, daß es eine Eigentümlichkeit der Energieformen ist, daß sie sich durch zwei Faktoren darstellen lassen, von denen jeder eine besondere physikalische Bedeutung besitzt. Wir werden finden, daß hier, allgemein gesprochen, ein Weg mal einer Kraft das Bestimmende ist. Die Normierung des Kraftmaßes durch Gewichte führt aber unmittelbar zu einigen Materialkonstanten (spezifisches Volumen und spezifisches Gewicht) von allgemeinerer Bedeutung, welche sich schon hier am einfachsten in den Zusammenhang einfügen lassen, wiewohl sie vielfach erst an viel späterer Stelle, dort, wo die hauptsächlichsten Methoden zu ihrer Bestimmung erörtert werden, behandelt zu werden pflegen. Im Zusammenhange hiermit ergibt sich aber am unmittelbarsten die große Bedeutung der durch chemische Untersuchungen festgesetzten, relativen Gewichtszahlen der „Atomgewichte“ auch für die Formulierung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten, so daß schon hier zweckmäßigerweise die Grundlagen unserer modernen atomistischen Anschauungen eingeführt werden.

Dabei ist vielfach ziemlich elementaren Betrachtungen ein größerer Spielraum vergönnt, als es zunächst bei einem den Hochschulunterricht begleitenden Lehrbuche statthaft erscheinen möchte. Indessen pflegen diese Betrachtungen erfahrungsgemäß nicht in der hier erwünschten Vertiefung mitgebracht zu werden, und gerade Lücken in den Fundamenten rächen sich später am fühlbarsten. Außerdem sollen diese Betrachtungen an geläufigen Beispielen spätere Schlußweisen vorbereiten und mit ihnen vertraut machen.

**1. Hubarbeit.** Versuch 1. Auf dem Tische steht ein metallisch glänzender Körper, den Auge, Tast- und Geruchsinn als Messinggewicht erkennen lassen. In das Gebiet der Physik treten wir ein, wenn wir den Körper in seinen Beziehungen zu anderen Körpern, zu seiner Umgebung betrachten, wenn wir einen Vorgang oder einen „Prozeß“ ins Auge fassen, bei dem er beteiligt ist. Wir nehmen den Körper zur Hand, heben ihn auf ein höheres Niveau hinauf und achten dabei auf die Anstrengung oder den Energieaufwand, durch den es der Muskeltätigkeit des Experimentierenden möglich wird, diesen Hub zu vollführen. Fortwährend ist ein nach unten gerichteter Gewichtszug zu überwinden. Wir sagen, wir haben eine „Hubarbeit“ geleistet, und wissen aus der täglichen Erfahrung, daß sich ihre Größe nach der Höhe des Hubes und einer dem gehobenen Körper eigentümlichen Größe richtet, die wir auf die das Schwersein aller Körper an der Erdoberfläche bedingende Anziehungskraft unseres Planeten zurückführen.

Zur genaueren, namentlich messenden Vergleichung des Vorganges müssen wir uns aber von subjektiven Empfindungen freimachen, wenn wir auch hier, wie überall in der Erfahrungswelt, von unserem eigenen inneren Erleben ausgehen.

**2. Beispiel wissenschaftlicher Begriffsanalyse.** Der Fortschritt, der zu wissenschaftlichem Erkennen und zur Fundierung der exakten Wissenschaften geführt hat, besteht in einer genaueren Analyse eines Vorganges, durch die aus der Fülle der einzelnen Erscheinungen das Wesentliche herausgelesen, das Unwesentliche zurückgestellt wird. So bemerken wir hier, daß bei dem geschilderten Arbeitsprozesse zwei Richtungen ausgezeichnet sind: Bewegungen in der Horizontalen und in der Vertikalen. In beiden ist Arbeit zu leisten. Aber während das Anheben eines schweren Körpers in der Vertikalen stets mit Körperanstrengung verbunden ist, kann die Fortbewegung in der Horizontalen kleiner und kleiner gemacht werden. Verschieben wir das Gewichtsstück auf der Tischfläche, so ist die dabei zu leistende Arbeit viel geringer als beim Heben, namentlich wenn wir statt der gleitenden rollende Reibung eintreten lassen, d. h. das Gewichtsstück auf der Tischfläche hinrollen lassen oder noch andere Maßnahmen mit gleichem Ziele treffen.

Versuch 2. Eine auf einem metallenen Untergestelle (mit drei Fußschrauben) ruhende, größere Spiegelglasplatte ist vermittels einer Wasserwage oder Libelle genau horizontal, d. h. „in die Wage“ gestellt worden Auf ihr verschiebt sich das Gewicht noch leichter als auf der Tischplatte. Wird mit Klebwachs an seiner Unterfläche ein Stück einer kleineren Spiegelglasplatte angekittet, so ist der zur Bewegung in der Horizontalen erforderliche Arbeitsaufwand noch mehr herabgedrückt. Wird zwischen beide Glasplatten als „Schmiermittel“ Alkohol gegossen, so folgt der Körper schon den geringsten Bewegungsantrieben. Wir haben also die Mittel in der Hand, den bei der Bewegung in der Horizontalen aufzuwendenden Arbeitsbetrag zu „einer beliebig kleinen Größe“ herabzudrücken und erkennen hieran einen unwesentlichen Bestandteil der Arbeitsleistung, von dem wir bei der Bildung des Arbeitsbegriffes selbst daher abstrahieren können.

Wir wollen solche mittels der Wasserwage horizontal einnivellierte Flächen, wie die eben betrachtete, in denen beim Verschieben eines Körpers im idealen Grenzfalle gar keine Arbeit mehr gegen die Schwere zu leisten ist, eine „Niveau- oder Wagfläche“ nennen. In ihr nimmt also auch der einem Körper vermöge seiner Lage eigene Arbeitsvorrat weder zu noch ab.

Anders bei der Bewegung in der Vertikalen.

Versuch 3. An der Zimmerdecke ist mittels seiner Lagergabel das Vorderrad eines Fahrrades ohne Gummireifen befestigt. Eine Schnur mit zwei Haken an ihren Enden ist darübergelegt. An dem einen hängt ein Gewicht, das zunächst auf einem oben mit einem horizontalen Brette versehenen Ständer ruht. Wird das bei Versuch 1 benutzte Gewicht an dem anderen Haken eingehängt, so kann es bei vorheriger geeigneter Wahl des oberen Gewichtes mit der geringsten Kraftleistung um ebensoviel gehoben werden, als sich das andere Gewicht senkt, wenn dieses durch Wegziehen des Ständers seiner Unterlage beraubt wird.

Hier ist der Vorgang ein durchaus anderer als vorhin: Bei Versuch 2 „änderte sich in der Natur nichts“, wenn das Gewicht um beliebige Wege verschoben wurde: hier ist das Heben unseres Gewichtes an den Vorgang des Sinkens eines anderen Gewichtes geknüpft, d. h. die Hubarbeit wird auf Kosten anderer Arbeit geleistet, die durch vorherige Prozesse schon irgendwie zur Verfügung gestellt worden ist.

**3. Maschinenbegriff.** Wir nennen jede künstliche Vorrichtung, durch welche eine Arbeit oder Energie in eine andere verwandelt wird, eine Maschine.

Die bei Versuch 3 benützte Radanordnung ist also eine „einfache Maschine“. Andere solche Maschinen, durch die unmittelbar Hubarbeiten ineinander verwandelt werden, bilden gleicharmige Hebelanordnungen, wie sie z. B. bei der „Tafelwage“ auch im täglichen Gebrauch verwendet werden.

Versuch 4. Modell der Robervalschen Tafelwage. Um zwei vertikal übereinander an einer Holzsäule befestigte Zapfen ist eine Parallelführung aus Stangen drehbar, welche an gleich langen Armen an den Enden Tafeln tragen, die sich, ohne zu kippen, parallel mit sich selbst auf- und abbewegen. Durch die Gleicharmigkeit wird Gewähr geleistet, daß sich die eine Tafel um ebensoviel senkt, als sich die andere hebt.

Zwei gleichhohe Etageren, ebenfalls mit horizontalen, aber feststehenden Tafeln in der Höhe der beweglichen (in ihrer mittleren Stellung) stehen daneben.

Eine ähnliche Anordnung, bei der aber die Stangenarme verschieden lang sind, zeigt Fig. 12. Die Vorrichtung bleibt in jeder Lage in Ruhe, die Eigengewichte ihrer einzelnen Bestandteile heben sich also in bezug auf Hubleistungen gerade auf.

Werden von beiden Etageren her die in Versuch 3 benutzten Körper in die Maschine eingeführt, so wird beim Sinken des einen der andere gerade um die gleiche Höhe gehoben, ohne daß ein größeres Zusatzgewicht dazu nötig wäre, als es eben zur Überwindung der Zapfenreibung in der Maschine selbst erfordert wird.

Von diesem Zusatzgewichte können wir aber nach einer ähnlichen Abstraktion, wie sie schon bei Versuch 2 durchgeführt wurde, annehmen, daß es beliebig klein gemacht werden kann.

**4. Der eine Faktor der Hubarbeit.** Durch die vorhergehenden Betrachtungen haben wir schon das beim Heben einer Last Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen gelernt. Wir können sagen, daß es bei dieser Form der Arbeit auf den vertikalen Hub ankommt. Daraus folgt ohne weiteres der folgende wichtige Satz: Für die Hubleistung an sich ist es gleichgültig, auf welchem Wege ein schwerer Körper von irgendeinem niederen Niveau in ein höheres Niveau gehoben wird.

Der Beweis ergibt sich daraus, daß wir jeden beliebigen Weg zwischen den beiden Niveaus treppenartig in lauter Einzelstufen zerlegen können. Die zu der Bewegung auf den horizontalen Teilen dieser Stufen aufzuwendenden Arbeitsgrößen sind als Null zu betrachten. Es bleiben nur die zu den einzelnen vertikalen Hüben nötigen Beträge übrig, die sich zur Gesamtarbeit additiv zusammensetzen.

Als einen bestimmenden Faktor erkennen wir in unserem Arbeitsbegriffe also die „Niveaudistanz“ oder die „Förderhöhe“, die wir in Längeneinheiten ausdrücken.

**5. Längeneinheit.** Nachdem man bis gegen Ende des vorvorigen Jahrhunderts durchweg nur mit willkürlich festgesetzten Längenmaßen gerechnet hatte, machte sich das Bedürfnis geltend, ein einheitliches, genau fixiertes und jederzeit reproduzierbares, ein sog. „absolutes“ Längenmaß einzuführen. Das Ideal, welches vorschwebte, war, einen bestimmten ganzzahligen und rundzahligen Teil einer Länge als Maßeinheit zugrunde zu legen, welche selbst in Jahrtausenden als unveränderlich gelten konnte. Man griff auf eine planetare Eigenschaft zurück und setzte fest: Längeneinheit ist der zehnmillionste Teil der Länge desjenigen Erdmeridianquadranten, der durch Paris geht und vom Äquator bis zum Nordpole unserer Erde reicht.

Zur Ableitung dieses Maßes waren in Frankreich die notwendigen mühevollen Vorarbeiten geleistet worden, da durch die Gradmessungen in Lappland und Peru die genannte Länge genau bekannt war. Das „Urmaß“ wurde durch Parlamentsbeschluß vom Jahre 1799 als „mètre vrai et définitif“ festgesetzt. Leider zeigte sich, daß, abgesehen von der Willkürlichkeit der Festsetzung, jedenfalls kein „absolutes Maß“ geschaffen war. Der Astronom Bessel wies 1837 darauf hin, daß man den Betrag der Erdabplattung (Unterschied zwischen Äquatorial- und Polarhalbmesser dividiert durch den ersteren, bei der Erde = 1/299) unterschätzt hatte. Infolge hiervon und anderer kleiner Unvollkommenheiten war die Kopie, welche man von der Einheitslänge hergestellt hatte, zu klein ausgefallen; nicht 10 000 000 m kommen auf den ins Auge gefaßten Quadranten, sondern 10 000 856 m. Eine Umänderung der Einheit und damit aller von ihr abgenommenen Kopien erschien unzweckmäßig. Man verzichtete daher auf die Ganz- und Rundzahligkeit und nahm die Grundlage so, wie sie festgelegt war, als Einheit an. Dies genügt in der Tat, wenn wir nur wissen, der wievielte Teil die zugrunde gelegte Einheit von der Basislänge ist. Sie erfüllt alsdann jedenfalls die Hauptbedingung eines Grundmaßes: die der Reproduzierbarkeit und Kontrollierbarkeit.

Aufgabe 1. Man berechne den Halbmesser der Erde (diese als Kugel gedacht).

Der internationalen Festsetzung der Meterlänge entsprechend, beträgt der halbe Umfang der Erde $2 \cdot 10\,000\,000$ m. Hieraus berechnet sich der Halbmesser zu $20\,000\,000 : \pi = 6\,360\,000$ m. Wird der Abplattung Rechnung getragen, so ergibt sich der „mittlere“ Erdhalbmesser zu 6 366 700 m.[1])

**6. Der Meterprototyp.** Durch internationalen Beschluß wurde 1889 von der größten Anzahl der Kulturstaaten die in § 5 genannte Länge als Grundmaß angenommen, welche durch zwei Striche auf einem Platiniridiumstabe abgegrenzt ist, der im Bureau international des poids et mesures in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird.

---

1) Diese, wie alle folgenden Beispiele, sind mit einem kleinen, 25 cm langen Rechenschieber gerechnet. Auf demselben sind bekanntlich Skalen aufgetragen, bei denen die Logarithmen der angeschriebenen Zahlen durch Strecken entsprechender Längen dargestellt sind. Multiplizieren und Potenzieren, bei denen die Logarithmen der miteinander zu multiplizierenden Zahlen zu addieren sind, wird durch Verschieben in einem Sinne, Dividieren und Radizieren durch Verschiebung im entgegengesetzten Sinne in schnellster, bequemster und sicherster Weise bewerkstelligt mit einer für die meisten Zwecke völlig ausreichenden Genauigkeit. Dabei ist es besonders zeitsparend, daß man bei längeren Rechnungen die Zwischenwerte gar nicht abzulesen braucht. Der angehende Ingenieur sollte sich beizeiten an den Gebrauch dieses für ihn bei allen numerischen Rechnungen unentbehrlichen Hilfsmittels gleich beim Beginne seines Studiums gewöhnen. Genügende Anleitung ist in der jedem Rechenschieber beigegebenen Gebrauchsanweisung enthalten. Wenige Stunden Übung lehren das überaus nützliche Instrument vollständig beherrschen.

Dieses Grundmaß, der „Prototyp“ unseres gesamten Maßsystems hat einen Querschnitt, wie ihn Fig. 1a darstellt. Bei demselben hat der Maßstab bei verhältnismäßig kleiner Masse große Stabilität und eine erhebliche Oberfläche, durch die sich Temperaturunterschiede zwischen dem Metalle und der Umgebung schnell ausgleichen können.

Fig. 1a.

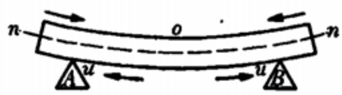


Fig. 1b.

Dies ist nötig, weil man, um Temperaturverschiedenheiten zu umgehen, den Stab nicht seiner Länge nach auflagern, sondern nur durch zwei Stützen tragen läßt (Fig. 1b). Biegt sich ein Stab, der bei $A$ und $B$ unterstützt ist, infolge seines Eigengewichtes durch (in 1b weit übertrieben dargestellt), so erfährt seine obere Fläche $o$ eine Zusammendrückung; ein hier angebrachter Maßstab würde zu kurz erscheinen. Seine untere Fläche $uu$ erfährt dagegen eine Streckung; eine hier abgegrenzte Länge würde größer erscheinen als beim Fehlen jeglicher Durchbiegung. Zwischen Ober- und Unterfläche gibt es eine Linie $nn$, in der weder Pressung noch Dehnung vorhanden ist: „die neutrale Axe oder Nullinie“; bis zu dieser ist die obere Rinne des Querschnittes (1a) eingetieft und hier ist die Meterlänge durch zwei Strichmarken mit je zwei Nebenstrichen abgegrenzt: „Strichmaßstab“.

Unsere Längeneinheit ist also definiert als die möglichst genaue Kopie dieses Strichabstandes bei der Temperatur des schmelzenden Eises (vgl. Ende des nächsten Paragraphen).

**7. Das metrische System.** Ein weiterer, sehr wesentlicher Vorteil des auf dem Meter als Längeneinheit basierenden Maßsystems beruht darauf, daß man aus der Grundeinheit entsprechend der dezimalen Anordnung unseres Zahlensystems Vielfache und Unterabteilungen der Einheit durch Zehnerpotenzen bildet.

So entsteht das folgende Schema:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 000 000 m | = 1 Megameter | $= 10^6$ m | = 1000 km |
| 1 000 m | = 1 Kilometer | $= 10^3$ m | = 1 km |
| 100 m | = 1 Hektometer | $= 10^2$ m | = 1 hm |
| 10 m | = 1 Dekameter | $= 10^1$ m | = 1 dkm |
| 1 m | = 1 Meter | $= 10^0$ m | = 1 m |
| 0,1 m | = 1 Dezimeter | $= 10^{-1}$ m | = 1 dcm |
| 0,01 m | = 1 Zentimeter | $= 10^{-2}$ m | = 1 cm |
| 0,001 m | = 1 Millimeter | $= 10^{-3}$ m | = 1 mm |

In der Physik werden oft noch viel kleinere Größen, z. B. der 1000. Teil des Millimeters, das Mikron, geschrieben: $\mu$ und ebenso der 1 000 000. Teil des Millimeters: $\mu\mu$ verwendet.

Dieses Schema, bei dem die Vielfachen der Grundeinheit durch griechische, die Unterabteilungen durch lateinische Vorsatzsilben bezeichnet werden, behält man bei allen übrigen Maßgrößen bei. So ist das in der Praxis eingeführte Maß der elektrischen Stromstärke ein Ampere; man setzt daher 10 Ampere = 1 Deka-Ampere, $^1/_{1000}$ Ampere = 1 Milli-Ampere; die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt, 1000 Watt nennt man ein Kilowatt usw. Man beachte ferner die in der Tabelle beigefügte Schreibweise der Vielfachen und Unterteile der Grundeinheit als positive und negative Zehnerpotenzen. Diese Schreibweise ist nicht nur kürzer und übersichtlicher als diejenige mit den Nullen, sondern bewährt sich besonders bei Umrechnungen, bei denen man dann nur die Exponenten zu addieren und subtrahieren hat. Hierbei werden die in 1 zu dividierenden Potenzen nach bekannten Regeln der Algebra als negative Potenzen geschrieben.

Folgt hinter dem Komma eine größere Anzahl von Nullen, so braucht man nur eine zu schreiben und die Zahl der Stellen, die sie vertritt, durch einen angehängten Index zu bezeichnen. So schreibt man etwa 0,000004 (statt mit negativen Potenzen $4 \times 10^{-6}$) auch $0{,}0_5 4$.

Aufgabe 2. Man drücke die (runde) Größe des Erdmeridianquadranten in Zehnerpotenzen durch Meter und Zentimeter aus.

Ein Quadrant $= 10^7$ m $= 10^2 \times 10^7$ cm $= 10^9$ cm, da ein Meter 100 cm $= 10^2$ cm umfaßt. Diese Länge von $10^9$ cm spielt namentlich bei gewissen elektrischen Maßen eine Rolle; 1 cm $= 10^{-9}$ Quadrant.

Aufgabe 3. Man rechne die m- und die cm-Länge in $\mu$ und $\mu\mu$ um. 1 m $= 10^3$ mm $= 10^3 \cdot 10^3 = 10^6\ \mu = 10^9\ \mu\mu$, so daß $1\ \mu = 10^{-6}$ m und $1\ \mu\mu = 10^{-9}$ m ist. Lichtwellenlängen mißt man vielfach in $10^{-10}$ m („Tenthmeter“ der Engländer = 1 Angströmsche Einheit). Entsprechend ist 1 cm $= 10^4\ \mu = 10^7\ \mu\mu$; $1\ \mu = 10^{-4}$ cm, $1\ \mu\mu = 10^{-7}$ cm.

Die dem Deutschen Reiche zugeteilte Kopie ist bei 0° nur um $^1/_{1000}$ mm kürzer als das Pariser Normalmeter; die deutsche Kopie ist also bei 0°: 1 m — $1{,}0\ \mu \pm 0{,}1\ \mu$.

Durch den Zusatz $\pm$ einer Ziffer zu einer gemessenen Größe wird der Genauigkeitsgrad bezeichnet; im vorliegenden Falle soll z. B. ausgedrückt werden, daß die Abweichung zwischen 0,9 und 1,1 $\mu$ liegen kann.

Maßstäbe, End- und Strichmaßstäbe, Meßketten und Meßbänder.

**8. Transversalenteilung und Läufermaßstab (sog. Nonius oder Vernier).** Oft will man bei Längenmessungen genauer als bis auf 1 mm, bei Winkelmessungen genauer als auf $^1/_2$ Grad ablesen und doch würde eine weitere Unterteilung der betreffenden Skalen auf vielfache Schwierigkeiten stoßen. Alsdann kann man in zweierlei Weise verfahren, um die Ablesegenauigkeit zu erhöhen (ohne auf einfache Schätzung der Bruchteile angewiesen zu sein):

$\alpha$) Transversalenteilung; auf geraden Maßstäben von Levi ben Gerson um 1300 eingeführt.

Eine größere Anzahl $(n+1)$ paralleler Geraden wird in dem zu unterteilenden, kleinsten Intervalle der Längenskala von einer Geraden schräg durchschnitten, welche in dem Intervalle an den Durchschnittspunkten von den Parallelen Stücke von $1/n$, $2/n$ usw. Längeneinheit abschneidet. Solche „verjüngte Maßstäbe“ findet man gewöhnlich unterhalb der Winkeltransporteure angebracht; jenes Wort gebraucht zuerst (um 1560) J. Hommel in Leipzig.

Das Prinzip der Transversalenteilung wurde auf Kreisteilungen wahrscheinlich durch die Astronomen Purbach und Regiomontan (1. Hälfte des 15. Jahrhunderts) übertragen.

Würde man in dem Intervalle von $^1/_6$ Grad oder 10′ zwischen 11 konzentrischen Kreisen eine Transversale ziehen, so würde diese auf jedem der Kreise Punkte markieren, die um je eine Bogenminute voneinander entfernt sind.

Im modernen Instrumentenbau wird, z. B. bei feineren geodätischen Instrumenten, eine derartige Transversalenteilung bei Kreisteilungen (z. B. von den Karl Zeiss-Werken in Jena) neuerdings wieder in Anwendung gebracht.

Das Unterteilungsprinzip des portugiesischen Mathematikers Pedro Nunes (latinisiert „Nonius", 1502—1577) lief auf etwas ganz anderes hinaus; er schlug vor, auf dem Quadranten 46 konzentrische Bögen zu ziehen, von denen der äußerste in 90, der folgende in 89, der nächste in 88, der innerste in 45 gleiche Teile geteilt werden sollte. Um beim Einspielen des Zeigers (der „Alhidade") auf irgendeinen Teilpunkt eines dieser Kreise, „Koinzidenz", den entsprechenden Winkel zu finden, bedurfte es einer durch eine Hilfstafel erleichterten Umrechnung; praktische Anwendung hat dieser wahre „Nonius" wegen der damals unüberwindlichen technischen Schwierigkeit, solche Teilungen mit der erforderlichen Genauigkeit auszuführen, niemals gefunden.

Der Astronom Christophorus Clavius (Klau), 1537 zu Bamberg geboren, Schüler des Nunes, hat zuerst, wohl angeregt durch Curtius (1590), einen bestimmten Bruchteil des Hauptintervalles durch einen geteilten Hilfsbogen dargestellt und wurde so der Erfinder der heutigen Noniusteilung. Die jetzige Anwendung dieser Teilung geht auf Vernier (1580—1637) und Hedraeus (1643) zurück, die den Hilfsmaßstab mit dem beweglichen Teile des Winkelmeßinstrumentes, der Alhidade, in Verbindung brachten und diesen längs des Hauptmaßstabes entlang „laufen" („cursor") ließen. Da an der Erfindung verschiedene Gelehrte beteiligt sind, wählen wir die Bezeichnung „Läufer" (nach Kästner 1791).[1])

$\beta$) Läuferprinzip (Nonius oder Vernier): Neben dem Hauptmaßstabe läuft ein geeignet unterteilter Nebenmaßstab, der „Läufer", entlang. (Erläuterung an Modellen in großem Maßstabe.)

---

1) Bezüglich der vielumstrittenen Frage, nach wem man die wichtige Neuerung benennen soll, kommt W. Lührs nach eingehender Würdigung aller in Betracht kommenden Momente zu dem Schlusse: „Des Nunes Erfindung barg den Grundzug in sich, durch Koinzidenzen von Strichen direkt nicht mehr darstellbare Maßteile als Differenzen festzustellen. Das ursprüngliche Verfahren hatte jedoch mehr theoretischen als praktischen Wert, es erwies sich aber entwicklungsfähig und erfuhr durch Curtius und Clavius Vervollkommnungen. Mit der geschickten Anwendung der vor ihm erfundenen Teilung brachte zuerst Vernier und kurz darauf, vermutlich von ihm unabhängig, Hedraeus die Entwicklung zum Abschluß. Es erscheint als fruchtloses Unterfangen, darüber zu rechten, wem das höhere Verdienst zuzusprechen sei, dem Urheber des Grundgedankens, dem Verbesserer der Teilung oder dem erfolgreichen Anwender der verbesserten Teilung. Keiner der Anteilnehmer hat ausschließlichen Anspruch, dem Hilfsmittel seinen Namen zu geben."

Wird, Fig. 2a, die Länge von $(n-1)$ (z. B. 9, von 60 bis 69 reichenden) Teilen des Hauptmaßstabes auf den Läufer in $n$ (also 10) gleiche Teile geteilt, so ist hier offenbar jeder Teilstrich um $1-\frac{n-1}{n}=1/n$ ($^1/_{10}$) kleiner, als der Teilwert am Hauptstabe. Verschiebt sich also der Läufer in der Richtung der Hauptteilung um $^1/_{10}$, so koinzidiert sein erster, verschiebt er sich um $^2/_{10}$, sein zweiter usw. Teilstrich; er ist also im **gleichen** Sinne wie der Hauptmaßstab zu beziffern („vorlaufender" oder „vortragender" Läufer) und gibt durch die Koinzidenzen irgendeines seiner Striche, z. B. seines sechsten, wie in Fig. 2a unten, die Entfernung seines Nullstriches vom nächst vorhergehenden der Hauptteilung in Zehnteln dieser Teilung an, während sein Nullstrich selbst die Ganzen der Hauptteilung zählt (der Läufer zeigt hier also: 47,6 an). Diese Art des Läufers findet sich z. B. an dem **Kalibermaße** oder der **Schublehre**: Auf einem in cm und mm, am Ende mit Querbacken versehenen Maßstabe wird parallel zu diesem ein zweiter Querbacken geführt. An der Führung ist ein unten mit Läufermaßstab versehenes Fenster ausgespart, durch das der Backenabstand bis auf $^1/_{10}$ mm genau abgelesen werden kann.

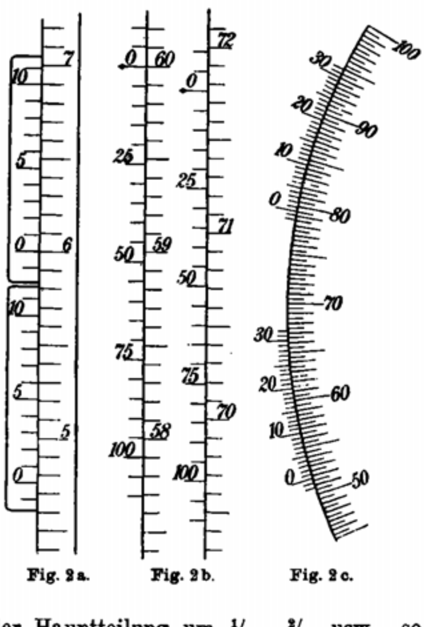

Fig. 2a. Fig. 2b. Fig. 2c.

Soll die Unterteilung weitergeführt werden, so teilt man, damit die Intervalle nicht zu eng werden, $(n+1)$ Teile (etwa (Fig. 2b) 21, von 600 bis herab zu 579 reichende Millimeter) des Hauptstabes auf dem Läufer in $n$ (also 20) Teile ein, so daß jetzt ein Teil des Läufers um $1/n$ ($^1/_{20}$ oder 0,05) größer als ein Teil der Skala ist. Jetzt bleibt der erste Läuferstrich um $1/n$ ($^1/_{20}$), der zweite um $2/n$ ($^2/_{20}$) usw. zurück. Überholt der wiederum die ganzen mm zählende, gewöhnlich irgendwie besonders ausgezeichnete Nullstrich des Läufers den ihm nächsten Teilstrich der Hauptteilung um $^1/_{20}$, $^2/_{20}$ usw., so koinzidiert der 1., der 2. usw. seiner Striche. Diese sind also rückläufig zu beziffern („rücklaufender" oder „nachtragender" Läufer). Da die einzelnen Läuferteile Fünfhundertstel geben, so wird der fünfte sogleich mit 25, der zehnte mit 50 usw. beziffert, so daß die Hundertstel direkt abgelesen werden. In Fig. 2b rechts findet man also: 717,65 mm.

Diese Art Läufer findet sich z. B. an feineren Barometern.

Sollen mittels eines in halbe Grade (30′) geteilten Teilkreises (Fig. 2c) die einzelnen Minuten direkt ablesbar sein, so teilt man das Intervall von 29 kleinsten Teilen auf dem Kreise (also z. B. den $14^1/_2{}^0$ entsprechenden Bogen von $79^1/_2$ bis $94^0$ auf dem Läufer in 30 gleiche Teile, von denen jeder daher um $^1/_{30}$ des kleinsten Intervalles, also um 1′ kleiner ist als ein Teil der Hauptskala.

Man sieht, daß, um Koinzidenz am 1., 2., 3. usw. Läuferstriche herbeizuführen, der Läufer um 1, 2, 3 usw. Bogenminuten vorlaufen muß, so daß z. B. hier unten $51^\circ 30'$ und noch $12'$ abzulesen ist, weil der 12. Läuferstrich koinzidiert und der die ganzen und halben Grade zählende Nullstrich schon $51\frac{1}{2}^\circ$ überschritten hatte, so daß die Stellung $51^\circ 42'$ ist.

Um die Koinzidenzen gut beobachten zu können, zieht man bei der Ablesung auch die Stellung der Nebenstriche in Betracht; damit dies bei dem ersten und letzten Teilstriche des Läufers ebenfalls ermöglicht wird, sind über diese hinaus gewöhnlich noch je 1 oder 2 Striche im gleichen Teilabstande gezogen.

**9. Flächen- und Raummaße.** Aus der Grundeinheit der Länge leitet man die Maßeinheiten der Fläche und des Raumes ab. Ein Quadratmeter ist die Fläche eines Quadrates von 1 m Seitenlänge, d. h. 1 m², ein Kubikmeter ein Würfel von dieser Kantenlänge, d. h. 1 m³. 1 dcm³ nennt man auch 1 Liter = 1 l.

Aufgabe 4. Man rechne 1 m² und 1 m³ in dcm², cm² und mm² bzw. dcm³, cm³ und mm³ um.

$$1\ \mathrm{m}^2 = (10)^2 = 10^2\ \mathrm{dcm}^2 = (10^2)^2 = 10^4\ \mathrm{cm}^2 = 10^6\ \mathrm{mm}^2,$$

daher

$$1\ \mathrm{mm}^2 = 10^{-6}\ \mathrm{m}^2,\ \ 1\ \mathrm{cm}^2 = 10^{-4}\ \mathrm{m}^2,\ \ 1\ \mathrm{dcm}^2 = 10^{-2}\ \mathrm{m}^2.$$

$$1\ \mathrm{m}^3 = (10)^3 = 10^3\ \mathrm{dcm}^3 = (10^2)^3 = 10^6\ \mathrm{cm}^3\ (10^3)^3 = 10^9\ \mathrm{mm}^3,$$

daher

$$1\ \mathrm{mm}^3 = 10^{-9}\ \mathrm{m}^3,\ \ 1\ \mathrm{cm}^3 = 10^{-6}\ \mathrm{m}^3,\ \ 1\ \mathrm{dm}^3 = 10^{-3}\ \mathrm{m}^3.$$

Ferner ist

$$1\ \mathrm{dcm}^2 = 10^2\ \mathrm{cm}^2,\ \ 1\ \mathrm{dcm}^3 = 1\ \mathrm{l} = 10^3\ \mathrm{cm}^3\ \text{usw.}$$

**10. Dimensionen.** Jene Produktbezeichnung der Maßeinheiten, welche die Beziehung zur Grundeinheit darstellt, also bei Flächen die zweite, bei Räumen die dritte Potenz, nennt man die Dimensionen der betreffenden Größe und sagt z. B. Flächen haben die Dimensionen m² oder cm², Räume die Dimension m³ oder cm³. Diese Bezeichnungsweise überträgt man dann auch auf andere Ableitungen aus den Grundeinheiten.

Die Berücksichtigung der Dimension erleichtert bei komplizierteren Rechnungen die Kontrolle des schließlichen Resultates.

Eine reine Zahl (z. B. eine Verhältniszahl zweier benannter Zahlen, etwa zweier Längen, die dann unbenannt ist), hat keine Dimension; man sagt, sie sei „dimensionslos" oder habe die Dimension Null.

**11. Gewichtsvergleichung.** Wir wenden uns jetzt zur Klarlegung des anderen Faktors, der außer der Hubhöhe bei unseren Hubarbeiten sich geltend machte. Dies ist offenbar eine Größe, welche sich als eine dem gehobenen Körper eigentümliche Eigenschaft kundgibt, die wir im täglichen Leben sein „Gewicht" nennen. Wie sollen wir diesen Faktor messen? Die Hubleistungen an einfachen Maschinen geben uns zunächst, wie schon bei Versuch 3 und 4 erkannt wurde, ein Mittel an die Hand, zwei Körper in bezug auf die hier in Betracht kommende Eigenschaft zu vergleichen. Denn wir werden augenscheinlich zwei Körper bezüglich ihrer Gewichte als gleich zu beurteilen haben, wenn sie, an einer einfachen Maschine (3) beiderseitig angreifend, sich gegenseitig in ihren Hubwirkungen ersetzen können, d. h. wenn beim Sinken des einen (durch ein je nach der Beweglichkeit der Maschine immer kleiner und kleiner zu machendes Übergewicht) das andere um ebensoviel gehoben wird.

Es ist dies dasselbe Verfahren, das wir auch im täglichen Leben anwenden, um uns über die Gleichheit oder Ungleichheit zweier Gewichtsgrößen ein Urteil zu verschaffen: Wir heben den Körper an und führen mit ihm auf- und abpendelnde Bewegungen aus, d. h. wir führen mit dem einen und dann mit dem anderen Körper Hubleistungen aus, weil wir für die hierfür aufzuwendende Energie ein viel klareres Bewußtsein haben, als wenn der Körper ruht und einfach auf die Gewebe unserer Hand drückt. Dies ist physiologisch auch vollkommen verständlich: bei der Leistung von mechanischer Arbeit wird chemische Energie verbraucht. Für die Quantität dieses Verbrauches geben die Ermüdungserscheinungen einen Anhalt. Jedenfalls geht hieraus hervor, daß der Arbeitsbegriff uns ebenso zum Bewußtsein kommt, als der Begriff der einfachen Druckwirkung.

**12. Gewichtseinheit.** Wir haben im vorhergehenden das Mittel angedeutet, um Körper in bezug auf ihr Gewicht zu vergleichen. Wir können Gewichte messen, sowie wir eine Einheit für dieselben festsetzen. Denn eine Größe „messen“ heißt sie mit der „Einheitsgröße“ vergleichen.

Es war ein außerordentlich glücklicher Gedanke, hierfür eine Materie heranzuziehen, die auf unserem Planeten und speziell für unser Dasein die denkbar wichtigste Rolle spielt: das Wasser, und die Gewichtseinheit in unmittelbarste Beziehung zu der metrischen Grundeinheit der Raummaße (9) zu setzen. Füllen wir einen Kubikdezimeter oder einen Liter mit chemisch reinem Wasser, so stellt das in ihm enthaltene Wassergewicht die Gewichtseinheit dar.

Freilich ist dabei auf die Temperatur des Wassers zu achten, bei $+4^0$ der hundertteiligen Skala ist die in einem bestimmten Raume enthaltene Wassermenge ein Maximum und ändert sich in der Nähe dieses Temperaturwertes nur wenig. Wir müssen daher zur Definition unserer Gewichtseinheit noch diese Temperaturfestsetzung hinzuziehen. Außerdem ist die erdanziehende Kraft an verschiedenen Punkten der Oberfläche verschieden (Abplattung und Erdrotation). Darum setzt man das Meeresniveau und $45^0$ geographischer Breite für den Normalort fest und definiert:

Gewichtseinheit, ein „Kilogramm“: 1 kg — Gewicht ist das Gewicht eines $dcm^3$ Wasser von maximaler Dichte unter $45^0$ Breite im Meeresniveau.

**13. Kopien der Gewichtseinheit. Gewichte und Gewichtssätze.** Mit dem eben definierten Wassereinheitskörper zu operieren, würde außerordentlich unbequem sein. Wir kennen aber bereits die Methoden, nach denen wir uns Körper abgleichen können, die in bezug auf Gewicht die Gewichtseinheit vertreten können.

Für die folgenden Gewichtsvergleichungen bedienen wir uns einer wirklichen (Robervalschen) Tafelwage. Bei dieser ziehen zwar die Gewichte der Anordnung diese selbst in eine bestimmte Ruhelage wieder zurück (vgl. weiter unten bei „Wage"); diese Wirkung wird aber in der Ruhelage so klein, daß wir bei dieser Vergleichung davon absehen können[1]).

Versuch 5. Auf einer Tafelwage wird zunächst die metallene Hülle eines Kubikdezimeters durch ein Hilfsgewicht ausbalanciert. Alsdann wird das Hohlmaß mit Wasser gefüllt und Stücke aus Messing, Eisen, Blei so abgeglichen, daß sie den Wasserwürfel bei Hubleistungen im obengenannten Sinne (11) vertreten können. Sie stellen dann ebenfalls Kilogrammgewichte dar.

---

1) Um die Einzelheiten der Gewichtsvergleichung („Wägung") in einem großen Auditorium weithin sichtbar zu machen, empfiehlt sich folgende Einrichtung: An jeder der beiden Zungen der Wage ist ein vertikales, nach unten gerichtetes Platindrähtchen angelötet, welches in je ein mit Quecksilber zur Hälfte gefülltes Eisennäpfchen hineintaucht. Die Näpfchen sind unter Zwischenschaltung einer hinter oder vor der Wage aufgestellten Glühlampe an die Lichtleitung angeschlossen. Befindet sich die Wage in der Ruhestellung, so tauchen beide Drähte in das Quecksilber ein, der Stromkreis ist durch die Metallteile der Wage selbst hindurch geschlossen. Sowie aber die Wage die Gleichgewichtslage verläßt, taucht zwar ein Draht noch tiefer in sein Näpfchen ein, der andere hebt sich aber aus dem Quecksilber heraus, der Stromkreis ist unterbrochen, die Lampe erlischt. Dadurch, daß etwas Wasser auf das Quecksilber gegossen wird, kann die Funkenbildung und damit das vorzeitige Verbrennen des Quecksilbers hintangehalten werden.

Feinere Gewichtsvergleichungen werden an einer zweiarmigen Vorlesungswage vorgenommen, die ebenfalls zweckmäßig mit einer Signallampe versehen ist. Zu dem Zwecke wird an der Tragsäule unter dem Zeigerende ein höher oder tiefer zu stellendes Hartgummiklötzchen angebracht, in welches zwei Löcher eingetieft sind, welche mit Quecksilber so weit gefüllt werden, daß die Kuppen desselben noch millimeterhoch über die Oberfläche emporragen. Auf dem Zeigerende ist eine Hülse mit Querarm aufgesteckt, an dem unten zwei Schäufelchen aus dünnem Platinbleche angesetzt sind, deren Ebenen mit der Bewegungsebene des Zeigers zusammenfallen, und die mit ihren Spitzen gerade durch die Quecksilberkuppen hindurchschneiden. Der Bewegung der Platinbleche durch das Quecksilber wird nur ein sehr geringer Widerstand entgegengesetzt, welcher das freie Spielen der Wage kaum beeinträchtigt. Beim Eintauchen wird aber ein Stromkreis, der an den Quecksilbernäpfchen endet und eine kleine, vor der Wage aufgestellte Glühlampe enthält, geschlossen, so daß, wenn die Wage die Gleichgewichtslage passiert oder sich in diese einstellt, die Signallampe aufleuchtet.

Um die Nachbildung der Gewichtseinheit genau zu gestalten, müßten freilich die in 12 genannten Bedingungen noch erfüllt sein.

Außerdem geht noch die Voraussetzung ein, daß die Schwere unter keinen Umständen durch chemische Veränderungen beeinflußt wird. Das ist erfahrungsgemäß in der Tat in hohem Grade — bis auf ein Zehnmilliontel genau — der Fall, kann aber möglicherweise nur darauf beruhen, daß die allgemeine Massenanziehung eine sehr schwache Kraft ist im Vergleich z. B. zu den elektrischen und magnetischen Kräften, bei denen die chemische Natur der Substanz Unterschiede bedingt. Daß uns ein Körper schwer erscheint, liegt ja nur daran, daß an ihm die Anziehung der gesamten Planetenmasse wirkt. Wollen wir aber die Kilogrammkopien zu Meßzwecken verwenden, so müssen sie das für alle quantitativen Beziehungen geltende Grundgesetz erfüllen: Wenn zwei Größen einer dritten gleich sind, müssen sie stets auch untereinander gleich sein.

Versuch 6. Auf einer empfindlichen Vorlesungswage (vgl. die vorige Anmerkung) werden die vorher gewogenen Kilogrammstücke, z. B. das Blei- und Messinggewicht, verglichen. Der Einfluß einer etwaigen Ungleichheit der Wagebalken wird dadurch eliminiert, daß man die Gewichte miteinander vertauscht, d. h. eine „Doppelwägung" vornimmt. Erweist sich hierbei die Wage als gleicharmig und das Messinggewicht dem Bleigewichte völlig gleich, ebenso das Eisengewicht diesem Bleigewichte, so hält auch das Eisengewicht je einem der beiden erstgenannten das Gleichgewicht. Wird aber, etwa von unten her, eine magnetische Wirkung eingeführt, so ist das Gleichgewicht sofort gestört, da die magnetische Kraft die Eisenmasse in ganz anderer Weise beeinflußt als Blei und Messing[1]).

Das Kopieren des Wassereinheitsgewichtskörpers ist eine der schwierigsten und diffizilsten Operationen der messenden Physik. Man hat daher einen gleichfalls im Bureau International (6) aufbewahrten Platiniridiumkörper so genau wie irgend möglich den eben für das Grundeinheitsgewicht festgesetzten Bedingungen angepaßt und betrachtet als legale Gewichtseinheit die möglichst genaue Kopie jenes Normalkilogrammes.

Von ihm stellt man Vielfache oder Unterabteilungen g, mg dar, die man in bekannter Weise zu Gewichtssätzen vereinigt.

---

1) In der Vorlesung wird zweckmäßig ein unter einer Wagschale unterhalb der Tischfläche angebrachter kleiner Elektromagnet durch einen Fußkontakt geschlossen, sowie sich das Eisengewicht auf ihr befindet. Bringt man den Elektromagneten mit dem Eisengewichte in direkte Berührung, so kann man dasselbe durch die magnetische Kraft in die Höhe heben, d. h. die Schwerkraft mit ihr überwinden.

Die in der Vorlesung benutzten kg-Gewichte sind oben mit Haken versehen, dafür aber unten entsprechend ausgedreht, so daß das Normalgewicht nach Einschrauben der Haken wieder genau hergestellt ist.

Den in Deutschland geltenden Eichvorschriften entsprechend müssen die im allgemeinen öffentlichen Verkehr befindlichen Gewichte („Handelsgewichte"), die in Apotheken verwendeten („Präzisionsgewichte"), sowie die in den Eichämtern verwendeten Normalen für Handelsgewichte („Gebrauchsnormalen bzw. Kontrollnormalen") gegenüber dem Normalkilogramm folgende Fehlergrenzen einhalten:

| | Handelsgew. | Präzis.-Gew. | Gebrauchsnormale für Handelsgewichte | Kontrollnormale für Handelsgewichte |
|---|---|---|---|---|
| 20 kg | 4 g | 2 g | 1,6 g | 0,4 g |
| 1 kg | 400 mg | 200 mg | 160 mg | 40 mg |
| 100 g | 60 mg | 30 mg | 24 mg | 6 mg |
| 1 g | 10 mg | 2 mg | 4 mg | 1 mg |

Das deutsche Urgewicht ist: 1 kg + 0,05 mg und entspricht 1,000028 $dcm^3$ Wasser von $+4^{\circ}$.

Der Vergleich der Gewichtsstücke eines Gewichtssatzes unter sich läßt sich nach einem bestimmten Schema an einer Wage von der entsprechenden Empfindlichkeit durchführen. Die Beziehung auf das Urmaß kann freilich nur durch Vermittelung eines Normalgewichtes erfolgen. Derartige Vergleichungen sind ziemlich subtil und liegen im allgemeinen außerhalb der Arbeitsmöglichkeit des Einzelnen. Für uns in Deutschland besorgt die Vergleichung von Gewichtssätzen die Kaiserl. Normal-Eichungs-Kommission in Berlin gegen ein im Vergleich zu der mühevollen Arbeit geringes Entgelt Dieselbe stellt über einen ihr eingesandten Gewichtssatz eine Fehlertabelle auf, die die Abweichungen des Sollwertes der einzelnen Gewichtsstücke von den entsprechenden Normalien in Milligramm zum Ausdruck bringt. Kennt man diese Abweichungen, so kann man sie bei den Wägungen in Rechnung ziehen, also mit dem Gewichtssatze Kräftevergleichungen ausführen bis zu einer Genauigkeit, die den angewandten Hilfsmitteln entspricht.

In der Technik wird in der Regel nach Kilogrammgewichten gerechnet, in der Physik meist der tausendste Teil, das Gramm, $1\,g = 10^{-3}\,kg$, zugrunde gelegt. Als wichtiges Vielfache ist ferner zu beachten das Gewicht von 1000 kg = 1 Tonne = 1 t.

Aufgabe 5. Man rechne das Kilogramm und die Tonne in Gramm und Milligramm und umgekehrt um.

$$1\,kg = 10^3\,g = 10^3 \cdot 10^3 = 10^6\,mg. \quad 1\,g = 10^{-3}\,kg, \; 1\,mg = 10^{-6}\,kg.$$

$$1\,t = 10^3\,kg = 10^6\,g = 10^9\,mg. \quad 1\,kg = 10^{-3}\,t, \; 1\,g = 10^{-6}\,t, \; 1\,mg = 10^{-9}\,t.$$

Einrichtung und Behandlung feinerer Gewichtssätze: Die Gewichte sind ausschließlich mit den Elfenbeinenden der Pinzette anzufassen. Vergoldung der Gewichtssätze, um ihnen Schutz vor den Atmosphärilien zu sichern. Gewichtssätze aus Quarz (Bergkristall) usw. Herstellung der kleinsten Gewichtsstücke aus Platinblechen oder flachen Aluminiumdrahtspiralen.

**14. Die Arbeitseinheit.** Wir haben jetzt die beiden die mechanische Hubarbeit bestimmenden Faktoren kennen gelernt und

Maße für dieselben eingeführt, können mithin auch diese selbst messen. Die Einheit der mechanischen Arbeit wird geleistet, wenn das Gewicht von 1 kg von einem in der Nähe der Erdoberfläche befindlichen Niveau in ein um 1 m höheres Niveau gehoben wird: 1 kgm oder 1 mkg. Sinkt das Gewicht von dieser Höhe herab, so wird umgekehrt 1 kgm Arbeit zur Verfügung gestellt, 1 kgm Arbeit wird frei. Wird irgendein Körper von dem Gewichte $G$ kg um $H$ m in die Höhe gehoben, so ist die Arbeit

$$A = G \times H \text{ kgm} \tag{1}$$

zu leisten. Diese Arbeitsmenge ist in dem gehobenen Gewichte aufgespeichert und kann zu anderen Arbeitsleistungen verwendet werden.

So war bei Versuch 3 in dem bereits gehobenen Gewichte eine Arbeit angesammelt, die zu der Hebung des von uns in die einfache Maschine eingeführten Gewichtes verwendet wurde. Daß in der Tat die Hubleistung durch die eben genannten beiden Faktoren bestimmt ist und danach auch bewertet bzw. bezahlt wird, ist schon aus dem täglichen Leben her bekannt: die Hubleistung eines Arbeiters, welcher Steine auf einen Bau hinaufschafft, wird um so größer, je höher das Hubniveau und je schwerer die gehobene Last ist.

Aufgabe 6. Welche Hubarbeit würde ein Bergsteiger geleistet haben, dessen Eigengewicht samt Ausrüstung 84,7 kg beträgt, wenn er den höchsten Berg der Erde, soweit sichere Messungen darüber vorliegen, den Mount Everest im Himalajagebirge, mit 8840 nach anderen sogar 8880 m Höhe ganz, d. h. vom Meeresniveau aus, erklommen hätte?

Offenbar $84{,}7 \times 8840 = 749\,000$ kgm.

**15. Das technische Maßsystem.** Führen wir neben der Längeneinheit die Gewichtseinheit als Grundmaß ein, so messen wir in dem System, das in der Technik allgemein eingeführt ist.

Wir werden später noch ein anderes, in der Physik und namentlich auch in der Elektrophysik benutztes Maßsystem kennen lernen, bei dem eine Masseneinheit neben der Längeneinheit als zweite Grundeinheit auftritt. Wir wollen indessen vorwiegend im technischen System verbleiben. Zu beachten ist vor allem auch, daß wir hier wie in den nächstfolgenden Abschnitten zunächst die Zeit noch nicht benötigen, daß daher auch alle unsere Maßbeziehungen von der Zeit unabhängig sind.

Aufgabe 7. Man rechne die technische Arbeitseinheit in die bei großen Arbeitsleistungen verwendete Arbeitseinheit der Metertonne (mt) und die in der Physik vielfach gebräuchliche des Grammzentimeters um.

$$1 \text{ mt} = 1 \times 10^3 = 10^3 \text{ mkg}, \quad 1 \text{ kgm} = 10^{-3} \text{ mt}, \quad 1 \text{ kgm} = 10^3 \cdot 10^2 = 10^5 \text{ gcm},$$
$$1 \text{ gcm} = 10^{-5} \text{ kgm}.$$

Transportleistungen beurteilt man in der Technik vielfach nach dem Produkte von geförderter Last mal dem Transportwege. Davon ist die hier eingeführte Arbeitsgröße wohl zu unterscheiden, da der zum Bewegen einer Last benötigte Zug nur einen Bruchteil derselben bei guter (und horizontaler) Gleislage etwa 10 kg Zugkraft pro t Last, beträgt.

Aufgabe 8. Ein elektrischer Straßenbahnwagen wiegt etwa 10 t, der Anhängewagen 4 t; man rechne die pro km aufzuwendende Arbeitsmenge aus. Für die 14 Tonnenkilometer (14 tkm) Transportgewicht sind (im Mittel, also abgesehen vom Anfahren und Bremsen) ca. 140 000 kgm aufzuwendender Zugarbeit erforderlich.

**16. Das homogene Energiefeld und sein Diagramm.** Die erdanziehende Kraft nimmt mit der Entfernung vom Erdmittelpunkte ab, 1 kg Gewicht kann also nur dann seine Größe beibehalten, wenn wir uns um relativ geringe Beträge von der Erdoberfläche entfernen. Alsdann, aber auch nur dann werden Niveaus, denen gleiche Arbeitszuwächse entsprechen, voneinander gleiche Entfernungen besitzen: homogenes Energiefeld. Die Niveauflächen kennzeichnen sich in einer vertikalen Zeichenebene als horizontale „Niveaulinien". Wir wollen die durch die Gleichung (1) S. 19 dargestellte Hubleistung durch ein Diagramm (Fig. 3; vgl. auch Fig. 11) darstellen. Auf einer vertikalen Höhenaxe tragen wir von einem Nullpunkte aus, der etwa das Meeresniveau darstellt, Abschnitte in irgendeinem Maßstabe auf, welche Erhebungen in Metern darstellen sollen. Durch die einzelnen Stufen legen wir horizontale Niveaulinien, die wir als Spuren horizontaler Ebenen, Niveauebenen, auffassen. Ist uns ein Gewicht von $G$ kg auf einem höheren Niveau von der Höhe $H_1$ über dem Meeresspiegel gegeben und können wir dasselbe in ein tieferes Niveau $H_2$, wo also $H_1$ größer als $H_2$ ist ($H_1 > H_2$), sinken lassen, so wird uns eine durch diese Niveaudifferenz $H_1 - H_2 = H$ und das Gewicht $G$ bestimmte Arbeitsmenge $A = G \times (H_1 - H_2)$ zur Verfügung gestellt.

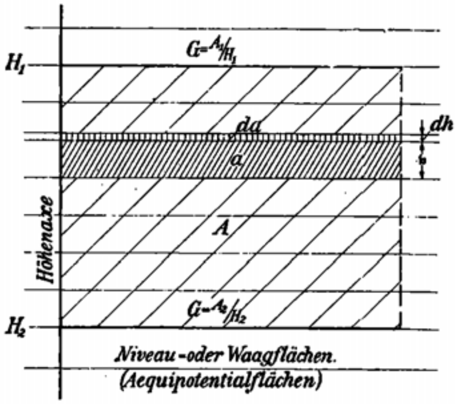

Fig. 3.

Wir haben in unserem Diagramme noch eine Richtung, die horizontale, frei. Wir tragen hier, etwa nach rechts hin, so viele Längeneinheiten in irgendeinem Maßstabe auf, als die in diesem Niveau zur Verfügung gestellte Gewichtsgröße Kilogramme besitzt. Damit ist durch diese Strecke auch die Größe des Gewichtes $G$ dargestellt.

Die aus $H$ und $G$ zu bildende Rechtecksfläche stellt dann offenbar zahlenmäßig den Arbeitswert $A$ dar.

Ist $G$ ein Wassergewicht, so würde $H_1$ den „Oberwasserspiegel“, $H_2$ den „Unterwasserspiegel“ und das Rechteck die durch diese Wasserkraft zur Verfügung gestellte Energiemenge darstellen in Litern, d. i. in diesem Falle in Kilogrammen und Metern, bzw. in großen Anlagen in tm, wenn t der etwa pro sek zur Verfügung gestellten Kubikmeterzahl Wasser entspricht.

**17. Potentielle Energie, Distanzenergie, Energie der Lage.** Ist eine Hubleistung vollführt, d. h. ein Gewicht gehoben worden, so ist die hierbei geleistete Arbeit nicht verloren, vielmehr ist sie in dem gehobenen Gewichte enthalten. Lassen wir dies sinken, so können wir mit demselben eine Arbeit verrichten, z. B. durch das gehobene Uhrgewicht die Widerstände in dem Räderwerke der Uhr überwinden. Dem gehobenen Gewichte wohnt somit die Fähigkeit, „Potentia“, inne, eine Arbeit zu leisten. Man spricht in diesem Sinne von „potentieller Energie“ oder man sagt: auf jedem Niveau habe das Gewicht ein bestimmtes „Potential“ in bezug auf das willkürlich gewählte Bezugsniveau. Da innerhalb derselben Niveaufläche der Arbeitsvorrat einer in sie gehobenen Last nach Versuch 2, S. 6, sich weder vermehrt noch vermindert, so stellen die Flächen gleichen Arbeitsvorrates „Äquipotentialflächen“ dar. Wir können dem Potentiale einer solchen Fläche einen bestimmten in kgm auszudrückenden Wert $\Pi$ erteilen. Dies ist dann eine Größe, deren Absolutwert wir freilich im allgemeinen nicht angeben, deren Änderung wir aber verfolgen können. Denn sie kann nur dadurch wachsen, daß neue Hubarbeit geleistet, oder dadurch abnehmen, daß solche verbraucht wird, und diese Änderungen der Größe $\Pi$ können wir genau messend verfolgen. Da in unserem Falle der Energievorrat dadurch bedingt ist, daß der gehobene Körper eine größere Distanz von dem Wirkungszentrum, dem Mittelpunkte der Erde, gegen deren anziehende Kraft die Arbeit geleistet worden ist, besitzt, so spricht man hier auch von „Distanzenergie“. Endlich ist auch der Name „Energie der Lage“ gebräuchlich.

Die für diese Arbeitsgröße vielfach noch verwendete Bezeichnungsweise „Spannkraft“ sollte unbedingt verlassen werden, da es sich nicht um eine Kraft, sondern um eine Energiegröße handelt.

**18. Definition eines Arbeitsfaktors durch die Energie und den anderen Faktor.** Wir können bei der Hubarbeit beide Faktoren durch willkürlich festgesetzte Einheiten messen. Ist aber einmal für die Arbeitsgröße ein Maß gefunden worden, so kann offenbar ein Faktor durch diese Energiegröße selbst und den anderen Faktor bestimmt werden. So ist durch die Gleichung (1) S. 19 augenscheinlich das Gewicht $G$ definiert als Quotient von Arbeitsgröße $A$ und Hub $H$:

$$G = A/H \text{ oder genauer } G = A_1/H_1 = A_2/H_2, \tag{2}$$

so daß die Arbeitsleistung wird:

$$L = \frac{A_1}{H_1}(H_1 - H_2) = \frac{A_2}{H_2}(H_1 - H_2). \tag{2a}$$

Wir werden später sehen, daß es unter Umständen bequem ist, eine an sich nicht unmittelbar anschaulich gegebene Größe in dieser Weise zu definieren. So wird in der Wärmelehre durch den Quotienten von Wärmemenge, die sich einer Arbeitsgröße als äquivalent erweist, durch die Temperatur die sog. „Entropie" bestimmt. Mit Rücksicht auf diese Analogie wird die sonst schwierig zu definierende Entropiegröße, z. B. von Zeuner direkt als „Wärmegewicht" bezeichnet. Es soll damit durchaus nicht gesagt sein, daß die Wärme ein Gewicht besitzt, sondern nur auf die durch die Gleichung (2) ausgesprochene Definition des Gewichtes als Analogon hingewiesen werden. So könnte man umgekehrt auch die Niveau- oder nach (17) die Potentialdifferenz durch die Arbeit definieren, die man leisten muß, um aus dem Bezugsniveau (hier etwa dem Meeresniveau) die Gewichtseinheit (auf irgendeinem Wege, vgl. § 4, S. 8) bis zum betreffenden Potentialniveau emporzuheben. Wir werden sehen, daß man in ähnlicher Weise das elektrische Potential tatsächlich definiert. Man könnte also neben der Längen- oder Gewichtseinheit eine Energieeinheit $e$ einführen. Dann würde die Gewichtsgröße auszudrücken sein durch $e$/m, die Längeneinheit durch $e$/kg.

**19. Das inhomogene Energiefeld.** Da die Schwere mit der Entfernung vom Erdmittelpunkte abnimmt, so würde das Diagramm Fig. 3 unzutreffend werden, wenn wir es der Höhe nach über einen zu großen Raum erstrecken wollten.

Denkt man sich z. B. bei dem Versuche 3, S. 7, das Rad viel höher oben befestigt, so erkennt man unmittelbar, daß jetzt die Äquivalenz von geleisteter und verbrauchter Arbeit nicht mehr die Gleichheit der (an denselben Ort verbrachten) Gewichtsstücke verbürgen würde.

Wir müssen uns, wenn die Gleichung (1) und damit auch (2) richtig bleiben soll, auf einen engeren Bereich $h$ der Niveaudistanz beschränken, innerhalb dessen das Gewicht $G$ als unveränderliche Größe angesehen werden kann. Alsdann werden an Stelle der genannten Gleichungen folgende eintreten:

$$a = G \times h \quad \text{und} \quad G = a/h. \tag{3}$$

Wenn die Hubhöhe um einen kleinen Betrag, den wir durch $\varDelta h$ bezeichnen wollen, wächst, so wird die Arbeitsleistung $a$ um einen kleinen zugehörigen Betrag $\varDelta a$ zunehmen, von dem ersichtlich ist, daß der Quotient $\varDelta a/\varDelta h$ wiederum gleich $G$ sein muß (vgl. Fig. 3). Daran ändert sich nichts, wenn wir die Zuwächse der voneinander abhängigen Größen $a$ und $h$ immer kleiner werden lassen. Es ist also bemerkenswert, daß der Quotient dieser beiden Größen, auch wenn sie sehr klein werden, doch immer einen bestimmten Wert, nämlich $G$ (einen Grenzwert oder „limes") besitzt. Solche kleine einander entsprechende Differenzen bezeichnet man durch ein vorgesetztes $d$.

Das Symbol $dh$ ist also nicht als Produkt der beiden Größen $d$ und $h$ aufzufassen, sondern $d$ steht hier gewissermaßen nur zur Abkürzung für die Worte: „eine geringe Änderung, kleine Differenz der Größe", welche nachfolgt. Im gleichen Sinne wurde vorhin als Zeichen $\Delta$ benutzt. Ähnlich bedeutet $da$ den dem kleinen Hube um $dh$ entsprechenden Arbeitszuwachs.

Solche kleine Differenzen nennt man „Differentiale", ihren Quotienten einen „Differentialquotienten", so daß das Gewicht $G$ auch als durch die „Differentialgleichung" (so genannt, weil die Gleichung einen Differentialquotienten enthält):

$$G = \frac{da}{dh} \tag{4}$$

definiert angesehen werden kann. Man darf diese Gleichung auch in der Form schreiben:

$$da = G \times dh, \tag{4a}$$

da $dh$ und $da$, wenn auch sehr kleine, so doch bestimmte einander entsprechende Größen darstellen.

Sehr häufig können wir Beziehungen zwischen solchen kleinen Größen unmittelbar aufstellen; wie wir dann aus der „Differentialgleichung" auf die Beziehung zwischen den endlichen Größen selbst schließen können, wird durch spätere Beispiele erläutert werden.

**20. Gleichgewichtsbedingung.** Wir sagen: Zwei an einer Maschine angreifende Gewichte sind im Gleichgewichte, wenn die (bei den möglichen Bewegungen der Maschine) von dem einen geleistete Arbeit gleich der vom anderen gewonnenen ist.

Mit Hilfe eines kleinen, nur zur Überwindung der noch vorhandenen Reibung nötigen Zusatzgewichtes wird das andere Gewicht gehoben, wenn das mit dem Zusatz versehene Gewicht um ein kleines Stück $dh$ sinkt. Dabei kann auf Grund einer Betrachtung, wie wir sie in (2) durchgeführt haben, einer „Abstraktion" das Zusatzgewicht so klein gedacht werden, daß wir dasselbe für die Arbeitsleistung $da$ selbst außer acht lassen, daß wir von ihm abstrahieren können.

**21. Umkehrbarkeit des Arbeitsprozesses.** Wir können das Gleichgewicht auch noch anders auffassen: Wenn zwei Gewichte $A$ und $B$ an einer Maschine im Gleichgewichte sind, so heißt das mit anderen Worten, daß der mit ihnen durchführbare Arbeitsprozeß „umkehrbar" ist: Durch Sinken von $A$ kann $B$ gehoben werden, Arbeit wird von $A$ verbraucht, an $B$ geleistet. Umgekehrt kann im Falle des Gleichgewichtes aber auch an $A$ Arbeit geleistet werden, wenn $B$ sinkt, und zwar sind die entsprechenden, sich ineinander umsetzenden Arbeiten „$da$" wieder einander gleich.

Gleichgewicht dadurch zu charakterisieren, daß man sagt, die ihm entsprechenden Arbeitsprozesse sind „umkehrbar", ist eine Betrachtungsweise, welche bei den Beweisen der Wärmelehre eine große Rolle spielen wird. Wir werden die Umkehrbarkeit eines Prozesses als Zeichen dafür betrachten, daß wir bei diesem Prozesse durch lauter einzelne Gleichgewichtszustände hindurchgehen. Erläuterung an den Anordnungen der Versuche 3 und 4.

**22. Das spezifische Volumen oder die Räumlichkeit.** Bei dem Versuche 5, S. 16, fällt auf, daß, wenn wir dieselbe Gewichtsgröße, das kg, in verschiedenen Materialien nachbilden, dann diese Kopien verschiedene Rauminhalte einnehmen.

Das kg-Gewicht aus Blei nahm den kleinsten Raum ein, ersichtlich größere Volumina müssen wir dem kg aus Eisen und Messing erteilen.

Hier liegt offenbar eine dem Materiale eigentümliche, spezifische Eigenschaft vor. Um sie genau definieren und messen zu können, treffen wir folgende Festsetzung: Unter spezif. Volumen oder der „Räumlichkeit“ $\bar{v}$ versteht man das Volumen der Gewichtseinheit, kg oder g. Nehmen also $G$ g einer Substanz $V$ cm$^3$ Raum ein, so ist

$$\bar{v} = V/G. \tag{5}$$

Das Wort „spezifisch“ soll im Drucke durch einen Querstrich über dem betreffenden Buchstaben bezeichnet werden.

Aufgabe 9. Aluminium wird in Gußstücken in den Handel gebracht, welche die Form von abgestumpften Pyramiden (nach Art der altägyptischen „Mastaba“) mit zwei etwas abgeschrägten Kanten haben. Die rechteckige Grundfläche eines solchen Aluminiumbarrens hat $9 \times 17,4$ cm$^2$, die obere Fläche $5,7 \times 13,5$ cm$^2$ Inhalt, die Höhe des Gußstückes beträgt 7,3 cm; es wiegt 2,189 kg. Wie groß ist $\bar{v}$ für Aluminium?

Die Grundfläche $F$ hat 156,7 cm$^2$ Inhalt, die obere Fläche $f = 76,9$ cm$^2$; $^1/_3\, h = 2,43$ cm. Das Volumen einer abgestumpften Pyramide ist

$$V = {}^1/_3\, h\left(F + f + \sqrt{F \cdot f}\right),$$

hier also

$$V = 2,43\,(233,6 + 109,8) = 2,43 \cdot 343,4 = 835 \text{ cm}^3,$$

daher

$$\bar{v} = 835/2189 = 0,382.$$

Würden sich die Dimensionen genauer bestimmen lassen, so würde man ein größeres $V$ und damit $\bar{v}$, nämlich 0,391 erhalten.

Ist $\bar{v}$ für ein Material bekannt, so findet man das Gewicht $G$ eines gegebenen Volumens $V$ oder das Volumen $V$ eines gegebenen Gewichtes $G$ durch die aus (5) unmittelbar folgenden Beziehungen:

$$G = V/\bar{v} \quad \text{und} \quad V = \bar{v} \cdot G. \tag{6}$$

Fig. 4 stellt Rechtecker aus verschiedenen Materialien dar, deren Länge (bei gleicher Höhe und Tiefe) sich wie die spezif. Vol. der eingeschriebenen Substanzen verhalten. Man sieht, daß Magnesium und Aluminium ein sehr lockeres Gefüge haben oder aus relativ leichten, kleinsten Bausteinen zusammengesetzt sein müssen, da sie pro Gewichtseinheit einen sehr großen Raum erfüllen. Eine mittlere Räumlichkeit haben die Metalle Zinn, Zink usw. bis Blei. Bei den Edelmetallen, Gold und Platin, müssen die diese Elemente aufbauenden kleinsten Bestandteile sehr dicht zusammengelagert sein, denn sie haben unter den aufgeführten Körpern das kleinste spezif. Vol.

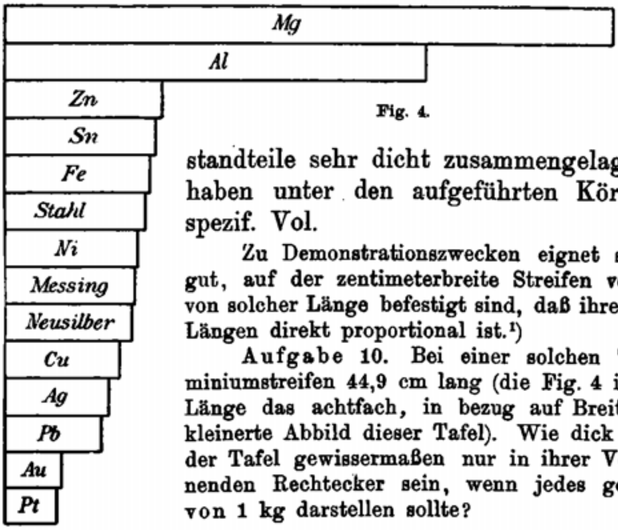


Fig. 4.

Zu Demonstrationszwecken eignet sich eine Tafel sehr gut, auf der zentimeterbreite Streifen verschiedener Metalle von solcher Länge befestigt sind, daß ihre Räumlichkeit diesen Längen direkt proportional ist.[1])

Aufgabe 10. Bei einer solchen Tafel war der Aluminiumstreifen 44,9 cm lang (die Fig. 4 ist also in bezug auf Länge das achtfach, in bezug auf Breite das zweifach verkleinerte Abbild dieser Tafel). Wie dick müßten alle die auf der Tafel gewissermaßen nur in ihrer Vorderansicht erscheinenden Rechtecker sein, wenn jedes gerade das Gewicht von 1 kg darstellen sollte?

Da $V/\bar{v} = x \cdot 1 \cdot 44{,}9/0{,}391 = G = 1000$ g sein soll, so müßte $x = 8{,}7$ cm sein.

**23. Das spezifische Gewicht.** Nachdem man durch Nachbildung des mit Wasser von $+4^0$ erfüllten $dcm^3$ ein geeignetes Gewicht geschaffen und dieses zweckmäßig unterteilt in Gewichtssätzen zusammengefaßt hat, kann man nun auch umgekehrt daran gehen, dieses Einheitsvolumen in verschiedenen anderen, zunächst flüssigen Substanzen nachzubilden, und deren Gewicht bestimmen.

Versuch 7. Auf der Tafelwage wird das Hohlliternmaß des Versuches 5, S. 16, austariert und mit Petroleum völlig bis zum Rande (event. unter Zuhilfenahme einer Pipette) ausgefüllt. In diesem Falle vermag 1 kg nicht mehr Gleichgewicht herzustellen, es erweist sich als zu schwer, woraus hervorgeht, daß die Versuchssubstanz spezif. leichter als Wasser ist; ca. 0,812 kg Wasser halten dem Liter Petroleum das Gleichgewicht.

Wir nennen spezif. Gew. das Gewicht der Volumeneinheit.

Das spezif. Gew. des verwendeten Petroleums ist demnach bei der Versuchstemperatur 0,812 kg/l oder 0,812 $g/cm^3$. Würden wir den $dcm^3$ mit Quecksilber (Hg) gefüllt haben, so würden wir ein weit größeres Gewicht auf der anderen Tafel der Wage aufsetzen müssen, nämlich 13,6 kg: das spezif. Gew. des Quecksilbers bei Zimmertemperatur ist rund 13,6 kg/l oder 13,6 $g/cm^3$.

1) Um sie weithin deutlich sichtbar zu machen, beleuchtet man sie mit dem schwach divergent gemachten Lichte einer Projektionsbogenlampe.

Finden sich $G$ g einer Substanz in $V$ cm³ vor, so ist das spezif. Gew.

$$\bar{s} = G/V, \tag{7}$$

woraus folgt:

$$G = \bar{s} \cdot V \quad \text{und} \quad V = G/\bar{s}. \tag{8}$$

Hiernach ist das spezif. Gew. $\bar{s}$ eine benannte Zahl und ist bestimmt durch eine gewisse g-Zahl Gewicht dividiert durch die entsprechende Zahl von cm³; $\bar{s}$ hat also die Dimension (vgl. § 10, S. 14) g/cm³ (bzw. kg/l oder t/m³).

Die hier gegebene Definition ist bequemer als die sonst zuweilen wohl übliche: Das spezif. Gew. sei die Zahl, welche angibt, wievielmal schwerer das betreffende Material ist als ein gleich großes Volumen destillierten Wassers von $+4^0$. Denn die Beziehung zum Wasser ist ja bereits in die Definition unserer Gewichtseinheit mit aufgenommen. Außerdem würde hier das spezif. Gew. als unbenannt erscheinen, und endlich würde die große Analogie mit der Festsetzung des spez. Vol. verloren gehen. Wir wollen diese unbenannte Zahl: „Gewichts- oder Dichteverhältnis" (bezogen auf Wasser) nennen.

Kennt man von irgendeiner Substanz $\bar{s}$ und $V$, so kann man daraus $G$ nach (8) berechnen, was oft von Wichtigkeit ist, wenn man das Körpergewicht nicht direkt bestimmen kann, wenn es z. B. zu groß für irgendeine Wage ist.

Aufgabe 11. Der innere Stein des Türsturzes vom sog. Schatzhause des Atreus (dem „Kuppelgrabe des Agamemnon") in Mykenae ist 9 m lang, 5 m breit und 1 m hoch. Er ist aus einem Brecciagestein vom spezif. Gew. 2,67 gebrochen. Welche Last ist hier bereits in vorhistorischer Zeit bewegt worden?

Man findet $2{,}67 \cdot 45 = 120$ t.

Die Beziehung $V = G/\bar{s}$ dient zur Bestimmung des Volumens durch Auswägen aus Gewicht und spezif. Gew. einer Füllflüssigkeit, z. B. beim „Kalibrieren" vgl. w. u. in § 25.

Nach (5) und (7) ist $\bar{v} = V/G$ und $\bar{s} = G/V$, daher

$$\bar{v} = 1/\bar{s}, \quad \bar{s} = 1/\bar{v} \quad \text{und} \quad \bar{v} \cdot \bar{s} = 1. \tag{9}$$

Spezif. Gew. und spezif. Vol. sind einander „reziproke" Größen.

Die Materialien der Fig. 4 mit größter Räumlichkeit sind also diejenigen, denen das kleinste spezif. Gew. zukommt und umgekehrt.

Wir werden noch häufiger solchen einander reziproken Größen begegnen, die dann immer die durch (9) ausgedrückten Beziehungen zueinander aufweisen.

**24. Bestimmung der spezif. Volumina und der spezif. Gewichte.** Wie die Definitionsgleichungen (5) und (7) ohne weiteres erkennen lassen, erfordert die Bestimmung der beiden Materialkonstanten $\bar{v}$ und $\bar{s}$

1. eine Gewichtsbestimmung, 2. eine Volumenbestimmung.

Erstere ist an der Wage durch Vergleich mit den Stücken eines Gewichtssatzes durchführbar, für die zweite bieten sich mannigfache Methoden dar:

*α*) Flüssigkeiten. Zur genaueren Abgrenzung, als es bei dem Versuche 7 möglich war, eines bestimmten Volumens einer Flüssigkeit dienen die Pyknometer oder Meßfläschchen etwa der Form Fig. 5. In ein Glasfläschchen *G* paßt ein eingeschliffener Stöpsel *S*, an dem zugleich ein Thermometer *T* angeschmolzen ist. Wird *G* mit Flüssigkeit gefüllt und der Stöpsel so eingesetzt, daß Luftblasen entweichen können, so wird die überschüssige Flüssigkeit herausgedrängt.[1]) Das Volumen wird durch Auswägen mit Wasser oder Hg vorher ermittelt (vgl. § 25) und auf dem Fläschchen angegeben.

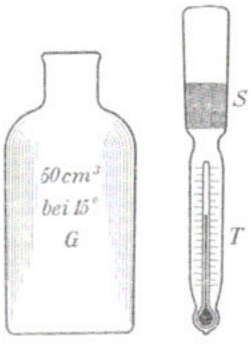

Fig. 5.

1) Projektionseinrichtungen. Um derartige kleine Apparate demonstrieren zu können, wird im folgenden ausgiebiger Gebrauch von zwei Projektionslampen gemacht, einer, welche aufrechtstehende Gegenstände zur Abbildung bringt: Vertikalprojektionslampe — im folgenden immer kurz durch V.P.L. bezeichnet — und einer, auf der horizontal liegende Gegenstände dadurch zur Abbildung auf dem vertikalen Projektionsschirme gebracht werden, daß der Strahlengang unter dem Gegenstande durch einen Spiegel, oberhalb desselben durch ein total reflektierendes Prisma abgelenkt wird: Horizontalprojektionslampe; eine Projektion dieser Art soll im folgenden immer durch H.P.L. bezeichnet werden. Größere Gegenstände werden in Schattenrißprojektion gezeigt (im folgenden kurz durch S.R.P. bezeichnet).

Die V.P.L. zeigt die Gegenstände umgekehrt. Um sie aufrecht erscheinen zu lassen, wird, wenn dies der Deutlichkeit halber erwünscht ist, in den Strahlengang ein total reflektierendes, rechtwinkliges „Umkehrprisma" eingeschaltet (was freilich die Bildhelligkeit und auch die Größe der abzubildenden Fläche etwas beeinträchtigt).

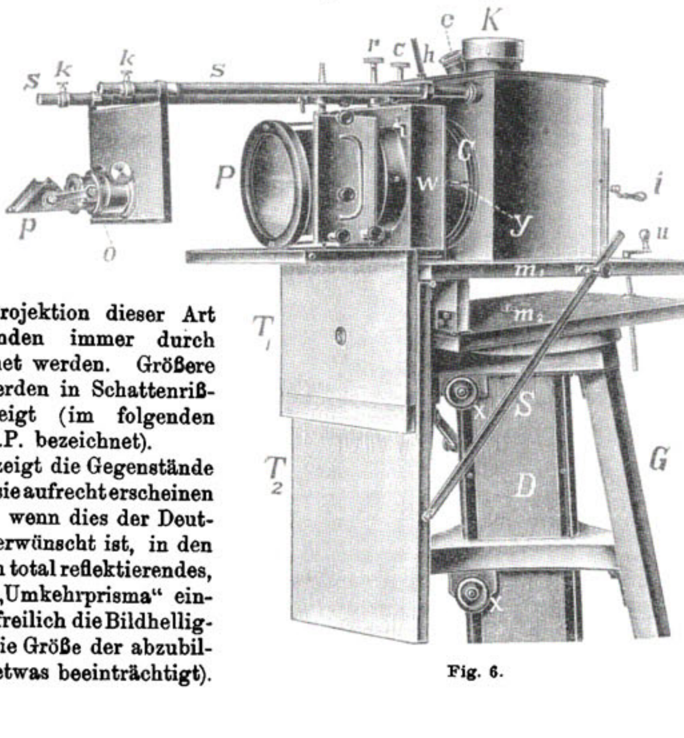

Fig. 6.

Man darf die Temperatur der Flüssigkeit nicht verändern, weshalb das Pyknometer möglichst wenig mit den Händen zu berühren und jedenfalls nur am Halse anzufassen ist.

**Aufgabe 12.** Ein Meßfläschchen von 50 cm³ Gehalt wiegt leer $G_0 = 23{,}5$ g, mit Terpentinöl gefüllt $G_1 = 67{,}07$ g. Wie groß ist $\overline{v}$ und $\overline{s}$ dieser Füllflüssigkeit?

Man findet $G = 67{,}07 - 23{,}56 = 43.51$, daher $\overline{v} = 50{,}00/43{,}51 = 1{,}149$ und $\overline{s} = G/V = 43{,}51/50{,}00 = 0{,}87$; Probe: $\overline{v} \cdot \overline{s} = 1{,}000$.

---

Die hier verwendete, von M. Th. Edelmann, München hergestellte Projektionseinrichtung zeigen Fig. 6 und 7.

Die Bogenlampe $K$ kann mit allem Zubehör um einen Zapfen des Gestelles $G$ gedreht, und ihr Strahlengang daher überallhin gerichtet werden. Außerdem kann man sie mittels der Kurbel $u$ um eine Horizontale mehr oder weniger neigen. Mit ihr ist der Kondensor $C$ (dessen erste Linse bei $y$ verschiebbar ist), sowie ein Wasserkasten $W$ zur Absorption der Wärmestrahlen verbunden. Die zur Projektion zu bringenden Apparate werden auf die obere Platte des Tisches $T_2$ gestellt, der sich heben oder senken und um einen (in der Figur erkennbaren) Zapfen drehen läßt. Außerdem kann der Tisch mittels zweier, oben festklemmbarer Stangen wie $S$ in verschiedene Neigungen gebracht werden, was oft von Wert ist, wenn man die Axenstrahlen der Lampe parallel einer bestimmten Fläche durch den zu projizierenden Apparat senden will. (In der Figur steht augenblicklich vor der Lampe die erst später zu beschreibende pneumatische Kammer $P$ zur Projektion der Luftpumpenexperimente.) Außerdem läßt sich aber der Tisch ganz entfernen, so daß größere Apparate, hohe Stative u. dgl. direkt vor der hoch- und tiefzustellenden Lampe aufgestellt werden können. Um namentlich nach oben hin mit dem Platze möglichst wenig behindert zu sein, wird das Projektionsobjektiv $O$ nur von zwei Stangen $ss$ getragen, an denen die das Objektiv haltende und Nebenlicht abschirmende Metallwand entlang gleiten und in geeigneter Stellung befestigt werden kann. Zu der Lampe gehören verschiedene Objektive mit verschiedenen Vergrößerungen. In Fig. 6 ist das Umkehrprisma $p$ vorgesteckt. Zur Zentrierung des Strahlenganges dient die die Stangen $ss$ hebende oder senkende Regulierschraube $r$.

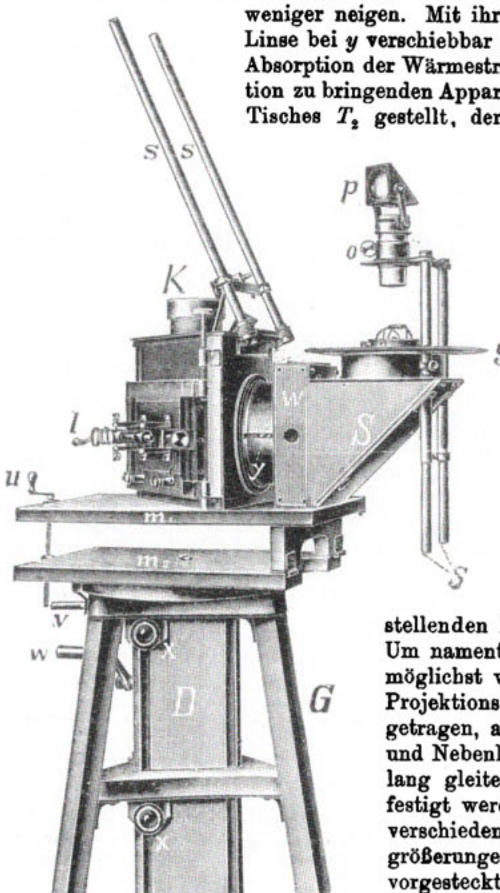

Fig. 7.

*β*) Feste Körper. Ist ein festes Material in regelmäßiger Form gegeben, so genügt es zur Volumenbestimmung, seine Dimensionen auszumessen, was am besten mit dem Kalibermaße oder mit der Schublehre (vgl. § 8 S. 13) geschieht.

Aufgabe 13. Ein Kupferwürfel von 2,32 cm Seitenlänge wiegt 111 g, wie groß ist $\bar{v}$ und $\bar{s}$ für Kupfer?

$$V = (2{,}32)^3\ \mathrm{cm}^3 = 12{,}5\ \mathrm{cm}^3;\ \text{daher}\ \bar{v} = 12{,}5/111 = 0{,}112\ \text{und}$$
$$\bar{s} = 111/12{,}5 = 8{,}9.$$

Aufgabe 14. Das metallische Kalium wird in Form von Kugeln in den Handel gebracht, die unter Petroleum aufzubewahren sind, da sich das Kalium leicht mit dem Sauerstoffe der Luft und des Wasserdampfes verbindet, oxydiert. Eine solche Kaliumkugel (die nur mit vollkommen trockenen Händen anzufassen ist) wiegt 2,64 g, bei einem Durchmesser von 1,8 cm. Wie groß ist das spezif. Vol. und Gew. dieses Leichtmetalls?

---

Sollen Diapositive projiziert werden, so wird auf *ss* ein Bilderhalter gesetzt. Bei Schattenrißprojektion wird in *O* statt der Objektive eine Irisblende eingesetzt, von der ein zentrischer Strahlenkegel ausgeht, in den die Gegenstände gestellt werden. Benötigt man das Lampenlicht direkt, etwa um Tafeln, Tabellen, Apparatteile in grelle Beleuchtung zu setzen, oder um ein paralleles Strahlenbündel zu erzeugen, so werden die Stangen *ss* mit dem Objektivhalter einfach zurückgeklappt, wie es Fig. 7 zeigt. Dies geschieht auch, wenn horizontal liegende Gegenstände oder Figuren, etwa Eisenfeilichtketten (magnetische Kraftlinien) an einem vertikalen Projektionsschirme abgebildet werden sollen. Dann wird das aus der Lampe parallel austretende Licht durch einen Spiegel *S* nach oben geworfen, wo sich die zweite, das Licht konvergent machende Kondensorlinse und darüber eine Spiegelglasplatte zum Aufsetzen der zu projizierenden Gegenstände befindet. Das Objektiv wird durch Verschieben der Stangen *S* zunächst grob, dann durch *o* fein eingestellt. Unter Vermittelung des Prismas *p* dient die H.P.-Lampe auch als „Scheinwerfer", da durch Drehen desselben der Lichtkegel überallhin auf einen Gegenstand zu seiner intensiven Beleuchtung geleitet werden kann.

Um horizontale Anordnungen im Schattenrisse zu zeigen, werden sie auf einer größeren Spiegelglasplatte aufgestellt. Der Kohlebogen einer (hinter dem Experimentiertisch auf dem Boden stehenden) Bogenlampe (ohne Linsen) wirft sein Licht auf einen unter 45° gegen die Horizontale geneigten Spiegel, der unter der Glasplatte steht. An einem geneigten, weißen Schirme darüber sieht man eine Zentralprojektion alles dessen, was sich auf der Glasplatte abspielt.

Undurchsichtige Gegenstände werden dadurch projektionsfähig, daß sie intensiv beleuchtet werden und dann von ihnen (unter Zwischenschaltung eines Spiegels oder Umkehrprismas) ein Bild mittels eines Projektionsobjektives entworfen wird: „epidiaskopische Projektion".

Damit der Zuhörer eine deutliche Vorstellung von der vorgenommenen Vergrößerung und also auch davon erhält, in welchem Maßstabe er sich die gesehenen Bilder verkleinert zu denken hat, um auf die Wirklichkeit zu kommen, werden zunächst bekannte Gegenstände, ein Finger, eine Münze oder eine Stahlfeder zur Projektion gebracht.

$$V = \frac{4}{3}\pi(0,9)^3\,\mathrm{cm}^3 = 3,06\,\mathrm{cm}^3,\quad \bar{v} = 3,06/2,64 = 1,16 \text{ und } \bar{s} = 0,86,$$

es ist also spezif. leichter als Wasser und würde auf diesem schwimmen; [dabei ist der hier erhaltene Wert noch zu groß, weil das Kalium sich an der Luft offenbar schon etwas oxydiert hatte].

Aufgabe 15. Ein Zinkzylinder von 1,23 cm Dicke und 2,03 cm Länge wiegt 17,28 g. Wie groß ist $\bar{v}$ und $\bar{s}$?

Das Volumen $V = \pi(0,615)^2 \cdot 2,03 = 2,412\,\mathrm{cm}^3$, daher: $\bar{v} = 0,1398$ und $\bar{s} = 7,16$.

Aufgabe 16. Ein Eisenkonus von 2.25 cm Höhe und 1,27 cm Durchmesser an der kreisrunden Basis wiegt 7,43 g. Wie groß ist $\bar{v}$ und $\bar{s}$ für die verwendete Eisensorte?

$$V = \tfrac{1}{3}\pi r^2 h = \tfrac{1}{3}\pi \cdot (0,635)^2 \cdot 2.25 = 0,952\,\mathrm{cm}^3,\quad \text{daher } \bar{v} = 1,28 \text{ und } \bar{s} = 7,82.$$

Aufgabe 17. Ein Stück Magnesiumband von 95 cm Länge, 0,30 cm Breite und 0,20 cm Dicke wiegt nur 1,02 g. Wie groß ist $\bar{v}$ und $\bar{s}$ für dieses Leichtmetall?

Es ist $V = 95 \cdot 0,30 \cdot 0,20 = 5,70\,\mathrm{cm}^3$, daher $\bar{v} = 5,58$ und $\bar{s} = 1,79$.

Aus Aluminium und Magnesium wird eine Legierung hergestellt, die sich leicht gießen und gut bearbeiten läßt, das „Magnalium", welches wegen seines geringen spezif. Gew. ($\bar{s} = 2,4$—$2,6$) für viele Konstruktionen, z. B. bei Luftfahrzeugen, von großer, technischer Bedeutung ist.

Aufgabe 18. Schwefel kommt in Form von Stangen in den Handel (die freilich im Innern nicht immer blasenfrei sind). Ein konisches (kegelstumpfartiges) Stück von 5,8 cm Dicke an einem, 4,9 cm Dicke am anderen Ende und 7,2 cm Länge wiegt 319,0 g. Man berechne hieraus $\bar{v}$ und $\bar{s}$.

Das Volumen des Kreiskegelstumpfes ist

$$V = \tfrac{1}{3}\pi h(R^2 + Rr + r^2),$$

daher hier

$$V = \tfrac{1}{3}\pi\, 7,2(2,9^2 + 2,9 \cdot 2,45 + 2,45^2) = \tfrac{1}{3}\pi\, 7,2 \cdot 21,52 = 162,3\,\mathrm{cm}^3,$$

daher

$$\bar{v} = 0,509 \text{ und } \bar{s} = 1,96.$$

Hat das feste Material nicht regelmäßige Gestalt, so kann man eine „Verdrängungsmethode" benutzen. Man senkt dasselbe in ein mit einem bekannten Flüssigkeitsvolumen gefülltes Gefäß ein und bestimmt das von ihm verdrängte Flüssigkeitsgewicht $G$ durch Wägung. Aus Formel (8) S. 26 erhält man dann das verdrängte Volumen $V$ aus $G$, wenn man das $\bar{s}$ der verdrängten Flüssigkeit kennt. Hier leistet das Pyknometer gute Dienste, wenn es sich um kleinkörnige oder pulverförmige Substanzen handelt.

Ist $G_0$ das Gewicht des leeren Pyknometers, $G_1$ das des mit der Flüssigkeit gefüllten, und wird die abgewogene Menge $G_2$ der Substanz eingebracht, so müßte, wenn nichts verdrängt wäre, bei einer dritten Wägung des Fläschchens das Gewicht $G_3 = G_1 + G_2$ erhalten werden. Die Differenz stellt das von der eingebrachten Substanz verdrängte Flüssigkeitsgewicht $G$ dar. Kann man Wasser als Verdrängungsflüssigkeit benutzen, so entspricht bei weniger genauen

Messungen 1 g verdrängter Flüssigkeit 1 $cm^3$ Volumen. Bei genaueren Messungen hat man zu beachten, daß das spezif. Gew. des Wassers bei höheren Temperaturen kleiner als 1,00.. ist, nämlich bei

$$15^0 = 0{,}999126,\quad 16^0 = 0{,}998970,\quad 17^0 = 0{,}998801,\quad 18^0 = 0{,}998622,$$

$$19^0 = 0{,}998432,\quad 20^0 = 0{,}998230,\quad 21^0 = 0{,}998019.$$

Für Quecksilber ist das Gewicht von 1 $cm^3$ bei 0°: $\bar{s}_0 = 13{,}59545$, bei 15°: $\bar{s}_{15} = 13{,}55849$, so daß $\bar{v}_0 = 0{,}0735540$ und $\bar{v}_{15} = 0.0737545$ ist.

Aufgabe 19. In ein Pyknometer, welches leer 23,560 g, mit Wasser von 19° gefüllt $G_1 = 73{,}511$ g wiegt, werden $G_2 = 28{,}323$ g kleine Stückchen Wismut eingebracht. Dabei treibt man durch Schütteln zunächst alle Luftblasen heraus, füllt schließlich noch mit Wasser auf, setzt den Stöpsel ein und wischt mit Fließpapier ab. Die Wägung ergibt $G_3 = 98{,}921$ g. Wie groß ist $\bar{v}$ und $\bar{s}$ der eingebrachten Substanz?

Wäre kein Wasser verdrängt worden, so hätten sich bei der letzten Wägung $73{,}51_1 + 28{,}32_3 = 101{,}83_4$ ergeben müssen, es sind also $101{,}83_4 - 98{,}92_1 = 2{,}91_3$ g Wasser verdrängt worden, die $2{,}91_8$ $cm^3$ Volumen repräsentieren, so daß

$$\bar{v} = 2{,}91_8/28{,}32_3 = 0{,}1037 \text{ und } \bar{s} = 9{,}71$$

für dieses Schwermetall erhalten wird.

Hat man es mit Substanzen zu tun, die sich nicht mit Wasser vertragen, so muß man eine andere Verdrängungsflüssigkeit von bekanntem spezif. Gew. $\bar{s}$ wählen.

Aufgabe 20. Natriumstückchen werden in das mit Petroleum von dem spezif. Gew. $\bar{s} = 0{,}812$ gefüllte Pyknometer von 50 $cm^3$ Volumen gebracht. Nach völligem Auffüllen und Einsetzen des Stopfens wiegt das eben benutzte Pyknometer $G_3 = 67{,}63$ g. Wird das Petroleum ausgegossen, das Natrium gut mit Fließpapier abgetrocknet und im gleichen Fläschchen wieder gewogen, so ergibt sich $G_4 = 45{,}23$ g. Wie groß ist $\bar{v}$ und $\bar{\sigma}$ für dieses Alkalimetall?

Das um das Gewicht des leeren Pyknometers verminderte Gewicht $G_4$ ergibt zunächst, daß $G = 45{,}23 - 23{,}56 = 21{,}67$ g Natrium verwendet wurden. $G_3 - G_4 = 22{,}40$ gibt die g-Zahl des neben dem Natrium noch vorhandenen Petroleums an; das Meßfläschchen könnte aber $50 \cdot 0{,}812 = 40{,}60$ g enthalten (was eventuell noch durch eine weitere Wägung kontrolliert wird; bei bekanntem Volumen würde diese umgekehrt das spezif. Gew. $\bar{s}$ der Füllflüssigkeit ergeben), es sind also $40{,}60 - 22{,}40 = 18.20$ g Petroleum verdrängt worden, denen das Volumen $V = 18{,}20/0{,}812 = 22{,}4$ $cm^3$ entspricht, so daß für das Natrium selbst $\bar{v} = 22{,}4/21{,}67 = 1{,}03$ und $\bar{\sigma} = 0{,}97$ erhalten wird.

Andere Methoden, um $V$ und damit $\bar{v}$ und $\bar{s}$ zu bestimmen (die „Auftriebsmethoden“) werden wir später kennen lernen, ebenso die Methoden für Gase und Dämpfe.

In der Tabelle S. 35 sind für die chemischen Elemente die spezif. Gew. zusammengestellt.

Man findet hier sehr große Unterschiede in dem spezif. Verhalten. Von (bei $-259^0$) verfestigtem Wasserstoffe, der sehr leicht ist ($\bar{s} = 0{,}0763$) und den Leichtmetallen Li ($\bar{s} = 0{,}59$), K (0,86), Na (0,97), die noch sämtlich spezif. leichter als

Wasser sind, erhebt sich das spezif. Gew. bei den Schwermetallen der Platingruppe über 20 (Pt 21,5; Ir 22,42) und erreicht beim Osmium seinen höchsten Wert (22,48).

**25. Kalibrieren.** Um den Rauminhalt von Meßgefäßen, Pyknometern, Pipetten, Büretten, Eudiometern oder das Kaliber von engen Röhren, „Kapillarröhren", zu bestimmen, verfährt man zweckmäßig in der Weise, daß man die Hohlräume mit Quecksilber ausfüllt, dieses wägt und nach (8) S. 26 aus $G$ und dem bekannten spezif. Gew. $\bar{s}$ des Hg (vgl. § 24, S. 31) das Volumen berechnet.

Versuch 8. Um z. B. den Querschnitt eines Kapillarrohres zu messen, saugt man aus einem Schälchen mit reinem Quecksilber, in das man ein Ende des schwach geneigten Rohres eintaucht, mittels eines durch Gummischlauch aufgesteckten Glasmundstückes einen Quecksilberfaden von größerer Länge ein. Um diese Länge zu messen, legt man das Rohr horizontal auf eine Skala, wobei man senkrecht an dem Fadenende vorbei die Skala anzufixieren hat. Um dies zu erleichtern, benutzt man eine auf Spiegelglas geteilte Skala, „Spiegelskala", oder in Ermangelung einer solchen legt man, wie in Fig. 8 angedeutet ist, die Röhre $RR$ auf eine Glasskala $SS$, die auf einer schwarzen Unterlage $UU$ liegt. Blickt man dann senkrecht von $O$ her an dem Fadenende vorbei gegen die Skala, so deckt sich das Spiegelbild des Auges mit dem Fadenende. Würde man von $O'$ her blicken, so würde der Faden zu kurz, würde das Auge bei $O''$ stehen, zu lang erscheinen. In dieser Weise vermeidet man „Parallaxenfehler" beim Ablesen.

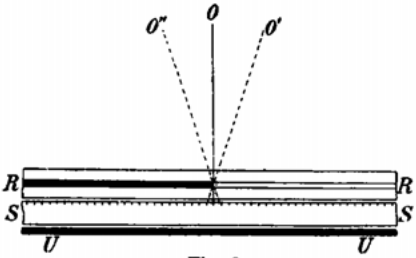

Fig. 8.

Nach der Längenmessung wird das Quecksilber in ein auf der Wage austariertes Schälchen ausgegossen und gewogen. Aus dem Gewichte $G$ und dem spezif. Gew. $\bar{s}$ des Hg ergibt sich das Volumen $V = G/\bar{s}$ und aus diesem und der Fadenlänge $l$ der Röhrenquerschnitt oder das „Kaliber" $q = V/l$.

Aufgabe 21. Eine Kapillarröhre wurde in der angegebenen Weise mit Quecksilber gefüllt und der Faden an verschiedene Stellen der Röhre hingebracht. An einem Ende der Röhre zeigte der Faden 22,83, in der Mitte 22,92, am anderen Ende 23,02 cm Länge. Das Rohr war also nicht völlig kalibrisch, sondern am ersterwähnten Ende weiter als in der Mitte und am anderen Ende. Nach dem Ausgießen ergab sich ein Quecksilbergewicht von 4,42 g. Wie groß ist der mittlere Querschnitt des Kapillarrohres?

$V = 4{,}42/13{,}59 = 0{,}326\ \text{cm}^3$, $q = V/l = 0{,}326/22{,}92 = 0{,}0142\ \text{cm}^2 = 1{,}42\ \text{mm}^2$.

**26. Atomgewicht.** In § 22, S. 24 ist uns zum erstenmal eine Materialkonstante entgegengetreten, das spezif. Vol. $\bar{v}$, welches wir auf die Gewichtseinheit g oder kg bezogen haben. Diese Einheit ist von uns willkürlich festgesetzt worden. Wir dürfen uns daher nicht wundern, wenn uns einfache und allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten aus den entsprechenden Zahlen zunächst nicht entgegentreten. Es wird hier und in allen folgenden, ähnlich liegenden Fällen viel zweckmäßiger sein, wenn wir die spezif. Konstanten nicht auf 1 g oder 1 kg beziehen, sondern auf diejenigen Gewichtsmengen, die von der Natur selbst als für die einzelnen Substanzen charakteristisch betont werden.

Der chemischen Forschung ist der Nachweis gelungen, daß die unermeßliche Fülle von stofflichen Einzelerscheinungen, in welcher uns die Materie entgegentritt, aufgebaut gedacht werden kann aus einer verhältnismäßig kleinen Anzahl von sog. Grundstoffen oder „Elementen".

Jede bedeutsame Naturerkenntnis hat aber nicht nur eine qualitative, sondern vor allem auch eine quantitative Seite: Die verschiedenen Elemente treten nach ganz bestimmten Gewichtsverhältnissen zu den chemischen Verbindungen zusammen (Synthese), und werden wieder in diesen Verhältnissen aus den Verbindungen erhalten (Analyse): Gesetz der Konstanz der Verbindungsgewichte (Proust 1804).

So treten 23 Gewichtsteile Natrium, diese in irgendwelchem Maße ausgedrückt, mit 35,5 Gewichtsteilen Chlor — nicht mit weniger, aber auch nicht mit mehr Gewichtsteilen — zu 58,5 Gewichtsteilen Chlornatrium oder Kochsalz zusammen. (Wir rechnen hier und im folgenden immer mit den abgerundeten Zahlen.) Setzen wir Natrium mit Brom zu Bromnatrium zusammen, so sind es wieder 23 Gewichtsteile Natrium, die sich jetzt aber mit 80 Gewichtsteilen zu 103 Gewichtsteilen des in ähnlicher Form wie das Chlornatrium kristallisierenden Salzes Bromnatrium zusammenfügen; mit Jod gehen wieder 23 Gewichtsteile Natrium, diesmal mit 127 Gewichtsteilen zu 150 Gewichtsteilen Jodnatrium zusammen. Während also 23 das für Natrium charakteristische „Verbindungsgewicht" ist, sind 35,5, 80, 127 für die Gruppe der Elemente: Chlor, Brom, Jod, die einander chemisch verwandt sind, und die man unter dem Namen der „Salzbildner" oder „Halogene" zusammenfaßt, charakteristisch. Betrachten wir die Silbersalze, so treten wieder 35,5 Teile Chlor, oder aber 80 Brom, oder aber 127 Jod diesmal genau mit 108 Gewichtsteilen des Metalles Silber zu den in der Photographie so wichtigen Silbersalzen $AgCl$, $AgBr$, $AgJ$ zusammen.

Verschiedene Elemente können aber auch in ganzzahligen Vielfachen ihrer Verbindungsgewichte zu chemischen Verbindungen zusammentreten: Gesetz der konstanten oder der multiplen Proportionen.

So können 16 Gewichtsteile Sauerstoff mit 12 Teilen Kohlenstoff zu 28 Gewichtsteilen Kohlenoxydgas, oder aber auch $2 \cdot 16$ oder 32 Gewichtsteile Sauerstoff mit 12 Teilen Kohlenstoff zu 44 Gewichtsteilen des chemisch und physikalisch vollkommen anders sich verhaltenden Kohlendioxydgases (der „Kohlensäure") sich vereinigen.

Die Verbindungsgewichte sind nur Relativzahlen; sie erhalten eine bestimmte Größe erst dann, wenn wir eine bestimmte Einheit zugrunde legen. Für die chemische Analyse ist es am bequemsten gefunden worden, wenn man Sauerstoff (Oxygenium) $O = 16{,}000$ setzt.

Daneben ist freilich auch eine andere Berechnungsweise vielfach gebräuchlich, die man erhält, wenn man das Verbindungsgewicht desjenigen Elementes, welches in kleinster Gewichtsmenge in chemische Verbindungen einzutreten vermag, des Wasserstoffes (Hydrogenium) $H = 1{,}000$ setzt. Bei der Festsetzung $O = 16{,}000$ wird das Verbindungsgewicht des Wasserstoffes $= 1{,}008$.

Um ein anschauliches Bild von dieser wunderbaren Gesetzmäßigkeit der Konstanz der Verbindungsgewichte zu erhalten, stellte John Dalton (1808) die Arbeitshypothese auf, daß alle Körper aus sehr kleinen, räumlich voneinander getrennten Massenteilchen zusammengesetzt sind, die als selbständige Individuen in den chemischen Verbindungen zusammentreten und aus diesen bei der Trennung der Verbindungen unversehrt wieder hervorgehen. Er nannte sie in Anlehnung an ähnliche Vorstellungen älterer, griechischer Philosophen: „Atome". Die Atome desselben Elementes sind nach dieser Vorstellung untereinander vollkommen gleichartig, insbesondere auch von gleicher Größe und demselben Gewichte. Aber die Atome verschiedener Elemente unterscheiden sich sowohl durch ihren Bau, ihre Größe, ihr Gewicht und ihre sonstigen chemischen und physikalischen Eigenschaften voneinander, doch so, daß ihre Verbindungsgewichte ähnlich einfache Verhältnisse aufweisen, wie die Gewichte der Atome selbst. In diesem Sinne spricht man dann auch von „Atomgewichten".

Das Gewicht des einzelnen Atoms ist sehr klein. Wir können es aus später zu betrachtenden Beziehungen angenähert berechnen. Hier handelt es sich zunächst wieder nur um Relativzahlen. Wenn wir dem Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, Natrium, Chlor usw. die „Atomgewichte" 1, 12, 16, 23, 35,5 zuweisen, so soll das nur heißen, die Atome dieser Elemente zeigen Gewichte, die sich wie 1 : 12 : 16 : 23 : 35,5 usw. verhalten. Mit diesen oder einfachen Vielfachen derselben treten sie miteinander in den Verbindungen auf und es gibt ebenso viele Arten von Atomen mit ihren charakteristischen „Atomgewichten", als es verschiedene, zunächst nicht weiter zerlegbare Stoffe, chemische Elemente gibt.

Die Tabelle S. 35 enthält die wichtigsten chemischen Elemente alphabetisch angeordnet mit ihren chemischen Symbolen. Diese bezeichnen nicht nur das betr. Element, sondern zugleich diejenige Menge desselben, mit denen es in die chemischen Verbindungen eintritt.

So bedeutet Al die Menge von 27,1 Gewichtsteilen des Metalles Aluminium, $Sb = 120{,}2$ Gewichtsteile Antimon (Stibium) usw., und zwar, wenn das Verbindungsgewicht des Sauerstoffes $O = 16{,}00$ gesetzt wird.

**Tabelle der abgerundeten Atomgewichte, spezif. Gewichte und Atomvolumen der chemischen Elemente.**

| Name des Elementes | Symbol | Atomgewicht | Spezif. Gewicht | Atomvolumen |
|---|---|---|---|---|
| Aluminium | Al | 27,1 | 2,56 | 10,6 |
| Antimon | Sb | 120,2 | 6,7 | 18,0 |
| Argon | Ar | 39,9 | 1,21 | — |
| Arsen | As | 75,0 | 5,67 | 13,2 |
| Baryum | Ba | 137,37 | 3,75 | 36,6 |
| Beryllium | Be | 9,1 | 1,85 | 4,9 |
| Blei | Pb | 207,10 | 11,38 | 18,2 |
| Bor | B | 11,0 | 2,68 | 4,1 |
| Brom | Br | 79,92 | 2,97 | 26,9 |
| Cadmium | Cd | 112,40 | 8,65 | 13,0 |
| Calcium | Ca | 40,09 | 1,57 | 26,0 |
| Cäsium | Cs | 132,81 | 1,88 | 70,6 |
| Cerium | Ce | 140,25 | 6,7 | 20,9 |
| Chlor | Cl | 35,46 | 1,51 | 23,5 |
| Chrom | Cr | 52,1 | 6,8 | 7,7 |
| Eisen | Fe | 55,85 | 7,8 | 7,2 |
| Erbium | Er | 167,4 | 4,8 | 34,9 |
| Fluor | F | 19,0 | 1,11 | 17,1 |
| Gadolinium | Gd | 156 | — | — |
| Gallium | Ga | 69,9 | 5,96 | 11,7 |
| Germanium | Ge | 72,5 | 5,47 | 13,3 |
| Gold | Au | 197,2 | 19,3 | 10,2 |
| Helium | He | 4,0 | — | — |
| Indium | In | 114,8 | 7,42 | 15,5 |
| Iridium | Ir | 193,1 | 22,42 | 8,6 |
| Jod | J | 126,92 | 4,94 | 25,7 |
| Kalium | K | 39,10 | 0,86 | 45,5 |
| Kobalt | Co | 58.97 | 8,5 | 6,9 |
| Kohlenstoff | C | 12,00 | 3,3 | 3,6 |
| Krypton | Kr | 81,8 | 2,1 | — |
| Kupfer | Cu | 63,57 | 8,9 | 7,1 |
| Lanthan | La | 139,0 | 6,2 | 22,4 |
| Lithium | Li | 7,00 | 0,59 | 11,9 |
| Magnesium | Mg | 24,32 | 1,74 | 14,0 |
| Mangan | Mn | 54,93 | 8,0 | 6,9 |
| Molybdän | Mo | 96,0 | 8,6 | 11,2 |
| Natrium | Na | 23,00 | 0,97 | 23,7 |
| Neodymium | Nd | 144,3 | 6,96 | 20,7 |
| Neon | Ne | 20 | — | — |
| Nickel | Ni | 58,68 | 8,8 | 6,7 |
| Niobium | Nb | 93,5 | 7,06 | 13,2 |
| Osmium | Os | 190,9 | 22,48 | 8,5 |
| Palladium | Pd | 106, 7 | 11,5 | 9,3 |
| Phosphor | P | 31,0 | 2,3 | 13,5 |
| Platin | Pt | 195,0 | 21,5 | 9,1 |
| Praseodym | Pr | 140 | — | — |
| Quecksilber | Hg | 200,0 | 13,59 | 14,7 |
| Radium | Ra | 226,4 | — | — |

| Name des Elementes | Symbol | Atomgewicht | Spezif. Gewicht | Atomvolumen |
|---|---|---|---|---|
| Rhodium | Rh | 102,9 | 12,1 | 8,5 |
| Rubidium | Rb | 85,45 | 1,52 | 56,2 |
| Ruthenium | Ru | 101,7 | 12,26 | 8,3 |
| Samarium | Sa | 150 | 7,7 | 19,5 |
| Sauerstoff | O | 16,00 | 1,27 | 12,6 |
| Scandium | Sc | 44 | — | — |
| Schwefel | S | 32,07 | 2,04 | 15,7 |
| Selen | Se | 79,2 | 4,6 | 17,2 |
| Silber | Ag | 107,88 | 10,5 | 10,3 |
| Silicium | Si | 28,3 | 2,49 | 11,4 |
| Stickstoff | N | 14,01 | 1,1 | 12,7 |
| Strontium | Sr | 87,62 | 2,5 | 35,0 |
| Tantal | Ta | 181,0 | 10,8 | 16,8 |
| Tellur | Te | 127,5 | 6,25 | 20,4 |
| Terbium | Tb | 160 | — | — |
| Thallium | Tl | 204,0 | 11,86 | 17,2 |
| Thorium | Th | 232,42 | 11,1 | 21,1 |
| Thulium | Tu | 171 | — | — |
| Titan | Ti | 48,1 | 3,54 | 13,6 |
| Uran | U | 238,5 | 18,69 | 12,7 |
| Vanadin | V | 51,2 | 5,5 | 9,3 |
| Wasserstoff | H | 1,008 | 0,076 | 11,6 |
| Wismut | Bi | 208,0 | 9,82 | 21,2 |
| Wolfram | W | 184,0 | 19,13 | 9,6 |
| Xenon | X | 128 | 3,5 | — |
| Ytterbium | Yb | 173 | — | — |
| Yttrium | Y | 89 | 3,8 | 23,4 |
| Zink | Zn | 65,37 | 7,15 | 9,1 |
| Zinn | Sn | 119,0 | 7,29 | 16,3 |
| Zirkonium | Zr | 90,6 | 4,15 | 21,8 |

Die durch Addition der den konstituierenden Atomen zukommenden Atomgewichte für die Verbindungen erhaltenen entsprechenden Gewichtszahlen nennt man ihre „Molekulargewichte“.

58,5 war also das Molekulargewicht des NaCl, des Kochsalzes usw.

**27. Spiralanordnung der chemischen Elemente.** Ein Blick auf die Atomgewichtstabelle S. 35 läßt zunächst gar keine Gesetzmäßigkeit zwischen den Relativgewichten der nach der Atomhypothese kleinsten Bausteine der Materie erkennen. Und doch treten solche sofort hervor, wenn wir chemisch analog sich verhaltende Elemente herausgreifen.

Betrachten wir z. B. die „Halogene“ Cl = 35,5, Br = 80, J = 127, so bemerken wir, daß ihre Atomgewichte Differenzen 80 — 35,5 = 44,5 und 127 — 80 = 47 aufweisen, die nicht allzuweit auseinanderliegen. Desgleichen scheinen die Atomgewichte der „Alkalimetalle“ Li = 7, Na = 7 + 16 = 23, K = 7 + 2 · 16 = 39 so aufgebaut zu sein, daß sich um einen Grundkern verschiedene Gruppierungen (Ringe?) höherer Gewichte herumlegen. Die Erdalkalimetalle Ca = 40, Sr = 40 + 48

= 88, Ba = 88 + 50 = 138 zeigen wiederum einen nahezu konstanten Zuwachs ihrer Atomgewichte, wenn wir von einem Gliede der Reihe zum nächsthöheren übergehen.

Schon verhältnismäßig früh wurde man auf die eigentümliche Erscheinung aufmerksam, daß man wieder zu chemisch analog sich verhaltenden Stoffen gelangt, wenn man in der nach ihren Atomgewichten geordneten Reihe der chemischen Elemente um eine bestimmte Anzahl von Elementen weiter schreitet. Freilich mußte man dabei zunächst noch manche Lücken mit in Kauf nehmen, die aber durch weitere Forschungen immer mehr durch neu entdeckte Elemente, die an die noch offenen Plätze paßten, ausgefüllt wurden. Eine solche „Zehnerregel" wird am besten (nach H. Erdmann) in der folgenden Weise graphisch erläutert (Fig. 9):

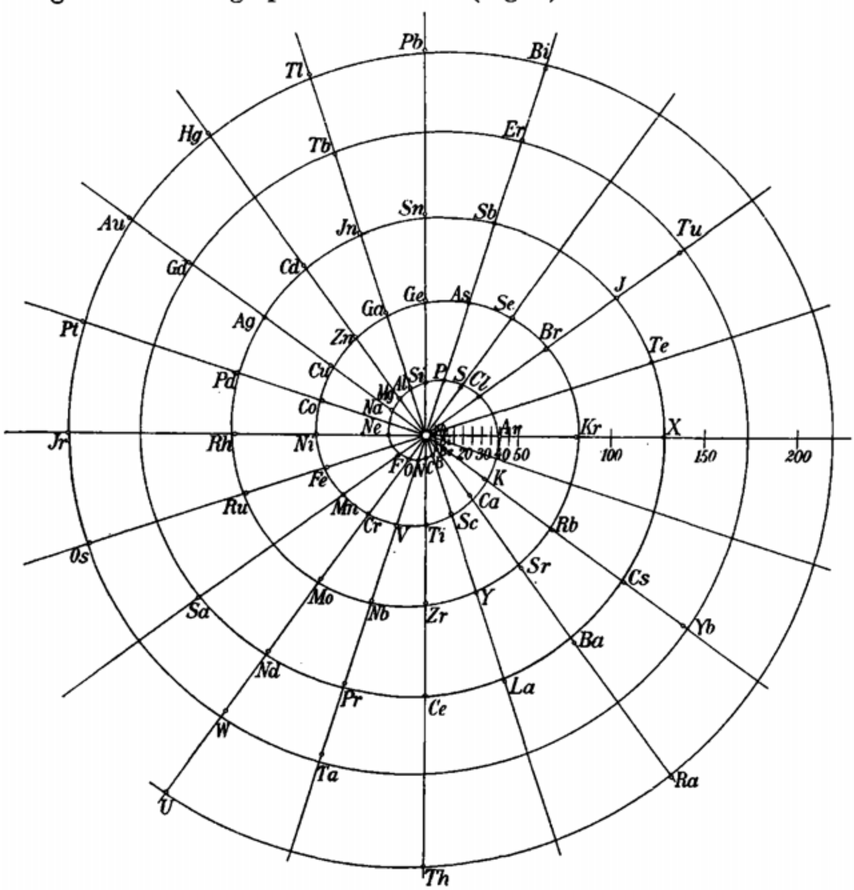


Fig. 9.

Durch einen Punkt der Zeichenebene werden 10, gleiche Winkel miteinander bildende, ganze Strahlen oder 20 Halbstrahlen hindurchgelegt. Auf diesen werden der Reihe nach Längen in irgendeinem Maßstabe aufgetragen, welche den Atomgewichten der aufeinanderfolgenden Elemente entsprechen, also etwa auf einem schräg nach unten gehenden Halbstrahle eine Länge von 7 Einheiten, dem Lithium, Li = 7 entsprechend, dann eine solche von 9 Einheiten dem Beryllium, Be = 9, dann eine solche dem Bor, B = 11, dem Kohlenstoff, C = 12 usw. entsprechende. Verbindet man alle so erhaltenen Punkte, so ergibt sich eine Spirale, welche sich immer weiter und weiter öffnet.

Blicken wir irgendeinem Aste, etwa dem schräg nach oben führenden, entlang, so bemerken wir hier die halogenen Elemente: Chlor, Brom, Jod; auf dem entsprechenden nach rechts unten gehenden Aste die aufeinanderfolgenden Alkalimetalle: Li, K, Rb, Cs, auf dem folgenden die Erdalkalimetalle; Ca, Sr, Ba; den Alkalimetallen gegenüber die ihnen verwandte Nebenserie: Na, Cu, Ag, Gd und Au und auf dem horizontalen Aste steht links das Neon, rechts Helium, Argon, Krypton, Xenon, die in der Luft vorkommenden sog. „Edelgase" usw.

Dies sind alles Elemente, welche in chemischer Beziehung eine nähere Verwandtschaft zueinander zeigen, welche zu einer Haupt- und Nebengruppe gehören. Die Lücken deuten an, daß wir noch nicht alle Elemente kennen, sie zeigen aber auch, wo wir solche zu vermuten haben; aus ihrer Stellung in dem System vermögen wir sogar, wenigstens angenähert, zu entnehmen, welche chemischen Eigenschaften bei ihnen zu erwarten sind. So füllt jetzt das Radium, ein in chemischer Hinsicht den Erdalkalien Ca, Sr, Ba nahestehendes Element, mit seinem Atomgewichte 226 den äußersten Platz auf dem nach rechts unten gehenden Strahle aus.

Die Figur zeigt, daß chemisch verwandte Elemente in der Spiralanordnung geometrisch entsprechende Punkte einnehmen, und daß wir beim Fortschreiten um eine gewisse Periode, um eine bestimmte Größe im Atomgewichte, wieder auf chemisch analog sich verhaltende Substanzen kommen.

Wir erhalten hier eine erste Andeutung dafür, daß die „Atome" in gesetzmäßiger Weise aus noch einfacheren Bestandteilen zusammengesetzt sein müssen. Die Art des Aufbaues ist dann für ihre chemischen Eigenschaften maßgebend. Die Elemente mit den kleinsten Atomgewichten Wasserstoff, H = 1, Helium, He = 4 usw. sind von einfachstem Baue, diejenigen mit den hohen und höchsten Atomgewichten, z. B. Uran, U = 238, Thorium, Th = 232, Ra = 226, sind von kompliziertem Baue zu denken. Es sind dies drei „radioaktive" Elemente. Nach der „Atomzerfallshypothese" von Rutherford ist die Radioaktivität ein Erscheinungskomplex, der den Zerfall von Atomen begleitet. Wir können uns wohl vorstellen, daß komplizierte Atomgebäude leichter instabil werden und dann zerfallen, als einfachere und darum leichtere und stabilere.

**28. Valenzbegriff.** Wenn man die Verbindungen der chemischen Elemente mit dem leichtesten und darum nach dem vorigen einfachsten Atom, dem Wasserstoffatom, betrachtet, so fällt auf, daß gewisse Elemente nur ein, andere zwei, wieder andere drei und mehr dieser Atome an sich zu ketten vermögen.

Wir erhalten dabei etwa die folgende Übersicht:

Halogene: $HF$, $HCl$, $HBr$, $HJ$.
Sauerstoffgruppe: $H_2O$, $H_2S$, $H_2Se$, $H_2Te$.
Stickstoffgruppe: $H_3N$, $H_3As$, $H_3Sb$, usw.

Nimmt man daher den Wasserstoff als den Maßstab, nach dem man das Verbindungsvermögen der verschiedenen Elemente beurteilt, so kann man die Halogene als „einwertig", die Elemente der Sauerstoffgruppe als „zweiwertig", die der Stickstoffgruppe als „dreiwertig" usw. bezeichnen.

Es ist so, als ob die Elemente verschiedene „Haftstellen" hätten, an denen sie andere Elemente festzuhalten vermögen. Namentlich in der organischen Chemie spielt diese Vorstellung eine große Rolle. Welche Bedeutung sie für das Verständnis der elektrochemischen Prozesse hat, werden wir später betrachten.

Man spricht in diesem Sinne von einer „Wertigkeit" der chemischen Elemente oder kurz von ihrer „Valenz". Es gibt also Elemente mit gerader und solche mit ungerader Valenz.

Die Valenz eines Elementes ist keine vollkommen feststehende Größe. So kann sich Stickstoff bald mit drei, bald mit fünf Valenzen betätigen. Immerhin scheint die Valenz eine mit dem Bau eines Atoms aufs innigste zusammenhängende Größe zu sein. Ordnet man die Elemente in solche mit gerader und solche mit ungerader Valenz, so zeigen die Atomgewichte (wenigstens angenähert) eine auffallend einfache Beziehung zur Zahl 4, dem Atomgewichte des Heliums (He = 4) („Viererregel"), wie die folgende Tabelle unmittelbar erkennen läßt:

Elemente mit gerader Valenz (gerader Ordnungszahl M)
Atomgewicht: $A = 2M$.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $M =$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 |
| $A =$ | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 | 64 | 68 | 72 | 76 | 80 |
| Elemente: | He | Be | C | O | Ne | Mg | Si | S | Ar | Ca | | Ti | Cr | Fe | Co | Zn | | Ge | Se | Kr |

Elemente mit ungerader Valenz (ungerader Ordnungszahl $M$)
Atomgewicht: $A = 2M + 1$.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $M =$ | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | 33 | 35 | 37 | 39 |
| $A =$ | 3 | 7 | 11 | 15 | 19 | 23 | 27 | 31 | 35 | 39 | 43 | 47 | 51 | 55 | 59 | 63 | 67 | 71 | 75 | 79 |
| Elemente: | | Li | B | N | F | Na | Al | P | Cl | K | Sc | | V | Mn | Ni | Cu | | Ga | As | Br |

Wenn sich nun andererseits zeigt, daß beim Zerfalle radioaktiver Stoffe, auch solcher, an deren Natur als chemische Elemente, wie U, Th und Ra niemand zweifelt, Heliumgas frei wird, so liegt die Vermutung nahe, daß auch dieser, wenn auch nur angenähert zutreffenden Regel eine tiefere Bedeutung innewohnt.

**29. Atomvolumen.** Bezieht man die „Räumlichkeit“ oder das spezif. Vol. (22) $\bar{v}$ der festen chemischen Elemente auf das Atomgewicht $A$, so erhält man das Atomvolumen:

$$v_{At} = \bar{v} \cdot A = A/\bar{s}\,. \tag{10}$$

Man versteht darunter die relative Raumerfüllung des betreffenden Elementes, berechnet für eine seinem Atomgewichte proportionale Gewichtsmenge und erhält diese Größe, wenn man das Atomgewicht durch das spezif. Gew. dividiert.

Man findet hier wiederum nur Relativzahlen, $v_{At}$ stellt nicht etwa das Volumen der Atome selbst dar, sondern nur Zahlen, die sich verhalten wie die Raumerfüllung bei den verschiedenen Grundstoffen. Immerhin sind sie namentlich für den Chemiker von größter Bedeutung.

Aufgabe 22. Man berechne für die chemischen Elemente, deren spezif. Gew. $\bar{s}$ in den Aufgaben 9—20 ermittelt wurde, die Atomvolumina.

Man findet nach den Atomgewichten geordnet für Natrium (Na = 23) 23,7; Magnesium (Mg = 24) 13,4; Aluminium (Al = 27) 10,3; Schwefel (S = 32) 16,3; Kalium (K = 39) 44,5; Eisen (Fe = 56) 7,2; Kupfer (Cu = 64) 7,2; Zink (Zn = 65) 9,1; Quecksilber (Hg = 200) 14,7; Wismut (Bi = 208) 21,4.

Genauere Werte für chemisch reine Präparate findet man in der Tabelle S. 35. Man sieht, daß die Räumlichkeit durchaus nicht mit dem Atomgewichte wächst; auffallend sind die großen Werte für die Alkalimetalle Na und K. Eine völlig klare Übersicht bietet erst eine graphische Darstellung.

**30. Koordinatendarstellung.** Schneidet man von einem beliebig gewählten Anfangspunkte aus auf einer Horizontalen (Fig. 10) Stücke ab, welche den Atomgewichten entsprechen (abscindere = abschneiden, daher „Abszissenaxe“), und ordnet man den einzelnen, den verschiedenen Elementen entsprechenden Punkten vertikale Stücke zu, die sich wie die Atomvolumina verhalten (ordinare = zuordnen, daher „Ordinatenrichtung“ für die Vertikale), so erhält man eine Punktreihe, die man durch einen Kurvenzug verbinden kann. Dieser ist charakteristisch für die Art der Zuordnung der beiden Größen $A$ und $v_{At}$, der „Koordinaten“.

Von einer derartigen Koordinatendarstellung in einem „Koordinatensystem“ werden wir häufig Gebrauch machen. Denn nichts erläutert die Beziehung zweier voneinander in ihrem Zahlenwerte „abhängigen“ Größen („Variablen“) besser, als eine solche „graphische Darstellung“. So lesen wir z. B. aus der Fig. 10 unmittelbar ab: Die Räumlichkeit der chemischen Elemente schwankt periodisch auf und ab mit gleichmäßig fortschreitendem Atomgewichte, $v_{At}$ ist eine „periodische Funktion“ des Atomgewichtes $A$.

**31. Das periodische System der chemischen Elemente** (nach Mendelejeff und Lothar Meyer). Betrachtet man die Kurvendarstellung Fig. 10 genauer, so erkennt man: Chemisch einander ent-

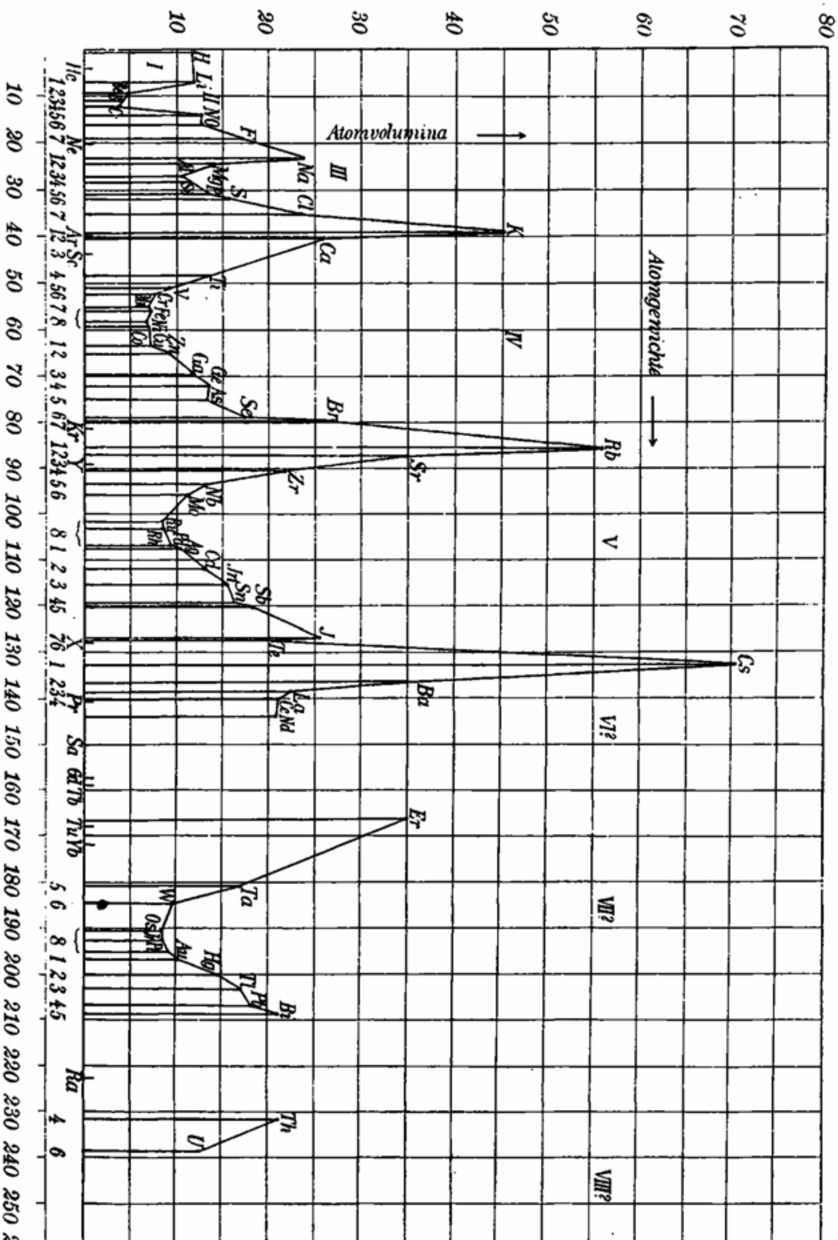
Atomvolumina
Atomgewichte
I
II
III
IV
V
VI?
VII?
VIII?
H
Li
He
Ne
Na
Cl
K
Ar
Ca
Sc
Ti
V
Ga
Ge
As
Se
Br
Kr
Rb
Sr
Y
Zr
Nb
Mo
Rh
Cd
Sn
Sb
J
X
Te
Cs
Ba
La
Pr
Sa
Er
Ta
W
Au
Hg
Tl
Pb
Bi
Ra
Th
U

Fig. 10.

sprechende Elemente liegen an geometrisch entsprechenden Punkten, die Alkalimetalle z. B. an den Spitzen, die Halogene an den aufsteigenden, die Erdalkalien an den absteigenden Ästen usw. Unterhalb der Abszissenaxe sind die Valenzen (28) der darüberstehenden Elemente angegeben; man sieht, daß auch diese in eine große Regelmäßigkeit gebracht sind. Durch die einzelnen Kurvenäste, von denen uns allerdings mindestens noch zwei fehlen, wird die Gesamtschaar der Elemente in verschiedene „natürliche Gruppen" unterteilt, in denen die einzelnen Glieder einander entsprechen. Der Umstand, daß das chemische Verhalten der einzelnen Stoffe durch die Raumausbreitung ihrer kleinsten Bausteine, ihrer Atome, gekennzeichnet wird, zeigt wieder, daß die Atome nicht einfache Klumpen von Materie sein können, sondern äußerst feingegliederte Systeme von merkwürdig gesetzmäßiger Architektur sein müssen.

Wir werden hierauf besonders noch in der Lehre von den Schwingungen in diesen Gebilden, bei Besprechung der „Serien ihrer Spektrallinien" zurückkommen.

**32. Molekularvolumen.** Bei chemischen Verbindungen werden zweckmäßig die spezif. Größen auf Gewichtsmengen bezogen, welche den Molekulargewichten $M$ entsprechen. Man nennt solche Mengen „molekulare Mengen" oder kurz 1 Mol.

So ist ein Mol Kochsalz (NaCl): $23 + 35{,}5 = 58{,}5$ g; 1 Mol Wasserdampf ($H_2O$) wäre die Menge von $2 \times 1 + 16 = 18$ g.

Die Raumerfüllung durch 1 Mol einer chemischen Verbindung nennen wir ihr Molekularvolumen:

$$v_{\text{Mol}} = \bar{v} \cdot M = M/\bar{s}\,. \tag{11}$$

Man erhält also das Molekularvolumen, wenn man das Molekulargewicht $M$ der Verbindung durch ihr spezif. Gew. $\bar{s}$ dividiert.

Aufgabe 23. Stückchen von Bleiglanz (Bleisulfid, PbS, $M = 207 + 32 = 239$) ergaben nach der Pyknometermethode (S. 27) $\bar{s} = 7{,}2$; Stückchen von Zinkblende (Zinksulfid, ZnS, $M = 65{,}4 + 32 = 97{,}4$) dagegen $\bar{s} = 3{,}9$. Wie groß ist das Molekularvolumen beider Verbindungen?

Man erhält für PbS: $v_{\text{Mol}} = 33{,}2$; für ZnS: $v_{\text{Mol}} = 25{,}0$.

Die Molekularvolumina vieler chemischer Verbindungen sind sehr nahe gleich der Summe der Atomvolumina der in ihnen enthaltenen chemischen Elemente. Eine derartige Eigenschaft nennt man eine additive Eigenschaft.

So ergeben sich für PbS und ZnS aus der Tabelle S. 35 als Summe der relativen Volumina der in ihnen enthaltenen Atome $18{,}2 + 15{,}7 = 33{,}9$ bzw. $9{,}1 + 15{,}7 = 24{,}8$, was mit den oben direkt gefundenen Zahlen ziemlich gut übereinstimmt.

Vielfach ist das Molekularvolumen aber auch kleiner als die Summe der Atomvolumina. Man sagt, daß dann „Kondensation" eingetreten sei. Gerade diese Abweichungen vom rein additiven Verhalten sind für den Chemiker sehr wichtig, weil sie ihm Fingerzeige über Eigentümlichkeiten der Bindungsverhältnisse geben.

**33. Molekularvolumina der Gase.** Durch die ganze Physik hindurch wird sich die Erkenntnis bewahrheiten, daß die Materie ganz besonders einfache, aber darum auch ganz hervorragend beachtenswerte Eigenschaften zeigt, wenn sie uns in der Gasform entgegentritt.

Dies hängt offenbar damit zusammen, daß hier die einzelnen materiellen Bausteine, die Moleküle, im Durchschnitt durch große Räume voneinander getrennt sind, wenn sie dazwischen auch mannigfach miteinander kollidieren und an die Wände anprallen.

In der folgenden Tabelle sind zunächst die spezif. Gew. (in g/l) und die spezif. Vol. (in l/g) sowie die Molekulargewichte einiger der wichtigsten Gase angeführt.

**Tabelle der Molekularvolumina der Gase**
bei 0° Temperatur und 760 mm Druck.

| | | $\bar{v}$ pro g | $M$ | $v_{Mol}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 l Wasserstoff $H_2$ | wiegt: 0,08988 g | 11,13 l | 2 | 22,3 l |
| 1 „ Sauerstoff $O_2$ | „ 1,4291 „ | 0,6998 „ | 32 | 22,4 „ |
| 1 „ Stickstoff $N_2$ | „ 1,2507 „ | 0,7995 „ | 28 | 22,4 „ |
| 1 „ Kohlenoxyd $CO$ | „ 1,2507 „ | 0,7995 „ | 28 | 22,4 „ |
| 1 „ Grubengas $CH_4$ | „ 0,7146 „ | 1,399 „ | 16 | 22,4 „ |
| 1 „ Ammoniak $NH_3$ | „ 0,7621 „ | 1,312 „ | 17 | 22,3 „ |

Die Raumerfüllung der Gase wird auf das merklichste durch Temperatur- und Druckbedingungen beeinflußt, so daß die über der Tabelle stehenden, einen gewissen „Normalzustand" darstellenden Zusätze zu beachten sind.

Die Chemie lehrt, daß bei den drei zuerst angeführten einfachen Gasen nicht die Atome selbst durch den Gasraum fliegen, sondern immer Paare solcher Atome, welche vielleicht durch elektrische Kräfte zu „zweiatomigen Molekülen" zusammengehalten werden. Daher ist für Wasserstoff $H_2$, für Sauerstoff $O_2$, für Stickstoff $N_2$ zu schreiben. Die Kolonne der spezif. Vol. läßt noch keine einfachen Gesetzmäßigkeiten erkennen, sie zeigt etwa nur, welch enormen Raum Wasserstoff erfordert, wenn nur 1 g unter den obengenannten Bedingungen untergebracht werden soll.

Auffallend ist das Ergebnis der Multiplikation von spezif. Vol. und Molekulargewicht. Gasvolumina, welche sich auf Mols der betreffenden Substanz beziehen, zeigen das denkbar einfachste Gesetz, das der Konstanz: die Molekularvolumina der Gase sind einander gleich, nach den neuesten Bestimmungen im Mittel gleich 22,43 l pro Mol. Das gleiche gilt für die überhitzten Dämpfe oder die sog. „Heißdämpfe".

Es wird sich daher auch für später empfehlen, immer Gas- und Dampfvolumina zueinander in Beziehung zu setzen, welche sich auf die molekularen Mengen oder die Mols der betreffenden Gase beziehen.

Aufgabe 24. Das spezif. Vol. und das spezif. Gew. des Chlorgases (unter den Normalbedingungen) werde berechnet.

Cl hat nach der Tabelle S. 35 das Atomgewicht 35,46, das Chlorgas also das Mol.-Gew. 70,92. Da auch hier $M/\bar{s} = 22{,}43$ sein muß, so ist $\bar{s} = 3{,}16$ g/l und $\bar{v} = 0{,}316$ l/g.

**34. Das Avogadrosche Gesetz.** Den im vorhergehenden gewonnenen Erfahrungssatz kann man auch noch anders aussprechen. Da für alle Gase (und Heißdämpfe) nach § 33:

$$v_{\text{Mol}} = M/\bar{s} = \text{Konst.} = 22{,}43 \tag{12}$$

ist, so heißt das: Die Molekulargewichte von Gasen (und Heißdämpfen) verhalten sich wie ihre spezif. Gew.

Da sich zeigt, daß Gase und Heißdämpfe in gleicher Weise ihr Volumen ändern, wenn Druck und Temperatur wechseln, so gilt dieser Satz ganz allgemein für jede Druckstufe und jedes Temperaturniveau, bei dem die Gase, bzw. Dämpfe miteinander verglichen werden.

Kennt man also von irgendeinem Gase das Molekulargewicht, z. B. von $H_2 = 2$ oder $O_2 = 32$, so braucht man nur das Verhältnis der Eigengewichte eines anderen Gases oder Heißdampfes in bezug auf dieses Gas festzustellen, um sein Molekulargewicht berechnen zu können. Dies ist für den Chemiker von höchster Wichtigkeit, da er hieraus Einblick in den Molekularbau der gasförmigen Körper gewinnt.

Hierzu werden die „Gas- oder Dampfdichtebestimmungen" (vgl. später in Kapitel 12) herangezogen.

Aufgabe 25. Diäthylätherdampf (Dampf des sog. „Schwefeläthers") wird 37mal schwerer als Wasserstoffgas von derselben Temperatur beim gleichen Drucke gefunden. Wie groß ist sein Molekulargewicht?

Nach dem Avogadroschen Satze berechnet sich dasselbe zu $2 \times 37 = 74$. In der Tat, aus der chemischen Formel $O(C_2H_5)_2$, welche sich in dieser Weise kontrollieren ließe, ergibt sich $16 + 48 + 10 = 74$.

Aufgabe 26. Wieviel g wiegt 1 l Kohlendioxydgas?

Da dieses Gas (fälschlich „Kohlensäure" genannt) die Zusammensetzung $CO_2$, also das Mol.-Gew. $12 + 32 = 44$ hat, so erweist es sich 22mal so schwer als $H_2$, wiegt also 1,975 g/l.

Aufgabe 27. Bei vielen Dampfdichtemethoden, namentlich den einfachen „Verdrängungsmethoden", wird die Luft als Vergleichsgas eingeführt. Wie groß ist deren Molekulargewicht anzusetzen?

Luft ist ein Gemenge von 21% Sauerstoff, 78% Stickstoff und 1% Argongas. Entnimmt man die spezif. Gew. der Tabelle S. 35, wobei man Ar wie N rechnen kann, so erhält man hiernach für das Gemisch Luft das Molekulargewicht 28,9.

Kohlendioxyd ist hiernach 44,0/28,9 = 1,52 mal schwerer als Luft.

Die auf Luft gleich 1 bezogene Gas- oder Dampfdichte ergibt also durch Multiplikation mit 28,9 das Molekulargewicht.

**35. Gasmolekülzahl in der Raumeinheit.** Wenn gleiche, mit verschiedenen Gasen erfüllte Räume, z. B. je 1 l, bei denselben Temperatur- und Druckbedingungen Gewichte aufweisen, die sich wie die Relativgewichte ihrer kleinsten Bausteine, der Moleküle, verhalten, so kann dieses nicht anders zustande kommen, als dadurch, daß in diesen gleichen Räumen von jedem Gase immer gleichviel Moleküle enthalten sind. Man kann den Satz von Avogadro demnach auch so ausdrücken: Bei gleichen Temperatur- und Druckbedingungen enthalten gleiche Räume gleich viele Moleküle der verschiedensten Gase oder Heißdämpfe.

**36. Die Loschmidtsche Zahl.** Aus den bisherigen Daten läßt sich noch nicht ermitteln, wieviele Gasmoleküle im Liter unter den normalen Verhältnissen enthalten sind. Auf drei Wegen kann man aber zu einer Kenntnis dieser wichtigen Zahl $N$ gelangen, die zuerst von Loschmidt ermittelt wurde.

Zunächst gaben Betrachtungen der kinetischen Gastheorie Anhaltspunkte dafür. Sodann kann man aus der Planckschen Strahlungstheorie auf diese Größe schließen. Endlich hat in neuester Zeit die radioaktive Forschung Hilfsmittel angegeben, um $N$ indirekt zu bestimmen. So verschieden die Wege sind, auf denen man zu dieser Zahl gelangt, um so bemerkenswerter ist die auffallende Übereinstimmung der durch die genannten Methoden erhaltenen Werte. Dies gewährt eine neue gewaltige Stütze für die Atomistik und die Lehre von dem Aufbau der Materie aus diskreten Massenteilchen.

Als der beste Mittelwert kann für die Loschmidtsche Zahl zurzeit der Betrag:

$$N = 2{,}56 \cdot 10^{19} \text{ Moleküle/cm}^3 \tag{13}$$

gelten (für die Normalbedingungen 0° Temp., 760 mm Druck).

Aufgabe 28. Mit unseren neuesten Quecksilberluftpumpen (z. B. der Gaedepumpe, vgl. § 96) können wir leicht ein Gas bis auf $^1/_{1000\,000\,000}$ seines Anfangsvolumens verdünnen. Wieviel Gasmoleküle sind in einem Kubikzentimeter noch enthalten, wenn wir vom Atmosphärendruck ausgehen und etwa bei 0° arbeiten?

Offenbar immer noch $2{,}56 \cdot 10^{10}$, also eine so erhebliche Zahl, daß etwa von einem „absoluten“ Vakuum selbst hier noch keine Rede sein kann.

Methoden, diesem näher zu kommen, besprechen wir später.

**37. Drucke äquimolekularer Gasmengen.** Wegen des Vergleiches mit eigentümlichen (später zu besprechenden) Erscheinungen bei den verdünnten Lösungen wollen wir den Avogadroschen Satz noch anders formulieren: Drängen wir von verschiedenen Gasen oder Heißdämpfen Gewichtsmengen in dieselben Volumina hinein, welche sich wie ihre Molekulargewichte verhalten, so sind die Drucke, welche diese Gasmengen gegen die Wände ihrer Gefäße ausüben, bei derselben Temperatur gleich groß, z. B. bei Mols im Liter, gleich 760 mm Hg-Säule bei $0^0$, wie wir oben gesehen haben. Die Eigenschaften solcher Mengen sind also hier (und auch sonst, wie wir später sehen werden) besonders einfache und übersichtliche. Man nennt sie „äquimolekulare Mengen". Der Satz sagt also aus: „Äquimolekulare" (oder „isomole") Gasmengen üben bei derselben Temperatur im gleichen Raume dieselben Drucke aus.

Zweites Kapitel.

# Arbeitsumformer.

Im vorhergehenden Kapitel haben wir den Arbeitsbegriff und seine Faktoren erläutert und gezeigt, in welchen Maßeinheiten dieselben auszudrücken sind. Jetzt wollen wir zu den Vorrichtungen übergehen, welche in der Praxis zur Vollführung von Hubleistungen hauptsächlich herangezogen werden. Es sind dies die einfachen „Hebezeuge“, die „einfachen Maschinen“ oder „elementaren Potenzen“ (Pappus, 390 n. Chr.) der Mechanik. Es soll an ihnen namentlich das „Prinzip der Äquivalenz von geleisteter und verbrauchter Arbeit“ erläutert werden, die „goldene Regel der Mechanik“, welche sich bereits als ein, allerdings noch sehr spezieller Fall des Haupt- und Grundgesetzes der ganzen Physik erweisen wird, des „Prinzips von der Erhaltung der Arbeit oder der Energie“.

Dabei wird sich Gelegenheit geben, einige allgemeine Grundprinzipien der Mechanik einzuführen.

Wir beginnen mit Arbeitsumwandlungen, die noch nicht mit Kraftsteigerungen verbunden sind, sondern bei denen zunächst nur das Sinken eines Gewichtes, das Heben eines gleich großen anderen zur Folge hat. Wenn dieser Vorgang auch zunächst als zu einfach erscheinen mag, um einer besonderen Erläuterung zu bedürfen, so werden wir doch sehen, daß schon durch ihn Vorgänge illustriert werden, die in der Wärmelehre eine große Rolle spielen.

**38. Einfacher, umkehrbarer Kreisprozeß.** Der hier zu betrachtende Arbeitsprozeß werde zuerst an einem Modelle, sodann durch ein Diagramm erläutert.

Versuch 9. Neben das Modell der Tafelwage von Versuch 4, S. 7, werden zwei Etageren mit je zwei horizontalen Tafeln, eine in dem höheren Niveau $H_1$, die andere in dem tieferen $H_2$ gestellt. Auf der einen, etwa der linken, sei ein Gewicht $G$ in dem höheren Niveau $H_1$ gegeben, auf der anderen ein gleiches in dem tieferen $H_2$. Wir führen beide Gewichte von beiden Seiten her in die Maschine ein.

Um anzudeuten, daß dies (nach § 2) ohne wesentlichen Arbeitsaufwand geschehen kann, sind die Tafeln sowohl der Etageren, wie der Wage mit Spiegelglasplatten belegt.

Dann wird beim Sinken des einen Gewichtes um die Strecke $H_1 - H_2 = h$ das andere gerade von dem niederen Niveau $H_2$ in das höhere $H_1$ emporgehoben. Hierauf ist alles wie vorher. Wir haben wieder ein Gewicht $G$ im höheren Niveau, ein gleiches im niederen, in unserem System hat sich in bezug auf den Gesamtenergievorrat nichts geändert. Wir können den Prozeß mit genau gleichen Zwischenstufen umkehren und das eben gehobene Gewicht wieder sinken und das andere damit heben lassen.

Wir erteilen der Arbeit $G \cdot h = a$ zweckmäßig ein Vorzeichen, je nachdem sie gewonnen oder entzogen wird und treffen dabei die folgende Festsetzung: Arbeit wird von einer Kraft geleistet, wenn sich ihr Angriffspunkt in demselben Sinne, in welchem sie selbst wirkt, verschiebt: positive Arbeit der Kraft. Wird der Angriffspunkt gegen die Richtung der Kraft verschoben, so muß Arbeit (von außen her) geleistet werden, es wird eine bestimmte Energiemenge verbraucht, die dann das System gewinnt.

Bei der Schwere entsprechen den höher gelegenen Niveaus höhere Potentialwerte $\Pi$ (§ 17, S. 21), die Kraft selbst ist also nach unten, d. h. nach den abnehmenden Potentialwerten gerichtet, und einer „positiven" Arbeitsleistung derselben entspricht eine Abnahme des Potentiales: $G \cdot dh = -d\Pi$ (wie es dem Energieprinzipe tatsächlich entspricht, das ja verlangt, daß $+G \cdot dh + d\Pi = 0$ sein muß), so daß $G = -d\Pi/dh$ zu setzen ist. Das (im homogenen Energiefelde [§ 16] konstante) Verhältnis $-d\Pi/dh$ nennt man das „Potentialgefälle"; die Kraft hat die Richtung des Potentialgefälles.

In unserem Beispiele wird zunächst links von $G$ die Arbeit $+a = G \cdot h$ geleistet, weil die Zugkraft von $G$ und der Weg beide vertikal nach unten gerichtet sind. An derselben Maschine wird aber die Arbeit $-a$ verbraucht, um ein dem $G$ gleiches Gewicht zu heben. Die Arbeitsbilanz ergibt in diesem einfachsten Falle: $+G \cdot h - G \cdot h = 0$.

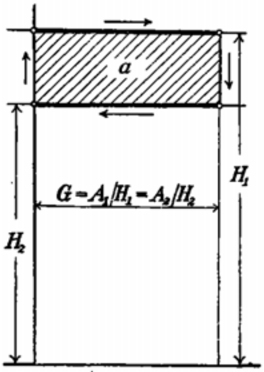

Fig. 11.

Einen solchen einfachen Prozeß wollen wir jetzt auch graphisch darstellen: Ähnlich wie in Fig. 3, S. 20, tragen wir in Fig. 11 in den von einem gemeinsamen Bezugsniveau, etwa dem Meeresspiegel, an gezählten Höhen $H_1$ und $H_2$ von einer gemeinsamen Höhenaxe aus Strecken nach rechts hin ab, die den Gewichten entsprechen, im vorliegenden Falle also gleichlange Strecken. Wir setzen aber neben diese Strecken Pfeile, etwa über die obere einen von links nach rechts weisenden, unter die andere einen von rechts nach links zeigenden, dem Umstande entsprechend, daß wir das obere Gewicht von links, das untere von rechts her in die Maschine eingeführt haben. Bezeichnen wir auch die von beiden durchmessenen Hübe mit Pfeilen, so erhalten wir eine vollständig umfahrene Figur. Ihr Flächeninhalt entspricht der verwandelten Arbeitsgröße $a = G \times h$. Wir kommen in dem Diagramme zum Anfangspunkte zurück. Prozesse, bei denen dies der Fall ist, nennt man „Kreisprozesse". Wir haben hier einen „einfachen und umkehrbaren Kreisprozeß" durch das Diagramm erläutert. Dabei besteht nach § 21 in jedem Momente Gleichgewicht an der Maschine.

Wenn der Prozeß umkehrbar ist, kann auch die Richtung aller Pfeile vertauscht werden.

**39. Schwerlinien.** Jeder Körper besteht aus einer größeren Anzahl einzelner Teile, welche im Schwerefelde alle der Anziehungskraft der Erde unterworfen sind, also Gewichte repräsentieren. Es frägt sich, unter welchen Bedingungen ein Körper unter der Wirkung der an seinen eigenen Teilen angreifenden Gewichtskräfte im Gleichgewichte sich befindet? Als Kennzeichen dieses Gleichgewichtes betrachten wir dabei wieder die Umkehrbarkeit der Arbeitsleistungen.

Versuch 10. Ein Lineal ist mit seiner oberen Kante horizontal auf zwei Ständern hochkant aufgestellt. Ein Metermaßstab von prismatischem Querschnitte wird auf dem Lineale quer zu dessen Längsrichtung in seiner Mitte so aufgelegt, daß er sich in der Schwebe halten, d. h. mit seinen Enden auf- und abpendeln kann. Dadurch ist dann das Gleichgewicht zwischen den Gewichten in beiden Hälften angezeigt. In der Nähe der Auflagefläche muß sich eine Linie finden, in bezug auf die sich die Schwerkräfte der beiden Stabhälften gerade im Gleichgewichte halten. Eine solche Linie nennt man eine „Schwerlinie".

Versuch 11. Aus einem schweren aber überall gleich dicken und gleich beschaffenen Bleche ist eine Dreieckfläche ausgeschnitten. Jeder Quadratzentimeter derselben ist (bei homogenem Materiale) durch das gleiche Gewicht ausgezeichnet. Das Blech wird so auf die Linealkante gelegt, daß eine Spitze auf der Kantenmitte auflagert und die entsprechende Schwerlinie gesucht. Man findet, daß diese durch die Mitte der Gegenseite hindurchgeht.

Daß diese „seitenhalbierende Transversale" in der Tat eine Schwerlinie sein muß, erkennt man, wenn man sich die Dreiecksfläche durch Parallele zur betrachteten Seite in viele schmale Flächenstreifen zerlegt denkt. Für jedes einzelne derselben geht die Schwerlinie nach Versuch 10 durch die Mitte. Alle diese Mitten liegen aber (nach einem bekannten geometrischen Satze) auf der genannten Transversalen.

In ähnlicher Weise findet man die durch die anderen Seiten gehenden Schwerlinien. Man sieht, daß sie alle durch einen Punkt