

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Lehrbuch der Physik

Mechanik und Meßmethoden

Chvol'son, Orest D.

1918

Erster Abschnitt. Einleitung in die Physik

Erster Abschnitt.

Einleitung in die Physik.

§ 1. **Zwei Welten.** Es gibt für jeden Menschen zwei Welten: eine innere und eine äußere; zwischen diesen beiden vermitteln unsere Sinne. Die Außenwelt besitzt die Fähigkeit auf unsere Sinne einzuwirken, in ihnen gewisse Veränderungen hervorzurufen, oder, wie man zu sagen pflegt, Reize auf sie auszuüben. Die innere Welt wird durch die Gesamtheit des Bewußtseininhalts bestimmt, welcher der unmittelbaren Beobachtung eines anderen Menschen völlig unzugänglich ist.

Die von der Außenwelt hervorgerufene Reizung der Sinnesorgane überträgt sich auf die Innenwelt und ruft in ihr ein subjektives Empfinden hervor, dessen Entstehung durch das Bewußtsein bedingt wird. Die subjektive Empfindung wird vergegenständlicht (objektiviert), d. h. wird auf den äußeren Raum übertragen als ein Etwas, das einem bestimmten Orte und einer bestimmten Zeit angehört. Wir übertragen also unsere Empfindungen auf die Außenwelt, wobei Raum und Zeit den Hintergrund bilden, vor welchem sich die vergegenständlichten Empfindungen anordnen. Diese befinden sich daher gleichsam an bestimmten Stellen des Raumes, und hierhin versetzen wir auch unwillkürlich die Ursache, durch welche sie hervorgerufen wurden. Die Untersuchungen über den Vorgang des Objektivierens gehören der Philosophie an.

Dem Menschen wohnt ferner die Fähigkeit inne, die erhaltenen Eindrücke zu vergleichen, über ihre Gleichartigkeit oder Ungleichartigkeit zu urteilen und im letzteren Falle qualitative und quantitative Verschiedenartigkeiten zu erkennen, wobei die quantitativen Unterschiede sich entweder auf den Spannungsgrad (Intensität) oder die Raumausdehnung (Extensität) oder endlich auf die Zeitdauer der den Reiz hervorbringenden objektivierten Ursache beziehen können.

Da der Verstandesschluß, welcher jede Vergegenständlichung begleitet, ausschließlich auf dem empfangenen Eindrucke beruht, so bringt eine vollkommene Identität dieser Eindrücke unbedingt auch Identität der objektivierten Ursachen hervor, und diese Identität bleibt ohne Rücksicht auf unseren Willen, ja sogar gegen unseren Willen selbst in jenen Fällen bestehen, wo andere Sinnesorgane von der Verschiedenartigkeit der Ursache ein unbestreitbares Zeugnis ablegen (der Gegen-

stand und sein Spiegelbild — Sehen und Fühlen). Hieraus entspringt eine der Hauptquellen der zweifellos falschen Verstandesschlüsse, welche zu den sogenannten Täuschungen des Gesichts, Gehörs usw. führen. Eine andere Quelle derselben ist Mangel an Übung bei der Beurteilung von neuen Eindrücken.

Die räumliche und zeitliche Wahrnehmung der Sinneseindrücke, denen wir, wie oben auseinandergesetzt, die Bedeutung objektiver, außerhalb unseres Bewußtseins bestehender Realität verleihen, wird äußere Erscheinung genannt. Die Farbenänderung, welche die Körper bei Änderung ihrer Beleuchtung erfahren, die Niveaugleichheit des Wassers in Gefäßen, die Schwingungsbewegung des Pendels sind Beispiele äußerer Erscheinungen.

Eine von den drei Triebfedern, welche die Menschheit auf dem Wege ihrer Entwicklung in Bewegung erhalten, ist die Wißbegier, deren letztes unerreichbares Ziel die Erkenntnis des Wesens unseres Daseins ist, des wahren Verhältnisses zwischen der Welt in uns und der Außenwelt. Die beiden anderen Triebfedern sind das Streben nach Wohlergehen und nach Anerkennung. Als Ergebnis der Wißbegier hat man eine sehr große Zahl der verschiedenartigsten Erscheinungen kennen gelernt, welche je nach ihren Merkmalen den Gegenstand der verschiedenen Wissenschaften bilden. Unter letzteren nimmt die Physik eine der ersten Stellen ein, dank dem Umfang der von ihr bearbeiteten Gebiete und der Bedeutung, welche sie für fast alle übrigen Wissenschaften hat.

Indem wir die Ursache der Empfindung vergegenständlichen, d. h. sie an eine bestimmte Stelle des Raumes versetzen, stellen wir uns vor, daß an jener Stelle ein Etwas vorhanden sei, was wir Materie oder Stoff nennen. Ein begrenzter Teil des Raumes, welcher Stoff enthält, heißt ein physischer Körper.

Die Materie zerfällt in zwei Arten: die nicht organisierte und die organisierte; letztere bildet den Tier- und Pflanzenkörper.

Die erste Entstehung von organisierter Materie ist uns noch unbekannt; zwar beobachten wir den Übergang der nicht organisierten Materie in die organisierte (Ernährung, Atmung), aber dieser Übergang erfolgt nur in Gegenwart bereits organisierter Materie. Das Geheimnis der ersten Umwandlung ist uns bis jetzt verschlossen.

§ 2. Aufgabe der Physik. Physik im weitesten Sinne des Wortes ist die Wissenschaft von der nicht organisierten Materie und von den in ihr vor sich gehenden Erscheinungen. Diese heißen physikalische Erscheinungen. Das Arbeitsgebiet aller übrigen sich mit der Materie beschäftigenden Wissenschaften ist die organisierte Substanz (biologische Wissenschaften). Physikalische Prozesse können sich auch in der organisierten Materie abspielen; indes sind sämtliche

Versuche, alle in der organisierten Materie vor sich gehenden Erscheinungen auf physikalische Vorgänge zurückzuführen, mißglückt und bis jetzt ist ungewiß, ob dies jemals gelingen wird. Die physikalischen Erscheinungen spielen zweifellos eine hervorragende Rolle auch in dem Tier- und Pflanzenkörper, aber es wird durch sie nicht die Gesamtheit der Eigenschaften der organisierten Materie erschöpfend dargestellt: es bleibt noch das übrig, was das innerste Wesen und die Bedingung der Organisation ausmacht — das, was wir „Leben“ nennen.

Indem die Physik die in der nicht organisierten Materie vor sich gehenden Erscheinungen erforscht, verfolgt sie ein dreifaches Ziel: die Erscheinungen zu entdecken, zu untersuchen und zu erklären.

Um die Erscheinungen zu entdecken und zu untersuchen, bedient man sich der Beobachtung und des Experimentes, welche indes durch keine scharfe Grenze voneinander getrennt sind; beide zusammen ergeben die Erfahrung. Im engeren Sinne des Wortes ist die Beobachtung einer äußeren Erscheinung die Betrachtung eines Vorganges, der sich unter den gewöhnlichen Verhältnissen abspielt; das Experiment stellt eine Wiederholung der Erscheinung unter künstlich geschaffenen, in der Natur vielleicht niemals vorkommenden Verhältnissen dar, um dabei die Besonderheiten erkennen zu können, die in der Erscheinung gerade dank diesen Verhältnissen zutage treten. Bisweilen sagt man, daß das Experiment dazu diene, eine gestellte Frage von der Natur selbst mehr oder weniger bestimmt beantworten zu lassen; durch die Beobachtung belausche man, durch das Experiment befrage man die Natur. Indes ist zu beachten, daß, da sowohl die Beobachtung als auch das Experiment Gedankenarbeit zur Voraussetzung und im Gefolge haben, auch die Beobachtung auf das Erhalten einer Antwort abzielt, nachdem durch vorhergegangene Gedankenarbeit die Frage klargelegt ist. Im weiteren Sinne des Wortes begleitet „die Beobachtung“ ein jedes Experiment.

Die von uns gebrauchte Bezeichnungsweise (Einteilung des Versuches in Beobachtung und Experiment) ist die heute in der Philosophie übliche. In der Physik pflegt man die Beobachtung von dem Versuch zu unterscheiden, indem man den Versuch dem gleichsetzt, was vorher Experiment genannt wurde. Im folgenden werden wir uns dieser letzteren Terminologie bedienen, obgleich auch im gewöhnlichen Sprachgebrauch das Wort Versuch zuweilen in einem weiteren und allgemeinen Sinne gebraucht wird.

Die dritte Aufgabe der Physik besteht darin, die Erscheinungen zu „erklären“. Eine Erscheinung erklären heißt hierbei nicht, die gegenseitige Abhängigkeit der Erscheinungen logisch verständlich machen, so daß man sieht, daß auf eine gegebene Erscheinung eine andere bestimmte Erscheinung mit logischer Konsequenz folgen muß. Eine Erscheinung erklären heißt — den gesetzmäßigen Zusammenhang der-

selben mit anderen uns schon bekannten Erscheinungen ermitteln. Somit besteht das Wesen der dritten Aufgabe der Physik darin, den Zusammenhang zwischen den Erscheinungen aufzudecken und zu erläutern. Nicht in der Zurückführung irgendeiner Erscheinung A auf eine uns schon bekannte Erscheinung B liegt das Schwergewicht der Aufgabe, denn gerade diese Anordnung ist eine zufällige und bei einem anderen Verlaufe der historischen Entwicklung unserer Kenntnisse hätte sie auch die entgegengesetzte sein können, so daß wir also die Erscheinung B auf die längst bekannte A hätten zurückführen müssen. Wichtig ist allein die Aufdeckung des Zusammenhanges zwischen den Vorgängen A und B . Die großen Ereignisse in der Geschichte der Physik sind durch die Entdeckung neuer, unerwarteter Beziehungen zwischen den Erscheinungen gekennzeichnet, z. B. die des Zusammenhanges zwischen den magnetischen und elektrischen, zwischen den elektrischen und optischen Erscheinungen usw.

Daß ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen den zeitlich aufeinander folgenden Erscheinungen besteht, ist für uns unbezweifelbar. Die Gesamtheit der physikalischen Erscheinungen, welche die Außenwelt kennzeichnet, geht im gegebenen Augenblick gesetzmäßig aus der Gesamtheit der Erscheinungen, welche sich auf den vorhergehenden Augenblick beziehen, hervor, wobei eine einzelne, für sich allein betrachtete Erscheinung A einer bestimmten Gruppe B vorhergehender Erscheinungen entspringt. Bedingungsweise kann man die Gruppe B als die nächste Ursache der Erscheinung A , die Erscheinung A aber als die Wirkung der Erscheinungsgruppe B bezeichnen. Während wir nun die Erscheinung A beobachten, können wir uns zur Aufgabe stellen, die Erscheinungsgruppe B , d. h. die Ursache der Erscheinung A zu finden. Unzählige Beispiele aus allen Teilen der Physik beweisen, daß das Aufsuchen der Ursache in der Tat auf das Aufsuchen des Zusammenhanges zwischen den Erscheinungen hinausläuft. Indem wir die Gruppe B als die Ursache von A bezeichnen, nehmen wir an, daß alle übrigen Erscheinungen der Außenwelt, die gleichzeitig mit den Erscheinungen B auftreten, aber nicht zu dieser Gruppe gehören, auf die Form der Erscheinung A ohne Einfluß sind, so daß mithin keinerlei Veränderung derselben auch eine Veränderung von A zustande bringt.

Die gegenseitigen Beziehungen zwischen Ursache (B) und Wirkung (A) werden durch zwei Postulate oder Axiome geregelt; sie bilden die Grundlage, auf der die Wissenschaft von den Erscheinungen aufgebaut worden ist. Es sind das die folgenden zwei Axiome:

I. Jede bestimmte Wirkung (Erscheinung A), die aus einer gegebenen Ursache (Gruppe B) hervorgeht, ist eine absolute und unbedingte Folge der letzteren. Damit soll aber nicht gesagt sein, daß außer A nicht auch noch eine Reihe anderer

Wirkungen (die Erscheinungen C , D usw.) gleichzeitig mit A bestehen kann, die ebenfalls aus derselben Gruppe B entspringt.

Der Sinn dieses Axioms ist, daß die Erscheinung A in keinem Falle (an der gegebenen Stelle und zu der gegebenen Zeit), nicht einmal in Gedanken, durch eine andere Erscheinung ersetzt werden kann. Dieses Axiom drückt somit aus, daß in der Welt ein in jedem Falle bestimmter und einzig möglicher gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen zeitlich aufeinander folgenden Erscheinungen besteht. Wenn die Gruppe B und die gesetzmäßigen Beziehungen bekannt sind, so kann die Erscheinung A mit vollständiger Gewißheit vorausgesagt werden. Als Hilfsmittel für die Vorhersage dient die Mathematik und die deduktive Methode logischen Denkens, auf welcher die Mathematik beruht.

II. Ein und dieselbe Erscheinung A kann als Wirkung aus einer großen Zahl verschiedener Erscheinungsgruppen B hervorgehen. Wenn wir die Erscheinung A beobachten, und uns eine große Zahl gesetzmäßiger Beziehungen zwischen den Erscheinungen überhaupt bekannt ist, so können wir dennoch nicht wissen, ob beim Zustandekommen von A gerade diese Beziehungen mitgespielt haben oder andere uns noch unbekannte. Der Schluß von B und A kann von uns bisweilen mit vollständiger Gewißheit gezogen werden; der Schluß von A und B aber immer nur mit einem größeren oder geringeren Grade von Wahrscheinlichkeit.

Die Physik bestimmt, indem sie die Erscheinungen erforscht und ihren gesetzmäßigen Zusammenhang aufdeckt, für eine gegebene Erscheinungsgruppe B die einzig möglichen Wirkungen A und sucht für eine gegebene Erscheinung A die am meisten wahrscheinliche Ursachengruppe B . In allen Teilen der Physik finden wir Beispiele für diese beiden Arten von Verstandesschlüssen.

§ 3. Hypothesen. Hypothese nennen wir die Voraussetzung, daß eine gewisse gesetzmäßige Abhängigkeit zwischen gegebenen Erscheinungen besteht. Die landläufige Definition der Hypothese als einer Annahme über die Ursache einer gegebenen Erscheinung ist zu eng — denn eine Hypothese ist in allen den Fällen notwendig, wo der Zusammenhang zwischen den Erscheinungen noch nicht festgesetzt ist, und sie kann sich daher ebenso auf die Ursache als auf die Wirkungen beziehen.

Als Hypothese in bezug auf die Ursache kann man irgendeine von den möglichen Gruppen B , welche die zu erklärende, d. h. mit anderen gesetzmäßig zu verknüpfende Erscheinung A zur Folge haben können, auswählen. Welche Ursachengruppe in dem gegebenen Falle gewählt werden oder wie die Hypothese beschaffen sein muß, dafür gibt es keine Regel und kann es keine geben. Um Hypothesen zu ersinnen, bedarf es eines umfangreichen Wissens und einer besonderen geistigen Veranlagung.

Nicht alle Hypothesen haben gleichen Wert und gleiche Daseinsberechtigung. Eine gute Hypothese muß folgende Eigenschaften besitzen: sie muß möglich sein, muß mit den beobachteten Erscheinungen im Einklang stehen, muß möglichst umfassend und einfach und schließlich verifizierbar sein.

Die Hypothese muß also erstens im Bereiche des Möglichen liegen, d. h. sie darf nicht im Widerspruch stehen zu dem, was gewiß ist, was zur festen Grundlage der Wissenschaft gehört (z. B. der Lehre der Erhaltung von Stoff und Energie). Sie muß mit den Erscheinungen im Einklang stehen, d. h. die Erscheinungen müssen sich auf Grund der erkannten gesetzmäßigen Abhängigkeiten aus ihr als einzig mögliche und notwendige Folgen ableiten lassen. Der Umfang der Hypothese muß derartig sein, daß sie eine möglichst große Zahl von Erscheinungen umfaßt. Es ist nicht erlaubt, für jede einzelne Reihe ähnlicher Erscheinungen A je eine besondere Hypothese aufzustellen, d. h. anzunehmen, daß eine besondere Ursachengruppe besteht. Je geringer die Zahl ihrer Hypothesen ist, um so höher entwickelt ist eine Wissenschaft. Die Hypothese muß ferner möglichst einfach sein, denn tief im Bewußtsein der Menschen wurzelt die Überzeugung, daß die Endursachen der Naturvorgänge äußerst einfach sind. Endlich muß die Hypothese verifizierbar sein, d. h. es muß möglich sein, aus ihr auf deduktivem Wege eine große Zahl von Schlüssen zu ziehen, die sich durch den Versuch mehr oder weniger bestätigen lassen. Man muß sich also eine Übersicht zu verschaffen suchen, wie weit die Folgerungen mit der Wirklichkeit übereinstimmen; dadurch erhält man ein Maß für den Wahrscheinlichkeitsgrad der Hypothese selbst.

Hypothesen, welche die genannten Eigenschaften nicht besitzen, sind für die Wissenschaft ein unnützer und schädlicher Ballast und von ihnen gelten die Worte Newtons: *hypotheses non fingo*¹⁾.

Außer den Hypothesen über die Ursache, d. h. über das Vorhandensein der Erscheinungsgruppe, welche die Erscheinung A hervorruft, spielen in der Wissenschaft eine große Rolle erstens die Hypothesen über die Existenz eines gesetzmäßigen Zusammenhanges zwischen zwei bekannten Erscheinungen überhaupt, wobei die Frage, ob diese Erscheinungen sich im Verhältnis von Ursache und Wirkung befinden oder als Wirkungen einer noch unentdeckten Erscheinungsgruppe miteinander parallel verlaufen (Sonnenflecke und Nordlichter), noch offen bleibt, und zweitens Hypothesen über die besondere Form gesetzmäßigen Zusammenhanges zwischen solchen Erscheinungen, zwischen denen ein ursächlicher Zusammenhang an sich nicht bezweifelt werden kann (elektrischer Strom und Erwärmung des durchströmten Leiters).

¹⁾ Newton, Principia. Glasgow 1871, S. 530.

Ohne Hypothese im weiteren Sinne des Wortes, d. h. ohne Voraussetzungen, ist kein einziger Schritt in der Wissenschaft denkbar.

Claude Bernard sagt: „Ein vorausgehender Gedanke oder eine Hypothese ist der notwendige Ausgangspunkt für jede Experimentaluntersuchung; ohne denselben ist es undenkbar, etwas Neues zu entdecken. Einem jeden Versuche muß eine mehr oder weniger klare Vorstellung über die Erscheinung oder ihre besondere quantitative oder qualitative Eigenart zweifellos vorgehen. Auch in der reinen Mathematik ist ein Fortschritt ohne Hypothese über die Abhängigkeit zwischen zwei oder mehr Größen unmöglich.“ Derselbe Claude Bernard sagt: „Der Mathematiker und der Naturforscher bedienen sich ein und derselben Arbeitsweise, wenn sie neue Wahrheiten suchen. Durch Induktion kommt man zur Aufstellung von Hypothesen; diese prüft man alsdann.“ Auf die Frage, auf welchem Wege der Induktion man zu solchen Hypothesen gelange, welche einen Fortschritt für die Wissenschaft bedeuten, kann man die Antwort in Keplers Worten finden, welcher sagte: „Mein guter Genius hat mir diesen Gedanken eingegeben.“

Besonders muß man sich vor Scheinhypothesen hüten; sie sind fast immer sehr verwickelt und enthalten meist in Form von Voraussetzungen entweder alles oder fast alles das, was gerade erst durch sie erklärt, d. h. in gesetzmäßigen Zusammenhang mit anderen Erscheinungen gebracht werden soll. Von diesen anderen Erscheinungen ist in solchen Scheinhypothesen gar nicht die Rede, und deshalb können sie auch nicht zur Erklärung der Erscheinungen dienen, für welche sie aufgestellt wurden. Sie stellen nichts anderes dar als eine Beschreibung der Vorgänge, die wegen ihrer Kürze und Anschaulichkeit bisweilen von hohem Nutzen sein kann; aber zu einer tieferen Erkenntnis der Erscheinung können sie nicht dienen. Als Beispiel einer solchen Scheinhypothese kann die Annahme zweier elektrischer Fluida dienen, welche etwa bis zum Jahre 1880 benutzt wurde.

Eine gut gewählte Hypothese bildet für den Fortschritt der Wissenschaft ein überaus wichtiges Hilfsmittel; man kann sie auch als Arbeitshypothese bezeichnen; die Rolle aber, welche dieses Hilfsmittel zu spielen hat, darf nur vorübergehend sein; je eher die Hypothese aufhört eine Hypothese zu sein, um so besser. Diesem Ziele zu führt uns allein der Versuch. Die Vergleichung der in der Außenwelt wirklich auftretenden Erscheinungen mit denen, welche auf deduktivem Wege als notwendige Folge der aufgestellten Hypothese abgeleitet werden, kann entweder die zweifellose Unrichtigkeit der Hypothese, von welcher man sich alsdann loszusagen hat, dartun, oder sie kann als Bestätigung für ihre unzweifelbare Richtigkeit dienen; in letzterem Falle hört die Hypothese als solche zu bestehen auf. Eine Hypothese, welche nicht direkt geprüft werden kann, sondern bloß auf dem Um-

wege des Vergleichens ihrer Folgen mit den Versuchsergebnissen, kann niemals Gewißheit erlangen. Nur wenn eine unbegrenzte Menge qualitativ verschiedener Beobachtungsergebnisse im Einklang mit der Hypothese steht, nähert sich ihr Wahrheitsgrad unbegrenzt der Gewißheit (wie z. B. die Annahme der Erdbewegung um ihre Achse und um die Sonne, der Satz von der Erhaltung der Energie). Das Aufkommen einer guten Hypothese kann die Wissenschaft mächtig fördern; aber viel wichtiger ist das Verschwinden einer Hypothese und die großartigsten Augenblicke in der Geschichte der Wissenschaft sind gerade durch den Sturz von Hypothesen gekennzeichnet. Die gleiche Bedeutung hat die Verschmelzung von zwei oder mehreren Hypothesen zu einer einzigen. Je geringer die Zahl der Hypothesen ist, um so höher steht die Entwicklung der Wissenschaft. „Die Wissenschaft strebt nicht nach Aufstellung, sondern nach Beseitigung der Hypothesen“ — sagt Ostwald. Ihre Vollendung würde die Wissenschaft erreicht haben, wenn nur eine einzige Hypothese übrig geblieben wäre, aus welcher als notwendige Folge sich der gesetzmäßige Zusammenhang aller Erscheinungen der Außenwelt ergeben würde.

§ 4. Der Äther. Das Elektron. Das Studium der verschiedenartigsten Erscheinungen der Außenwelt hat seit lange zu der Annahme geführt, daß außer der Materie, deren Eigenschaften wir von Kindheit an als die Ursache sehr vieler um uns her vorgehender Erscheinungen zu betrachten gewohnt sind, noch andere Träger vorhanden sind, die wir Agenzien nennen können. Sie hießen früher Imponderabilien, d. h. gewichtslose Wirkungsursachen oder Substanzen. Diese Bezeichnung aber beruht jedenfalls auf einem Mißverständnis, denn aus dem Umstande, daß unter den gegebenen Verhältnissen das Gewicht eines Agens nicht ermittelt werden kann, folgt noch nicht, daß dieses Agens an sich jener Eigenschaft der Materie entbehrt, die man ihr Gewicht nennt. So hat doch beispielsweise Wasser im Wasser selbst gewissermaßen kein Gewicht und doch zählt es niemand zu den Imponderabilien. Wenn man das Vorhandensein dieser Agenzien zugibt, kann man aus den Versuchen höchstens schließen, daß sie „unwägbar“ sind, d. h. wegen der Beschaffenheit unserer Versuche ihr Gewicht nicht kundzugeben vermögen.

Zu Anfang des XIX. Jahrhunderts nahm man ziemlich allgemein an, daß es sechs verschiedene Agenzien gäbe: zwei elektrische, zwei magnetische, den Wärmestoff und das Agens, welches die Ursache der Lichterscheinungen bildet; dies entspricht der Annahme von sechs verschiedenen Hypothesen. Mit der Weiterentwicklung der Wissenschaft verminderte sich die Zahl der hypothetischen Stoffe und gegen das Ende des XIX. Jahrhunderts verblieb statt jener sechs nur noch eine einzige.

Jenes einzige Agens, mit dem man damals auszukommen glaubte, wurde „Äther“ genannt. Man nahm an, daß er den Raum zwischen den Weltkörpern erfülle und daß er in allen unserer Beobachtung zugänglichen Teilen des Weltalls enthalten sei. Das, was man Äther nannte, konnte wohl auch als eine besondere Art von Materie angesehen werden, und zwar in dem Sinne, in welchem diese von uns definiert worden ist (§ 1). Trotzdem wurden gewöhnlich der Bequemlichkeit halber die Ausdrücke „Äther“ und „Materie“ einander gegenübergestellt, und zwar wurde letztere Bezeichnung besonders für die Materie gebraucht, welche mehr oder weniger unmittelbar auf unseren Tastsinn wirkt. Der Äther dagegen sollte das Zwischenmittel, das Medium sein, welches Vorgänge durch den Raum überträgt, in welchem keine Materie in der eben erwähnten Bedeutung des Wortes vorhanden ist.

Wir wollen nun mit einigen Worten angeben, welche Rolle dem Äther behufs Erklärung der physikalischen Erscheinungen damals zugeschrieben wurde. Zu dem Zwecke müssen wir eine kurze Schilderung der auch noch heute herrschenden Vorstellung über den Aufbau der Materie vorausschicken. Wir nehmen an, daß die Materie aus sehr kleinen Teilchen besteht, die ihren Ort im Raume, also auch ihre gegenseitige Lagerung ändern können. Wir nennen die Anordnung der Teilchen normal, wenn zwischen dieser Materie und der übrigen Welt sich keinerlei Zusammenhang kundgibt, abgesehen von dem, welcher unter keinerlei Bedingung aufhören kann. Beim Auftreten neuer Bedingungen, wenn die Welt, welche sich außerhalb der betrachteten Materie befindet, einwirkt, kann die Anordnung der Stoffteile aus dem normalen Zustande in einen anormalen übergehen. Die Erscheinung, daß eine neue Anordnung der Teile auftritt, welche unbestimmt lange bestehen kann, die aber, sobald alle jene Ursachen, welche sie hervorriefen (die neuen Beziehungen zur übrigen Welt) verschwunden sind, in die normale Anordnung zurückkehrt, nennt man Formänderung oder Deformation.

Ein anderer überaus wichtiger Fall einer Veränderung in der normalen Anordnung der Stoffteile liegt vor, wenn ein Teil der Materie sich zu bewegen beginnt, indem er ununterbrochen seinen Ort ändert, sich dabei aber nur wenig aus der normalen Lage entfernt. Diese Erscheinung heißt *Perturbation* oder *Störung*. Sehr oft tritt dabei folgende Erscheinung auf: In irgend einem Teile der Materie entsteht eine Störung, darauf bildet sich eine ebensolche in dem benachbarten Teile aus, darauf in der Nachbarschaft dieses Teiles usw. Dies nennt man *Ausbreitung der Störung innerhalb der Materie*. *Deformationen* und *Störungen* sind, wie aus den Definitionen hervorgeht, von einer Veränderung in der gegenseitigen Lage der Stoffteile begleitet. Es kommen indes auch Fälle von Bewegung der Materie ohne eine

solche Veränderung der relativen Lage ihrer Teile vor. In diesem Falle sagen wir, daß sich die betreffende Materie als Ganzes bewegt.

Es wurde nun angenommen, daß es auch für den Äther eine normale Anordnung der Teile gäbe, daß auch in ihm Formänderungen und Störungen möglich seien und daß ein gewaltig großes Gebiet von Erscheinungen (des Lichtes, der Elektrizität und des Magnetismus) gesetzmäßig mit solchen Deformationen und Störungen im Äther zusammenhinge. Die Mitwirkung des Äthers an diesen Erscheinungen schien keinem Zweifel zu unterliegen; es galt außerdem als sehr wahrscheinlich, daß er eine wichtige Rolle bei anderen — und vielleicht bei allen physikalischen Erscheinungen ohne Ausnahme — spiele. Man glaubte damals, die Aufgabe der Physik genauer folgendermaßen fassen zu können: es ist der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen den Erscheinungen, die in der nichtorganisierten Materie und im Äther vor sich gehen, zu finden, wobei eine möglichst kleine Zahl von Annahmen über die Eigenschaften des Äthers und der Materie zu Hilfe zu nehmen ist.

Außer der gewöhnlichen Materie und dem Äther wurden keine weiteren Agenzien angenommen; z. B. sollte für die elektrischen Erscheinungen ebenfalls der Äther die einzige Ursache sein. Man glaubte ohne „Elektrizitäten“, als besondere, für sich bestehende Stoffe, auszukommen. Alle elektrostatischen Erscheinungen wurden auf Spannungen (Deformationen) im Äther zurückgeführt. Die elektrisierte Oberfläche eines Körpers sollte der geometrische Ort der Endpunkte von Linien sein, deren Richtung in jedem Punkte des Raumes mit der Spannungsrichtung zusammenfällt (sogenannte Kraftlinien). Ebenso wurden alle elektrokinetischen Erscheinungen durch Bewegungen (Perturbationen) im Äther erklärt. Der elektrische Strom wurde z. B. nicht als ein Vorgang im Leiter angesehen, sondern als ein Bewegungszustand im umgebenden Äther, dessen Form, Richtung und Stärke durch die geometrischen und physikalischen Eigenschaften des Leiters bestimmt würden. Den Bewegungen im Äther sollte eine gewisse Menge von kinetischer Energie (Kapitel III) entsprechen, welche von dem Leiter gleichsam eingesogen und in Wärme verwandelt würde. Ebenso sollte die elektrostatische potentielle Energie, z. B. eines geladenen Kondensators, die potentielle Energie des elastisch deformierten Äthers sein.

In den letzten Jahren hat in den Grundanschauungen der Physik eine gewaltige Umwälzung stattgefunden. Es kam eine Zeit, wo alte, fast vergessene Agenzien in neuer Form wieder auftauchten. Gegenwärtig (1917) kann der Umbau des wissenschaftlichen Gebäudes noch nicht als beendet angesehen werden; das Alte ist zerstört, aber das Neue baut sich nur langsam auf den veränderten Grundlagen auf. Ein heftiger Kampf verschiedener, einander widersprechender Meinungen ist entbrannt, man streitet sich, ob es ein oder drei Agenzien gibt;

manche Forscher glauben sogar, indem sie die gewöhnliche Materie hinzunehmen, nicht ohne vier auskommen zu können, andere dagegen hoffen, daß es möglich sei, sich auf eins zu beschränken.

Dieser gewaltige Umschwung wurde hervorgerufen durch die Untersuchung der Kathodenstrahlen, Strahlen, welche beim Durchgange von Elektrizität durch sehr verdünnte Gase entstehen, der Röntgenstrahlen und der von H. Becquerel und Frau Curie entdeckten radioaktiven Erscheinungen. Wir werden alle diese Erscheinungen in Band IV genau besprechen. Die Untersuchung der Kathodenstrahlen führte zu der neuen Lehre von den Elektronen. Indem man die Ursache der elektrischen Erscheinungen nicht mehr nur in Zuständen des Äthers suchte, kehrte man zurück zu der alten Lehre, nach welcher die Elektrizität ein besonderer, selbständig bestehender Stoff ist. Dies bezog sich zuerst nur auf die negative Elektrizität; hierbei erwies es sich sofort als notwendig, ihr einen atomistischen Bau zuzuschreiben. Die negative Elektrizität ist also nach der gegenwärtig allgemein herrschenden Ansicht ein Stoff, der aus kleinsten Teilchen, Elektrizitätsatomen besteht, welche den Namen Elektronen erhalten haben. Ein elektrischer Strom entsteht bei wirklicher Bewegung von Elektronen in einem Leiter. Über die besonderen Eigenschaften des Elektrons, z. B. ob es starr oder deformierbar ist, gehen die Ansichten noch auseinander; doch wäre es zu früh, bereits hier näher darauf einzugehen. Was früher positive Elektrizität genannt wurde, wird von einigen Forschern gegenwärtig ebenfalls als ein besonderer Stoff angesehen; über seinen Bau und seine Eigenschaften herrscht noch weniger Einigkeit, als über die Frage nach dem Wesen der negativen Elektrizität.

Als drittes Agens kommt hinzu der Äther, welcher den Raum erfüllt, und besonders als Träger und Leiter der strahlenden Energie gedacht wird (Band II und IV), d. h. der sichtbaren Lichtstrahlen, der infraroten und ultravioletten Strahlen, der Röntgenstrahlen und der Hertzschen elektrischen Strahlen. Fügen wir noch die gewöhnliche Materie hinzu, so hätten wir vier verschiedene Agenzien, aus denen die Welt aufgebaut sein soll und durch deren Eigenschaften die unendliche Fülle der uns umgebenden physikalischen und chemischen Erscheinungen sich sollte erklären lassen.

Parallel mit der Entwicklung der neuen Ansichten gingen nun noch andere fundamentale Umwälzungen in den physikalisch-chemischen Grundhypothesen. Hier müssen wir uns mit wenigen Andeutungen begnügen.

Das Atom der Materie (§ 8) wurde früher als eine homogene, sehr kleine Stoffmenge betrachtet, die sich bei keinerlei physikalischen oder chemischen Vorgängen in weitere Teile zerlegt. Gegenwärtig wird dem Atom der Materie ein äußerst verwickelter Bau zugeschrieben; in ihm sollen außer der gewöhnlichen Materie Elektronen vorhanden sein,

und das Ganze soll ein System bilden aus vielen Teilen mit verschiedenen, äußerst schnellen und verwickelten Bewegungen. Unter gewissen Umständen zerfällt das Atom; Elektronen werden aus ihm herausgeschleudert, manchmal auch Bruchstücke der Materie mit Elektronen.

Verschiedene Forscher sind noch viel weiter gegangen und haben auch der strahlenden Energie einen atomistischen Bau zugeschrieben. So ist der kühne Gedanke z. B. von Lichtatomen (Quanten) entstanden. Diese neue Lehre stellt sich teilweise dar als eine Rückkehr zur alten Newtonschen Emissionstheorie (Band II), wenn auch in wesentlich veränderter Form. Die Quantentheorie ist in den letzten Jahren ausgebaut worden und hat uns manche neue Erkenntnis in sehr verschiedenen Teilen der Physik (Lehre von der spezifischen Wärme, Photoelektrizität u. a.) gebracht.

Die weitere Entwicklung der Elektronentheorie hat noch nach einer anderen Richtung umwälzend gewirkt. Eine Reihe von Forschern, besonders H. A. Lorentz, Einstein und Minkowski, haben ganz neue, außerordentlich kühne Ansichten über Raum und Zeit ausgesprochen. Den Anstoß zu dieser neuen Lehre gab eine Reihe unbegreiflicher Tatsachen: das Fehlschlagen aller Versuche, auf Grund von Experimenten die relative Bewegung der Erde gegen den ruhenden Äther nachzuweisen. Diese Lehre wird unter dem Namen der Relativitätstheorie zusammengefaßt. Sollten diese Ansichten durchdringen, in der Wissenschaft festen Fuß fassen und vielleicht einst Gemeingut der Menschheit werden, so würde dies einer so tiefgehenden Umwälzung unserer Grundvorstellungen entsprechen, wie sie in der Geschichte der Menschheit nicht ihresgleichen hat; sie würde selbst den großen Übergang von der geozentrischen zu der heliozentrischen Weltanschauung in den Schatten stellen.

Wir sahen, daß gegenwärtig vielfach vier Agenzien angenommen werden: die gewöhnliche Materie, die negative und die positive Elektrizität und der Äther. Es gibt aber auch Forscher, welche die positive Elektrizität nicht als ein besonderes Agens ansehen, sondern glauben, daß ein Atom, welches negative Elektronen verloren hat, uns als positiv elektrisch erscheint. Andere meinen, ohne die gewöhnliche Materie auskommen zu können, indem sie annehmen, daß das Atom nur aus einem System von Elektronen besteht, oder aus einem Kern von positiver Elektrizität, in welchem oder um welchen sich negative Elektronen bewegen.

Noch ein anderer großer Schritt ist in letzter Zeit von verschiedenen Forschern (Campbell, Witte, Einstein, Corbino u. a.) gemacht worden: das vollständige Aufgeben des Äthers. Alle Versuche, die Vorgänge im Äther wenigstens einigermaßen klarzustellen, sind bisher mißlungen, und so kamen jene Forscher auf den Gedanken, die Wissenschaft ohne den Äther aufzubauen; das ist dasselbe, als

wenn man sagt: es gibt keinen Äther. Denn eine Hypothese ist nutzlos, wenn man sie nirgends gebraucht, und die Grundlagen einer solchen Hypothese können ohne Schaden für die Wissenschaft gestrichen werden. Allerdings führt dieser Gedanke zu der Vorstellung, daß die strahlende Energie (z. B. das sichtbare Licht) ein Etwas ist, welches sich selbständig, vielleicht aus „Quanten“ (siehe oben) bestehend, durch den absolut leeren Raum ausbreitet.

Man sieht aus dem obigen, wie verschiedenartig und schwankend gegenwärtig die Grundanschauungen sind; vielleicht wird eine baldige Zukunft hier größere Einfachheit und Klarheit bringen.

Wir werden auch weiterhin zuweilen vom Äther sprechen; doch soll darunter stets nur der Raum verstanden werden, in welchem sich keine Art von gewöhnlicher Materie befindet, aber nicht ein besonderer Stoff, welcher diesen Raum erfüllt.

§ 5. Einteilung der Physik. Zu Anfang des § 2 hatten wir die Physik im weitesten Sinne des Wortes als die Wissenschaft von den in der nichtorganisierten Materie auftretenden Erscheinungen definiert. Die fortschreitende Entwicklung dieser Wissenschaft hat mit der Zeit dazu geführt, daß sich aus ihr umfangreiche Teile abgesondert haben, welche jeder für sich eine durch besondere Kennzeichen bestimmte Erscheinungsgruppe zum Gegenstande haben und zu selbständigen Wissenschaften angewachsen sind. Hierher gehören die Mechanik, Astronomie, Chemie, Mineralogie, Geologie und Meteorologie. Im höchsten Grade bedeutsam ist es, daß die Chemie und Astronomie, welche sich vom Zusammenhange mit der Physik bereits losgesagt hatten, später so ergiebig aus dem reichen Vorrat wissenschaftlichen Materials der Physik zu schöpfen angefangen haben, daß sich umfangreiche, eine Zwischenstellung einnehmende Wissenszweige — die physikalische Chemie und die Astrophysik — entwickelt haben. Diese wenschon einseitige Rückkehr zum alten erprobten Mutterboden hat eine reiche Ernte, eine schnelle Entwicklung jener neuen Zweige der Chemie und Astronomie zur Folge gehabt.

Von der Physik sondert sich ferner eine ganze Reihe von Wissenschaften ab, welche aus dem in ihr enthaltenen wissenschaftlichen Material praktischen Gewinn für die Menschheit zu ziehen suchen. Hierher gehört fast alles, worauf sich die heutige Kultur stützt: die angewandte Mechanik, die Dampftechnik und Elektrotechnik mit ihren umfangreichen Unterabteilungen der Telegraphie, Telephonie, elektrischen Beleuchtung, Galvanoplastik, Kraftübertragung usw.; hierher kann man auch die Photographie rechnen. Alle diese Wissenschaften stützen sich ganz und gar auf die Physik.

Das Material, welches gegenwärtig den wissenschaftlichen Inhalt der Physik darstellt, verteilt man gewöhnlich, je nach dem besonderen

Charakter oder nach einigen äußeren bzw. inneren Merkmalen der Erscheinungen, auf Teile oder Abschnitte. Aber eine solche Einteilung ist stets künstlich; es ist nicht möglich, eine auch nur irgendwie scharfe Grenze zwischen den einzelnen Abschnitten zu ziehen. Nebenbei möge noch darauf hingewiesen werden, daß gerade die sich beständig verringemde Möglichkeit einer strengen Sonderung der einzelnen Abschnitte der Physik das wichtigste Kennzeichen ihrer fortschreitenden Entwicklung ist. Fortlaufend werden gesetzmäßige Beziehungen zwischen den verschiedenartigsten Erscheinungen, welche früher zu verschiedenen Abschnitten der Physik gehörten, entdeckt. Hierdurch werden die Grenzen zwischen den einzelnen Abschnitten weggeräumt, die bisweilen so vollkommen ineinander fließen, daß aus mehreren Abschnitten ein einziger sich bildet; in anderen Fällen werden diese Grenzen undeutlich oder es erscheinen neue Zwischenabschnitte, die auf dem Grenzgebiete zweier Hauptabschnitte liegen. Die Verwickeltheit mancher Erscheinungen, welche sich uns als aus einer Gesamtheit mehrerer Erscheinungen bestehend darstellen, erschwert ebenfalls ihre Einordnung nicht wenig.

Bisweilen teilt man die Physik in zwei Teile: die Experimentalphysik und die theoretische Physik; der ersten weist man hauptsächlich das wissenschaftliche Material zu, welches durch den Versuch erlangt werden kann; zur letzteren rechnet man größtenteils alles, was sich auf deduktivem Wege aus der Erscheinung ableiten läßt; hierbei gründet sich die Deduktion auf eine bestimmte Hypothese und auf festgestellte gesetzmäßige Beziehungen oder nur auf die letzteren. Die theoretische Physik löst, indem sie die Notwendigkeit der beobachteten Erscheinungen als Folgen des Erkannten oder Angenommenen dartut, wiederum durch Deduktion die Frage nach der Form, die eine Erscheinung unter Umständen, unter denen sie noch nicht beobachtet war, annehmen muß — mit anderen Worten, sie sagt eine Erscheinung voraus. Indes ist es vollkommen unmöglich, eine auch nur einigermaßen folgerichtige Teilung der Physik in einen experimentellen und theoretischen Teil durchzuführen, denn bei jeder Gruppe von physikalischen Erscheinungen müssen Versuch und Theorie immer Hand in Hand gehen. Die Theorie setzt uns in den Stand, die beobachteten Erscheinungen zu vereinen, untereinander zu verbinden, und gibt uns, was besonders wichtig ist, die Möglichkeit, die Wege, genauer gesagt, die Versuche ausfindig zu machen, welche zur Prüfung der Hypothesen, d. h. zur Vermehrung oder Verminderung ihres Wahrscheinlichkeitsgrades dienen können. Im weiteren Sinne des Wortes kann die Theorie, während sie ihren deduktiven Charakter beibehält, auch ihres wichtigsten Werkzeuges, der Mathematik, entraten; Faraday war kein Mathematiker und dennoch muß man ihn für den größten Theoretiker halten. Gegenwärtig ist jedoch die Rolle der mathematischen Analyse in der theoretischen Physik von hervorragender Bedeutung geworden, und ohne sie ist ein Fort-

schritt der Physik in vielen wichtigen Abschnitten wohl schwer denkbar. Wenn die Versuche allein und ohne theoretische Verarbeitung nur in seltenen Fällen mehr geben können als rohe, unzusammenhängende Bausteine, so kann auch die „theoretische Physik“ allein, wenn nicht allseitig von Versuchen umgeben, von denen sie ja ausgeht und durch die ihre Ergebnisse nachgeprüft werden, niemals den Nährboden für eine zweckentsprechende Weiterentwicklung der Wissenschaft bilden. Eine solche Theorie ist ohne Grundstein; sie kann zwar viel Anziehendes besitzen, aber sie ist dafür auch gefährlich, denn die gewaltige, zu ihrem Aufbau verwendete Mühe und Arbeit kann durch einen einzigen nachträglich angestellten Versuch völlig verloren gehen, wenn er die Nichtübereinstimmung auch nur einer Folgerung aus dieser Theorie mit der Wirklichkeit beweist. Und solche Fälle hat es in der Geschichte der Physik gegeben: umfangreiche theoretische Untersuchungen vieler Gelehrten haben jeglichen Wert für die Wissenschaft verloren, sind vor einer unerbittlichen, durch das Experiment entdeckten Tatsache zusammengestürzt (wie z. B. die alte Emanationstheorie des Lichtes). Experiment und Theorie müssen vereint die physikalischen Untersuchungen bilden, und deshalb trifft die Einteilung der Physik in einen experimentellen und einen theoretischen Teil in der Praxis auf unüberwindliche Schwierigkeiten.

Trotzdem läßt sich aus der Physik ein Teil aussondern, welcher dadurch gekennzeichnet ist, daß in ihm die Fragen, so verschiedenartig sie auch sein mögen, auf eine besondere Weise gestellt und beantwortet werden. Wir meinen die sogenannte mathematische Physik; sie unterscheidet sich sehr wesentlich von der theoretischen Physik. Die mathematische Physik geht von irgendeiner durch den Versuch völlig erhärteten Tatsache aus, welche irgendeinen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen den Erscheinungen ausdrückt. Diesen Zusammenhang kleidet sie in mathematisches Gewand und verwandelt sich sodann gewissermaßen in die reine Mathematik, indem sie ausschließlich mit Hilfe der mathematischen Analyse die aus den grundlegenden Sätzen hervorgehenden Folgerungen untersucht. Da die mathematische Physik von experimentell festgestellten Tatsachen ausgeht, enthält sie nichts Hypothetisches, und ihre Schlußfolgerungen sind deshalb unvergänglich. Die einzelnen Gebiete der theoretischen Physik können, da sie sich auf Hypothesen stützen, zugrunde gehen; die Gebiete der mathematischen Physik bleiben unerschütterlich fest bestehen, denn ihnen dient als Grundstein die Tatsache, welche als solche bestehen bleibt, wie sich auch im Laufe der Zeit die wissenschaftliche Anschauung von ihrem tieferen Wesen ändern mag. Zur mathematischen Physik gehören die mathematischen Abschnitte der Lehren von der Wärmeleitung, von der Elastizität, von der Elektrizität (die Potentialtheorie und verschiedene Anwendungen derselben), vom Magnetismus (Wechselwirkung und

Induktion), vom elektrischen Strome usw. Die einzelnen Teile der mathematischen Physik haben mit der Physik als der Lehre von den Erscheinungen nur wenig Berührungspunkte gemein; diese Berührungspunkte dienen ihnen nur als unerschütterliche Stützpunkte. Die mathematische Physik gehört eher zur Mathematik als zur Physik.

Über den Nutzen der mathematischen Physik gehen die Ansichten weit auseinander. Ihre Bedeutung wurde vielfach überschätzt; es gab nicht wenige Forscher, welche glaubten, daß nur die Methoden der mathematischen Physik zu einem wirklichen Fortschritt der eigentlichen Physik führen könnten. Aber diese Ansicht ist falsch: nicht die mathematische, sondern die theoretische Physik hat der Wissenschaft unendliche Dienste geleistet, trotzdem sie stets auf dem unsicheren Boden mehr oder weniger vergänglicher Hypothesen aufgebaut wurde.

Der Nutzen, den die mathematische Physik hätte bringen können, ist durch den Umstand verringert worden, daß ihre Ausgangspunkte zwar völlig richtig, aber stets nur in so engen Grenzen gültig sind, daß sie der realen Erscheinungswelt als ideale, praktisch unerreichbare Grenzfälle gegenüberstehen. Die Resultate, zu denen die Rechnungen der mathematischen Physik führen, können daher ebenfalls stets nur angenähert mit dem übereinstimmen, was die direkte Beobachtung ergibt. So geht die mathematische Theorie der Wärmeleitung von der Annahme aus, daß der Wärmeverlust an der Oberfläche eines Körpers proportional sei der Differenz der Temperaturen dieser Oberfläche und des umgebenden Raumes, was nur bei geringen Werten dieser Differenz angenähert richtig ist. Außerdem setzt die Theorie fast immer voraus, daß der Körper homogen sei und daß die Wärmeleitungsfähigkeit und die Wärmekapazität unabhängig von der Temperatur seien, was wohl niemals in aller Strenge der Fall ist. Es würde nicht schwer sein zu zeigen, daß ähnliche Vereinfachungen allen Teilen der mathematischen Physik zugrunde liegen, z. B. der Theorie der Elastizität, der Hydrodynamik, der Elektrostatik, der Elektrodynamik, der Theorie des Magnetismus usw.

Als die verschiedenen physikalischen Messungsmethoden noch nicht den gegenwärtigen Genauigkeitsgrad erreicht hatten, konnten die Formeln der mathematischen Physik benutzt werden, um gewisse Größen, die man nicht direkt messen konnte, deren Wert man aber trotzdem zu bestimmen wünschte, zu berechnen. In dem Maße aber, als sich die Messungsmethoden verfeinerten und entsprechend eine genauere Kenntnis jener Größen angestrebt wurde, sank die Bedeutung der Formeln der mathematischen Physik, und es mußten neue Wege gesucht werden, um jene Größen zu finden, ohne diese Formeln zu benutzen. Ein vorzügliches Beispiel für diesen Entwicklungsgang bietet die Theorie der Wärmeleitung. Als es sich um grobe Messungen, um ungefähre Vergleiche handelte, spielten die Formeln der Wärmeleitungstheorie eine große Rolle. In der letzten Zeit aber sah man sich genötigt, die Be-

nutzung derselben aufzugeben und neue Untersuchungsmethoden zu ersinnen, bei welchen diese Formeln keine Rolle spielen.

Es gibt noch zwei Ursachen, durch welche die Bedeutung der mathematischen Physik herabgesetzt wird. Erstens ist sie in der Lage, relativ nur sehr einfache Aufgaben zu lösen, besonders was die Form der Körper betrifft, auf welche sich die betreffenden Probleme beziehen. In der praktischen Physik ist es aber nicht immer möglich, sich mit jenen einfachen Fällen zu begnügen, und man trifft infolgedessen beständig auf Aufgaben, bei deren Lösung die Methoden der mathematischen Physik versagen.

Zweitens sind die endgültigen Formeln der mathematischen Physik selbst bei sehr einfachen Problemen oft so außerordentlich verwickelt, daß ihre Benutzung praktisch unmöglich wird.

So verringert sich beständig die Bedeutung der rein mathematischen Physik. Der theoretischen Physik, die in der Vergangenheit Großes geleistet hat, gehört auch die Zukunft.

In früherer Zeit hat man häufig die Physik in eine Physik der Materie und eine Physik des Äthers geteilt. Dies geschah besonders zu jener Zeit, als man alle Erscheinungen der strahlenden Energie (Band II), der Elektrizität und des Magnetismus glaubte auf Vorgänge im Äther (§ 4) zurückführen zu können. Aber selbst damals war eine solche Einteilung wohl kaum zweckmäßig, da es unmöglich war, genau zu bestimmen, bei welchen Erscheinungen, selbst nach den damaligen Anschauungen, der Äther keine Rolle spielte. Zu wenig beachtet wurde, daß fast bei allen Vorgängen, an denen der Äther teilnehmen sollte, auch die gewöhnliche Materie mitwirkt, so daß eigentlich kein Grund vorlag, diese Vorgänge in einer besonderen „Physik des Äthers“ zu betrachten. Es gab nur einen einzigen Vorgang, der ausschließlich dem Äther zugeschrieben wurde, nämlich die Ausbreitung strahlender Energie im sogenannten leeren Raume. Andererseits konnte man nicht sicher sein, daß bei den Erscheinungen, die man in der Physik der Materie betrachtete, der Äther wirklich gar keine Rolle spielte. Hätte es sich herausgestellt, daß der Äther bei diesen Erscheinungen mitwirkt, so hätte man sie aus der Physik der Materie konsequenterweise in die Physik des Äthers herübernehmen müssen, und als Endresultat wäre die Physik der Materie vielleicht gänzlich verschwunden.

Aber es ist, wie wir in § 4 sahen, ganz anders gekommen! Durch die Lehre von den Elektronen ist ein ganz neues grundlegendes Element in die Physik hineingelangt, die Materie wurde „elektrisiert“, und der Äther scheint auf dem Wege zu sein, gänzlich aus der Wissenschaft zu verschwinden. Gegenwärtig (1917) darf man wohl kaum noch von einer besonderen Physik des Äthers sprechen.

Jede Einteilung der Physik, die auf bestimmten hypothetischen Vorstellungen beruht, ist unzweckmäßig, da die Hypothesen häufigen

und oft tiefgreifenden Änderungen unterworfen sind, durch welche solche künstliche Einteilungen von selbst fallen. Es wäre daher ebenfalls gänzlich unzweckmäßig, wenn wir, dem augenblicklichen Zustande der Wissenschaft entsprechend, die Physik z. B. in eine Physik der Materie und eine Physik des Elektrons teilen würden.

§ 6. Physikalische Größen. Eine Größe wird das genannt, was man sich quantitativ veränderlich denken kann.

Das Studium der physikalischen Erscheinungen und der sie verknüpfenden gesetzmäßigen Beziehungen hat es notwendig gemacht, in die Wissenschaft die Vorstellungen von einer sehr großen Zahl verschiedenartiger Größen einzuführen, welche entweder die besonderen Eigenschaften dieses oder jenes Stoffes oder die Eigentümlichkeiten der Erscheinungen selbst kennzeichnen. Diese Größen werden wir physikalische Größen nennen.

Man hat die Größen, von denen jedermann einen Begriff oder eine gewisse feste Vorstellung zu eigen hat, streng von denen zu unterscheiden, die in die Wissenschaft neu eingeführt werden. Die Größen dieser ersten Art heißen ursprüngliche; sie können einer Definition nicht unterliegen, denn jede Definition kann und muß durch den Hinweis auf den Zusammenhang zwischen der zu definierenden Größe und etwas schon Bekanntem, d. h. schon vorher einer Definition unterworfenen geschehen. Die Größen der ersten Art aber entsprechen ursprünglichen Begriffen, von denen man auszugehen hat; sie bedürfen auch keiner Definition, da ihre Bedeutung einem jeden a priori klar ist. Die Eigenschaften dieser Größen werden durch die Vorstellung bestimmt, welche von allen mit ihrer Nennung verbunden werden, und deshalb hat jedermann die Bedeutung dieser Eigenschaften in sich selbst zu suchen. Zu den Größen dieser Art gehören jedenfalls:

1. Die lineare, flächenhafte und räumliche Ausdehnung oder genauer: die Länge einer Geraden, der Inhalt einer geradlinig begrenzten ebenen Fläche und das Volumen eines von Ebenen begrenzten Raumteiles. Die Länge einer krummen Linie entspricht schon einem nicht ursprünglichen Begriffe und bedarf daher der Definition.

2. Die Zeit.

3. Der Druck (im Sinne einer Muskelempfindung).

4. Die Geschwindigkeit einer gleichförmigen, geradlinigen Bewegung.

Wir lassen die Frage nach der Vollständigkeit oder Unvollständigkeit dieser Aufzählung unerörtert. Größen, von denen nicht jedermann einen bereits fertigen Begriff hat, bedürfen, wenn wir sie in die Wissenschaft einführen, einer Definition, und man hat mit der größten Aufmerksamkeit darauf zu achten, daß diese Definition so genau wie möglich sei; sie muß derart sein, daß jede Möglichkeit eines Mißverständnisses und jede Zweideutigkeit ausgeschlossen ist. Die Definition muß sich

daher durch Vollständigkeit auszeichnen, d. h. in ihr muß alles das enthalten sein, was als unterscheidendes Merkmal der zu definierenden Größe dienen kann.

Nachdem die Definition der betreffenden Größe gegeben ist, hat man sich aufs strengste davor zu hüten, daß man ihr keine neuen Eigenschaften beilegt, welche aus der Definition selbst nicht folgen. Besonders leicht können Fehler dieser Art vorkommen, wenn mit der unglücklich gewählten Bezeichnung für die Größe unwillkürlich die Vorstellung von dieser oder jener Eigenschaft sich verbindet.

Größen, welche ein und derselben Definition entsprechen und sich nur qualitativ voneinander unterscheiden, heißen gleichartige Größen. Solche Größen können miteinander verglichen werden, oder, wie man sich sonst noch ausdrückt, sie können gemessen werden. Eine Größe messen heißt bestimmen, wievielmals in ihr eine gewählte Größe derselben Art enthalten ist; diese wird dann als Einheit dieser Art Größe (Einheit des Gewichtes, Einheit des Widerstandes usw.) bezeichnet. Von der Wahl der Maßeinheiten wird weiter unten ausführlich die Rede sein; es sei hier nur bemerkt, daß man danach strebt, für jede Art von Größe eine bestimmte Einheit mit ihren nach dem Dezimalsystem geteilten Vielfachen und Unterabteilungen festzusetzen und international zu verbreiten. Zwei Größen können miteinander nach zwei Methoden verglichen werden: entweder wird eine jede von ihnen einzeln durch die festgesetzte Einheit gemessen, und es werden sodann die erhaltenen zahlenmäßigen Resultate verglichen, oder es werden zwei Größen unmittelbar miteinander verglichen, wobei dann tatsächlich die eine von ihnen, wenn auch nur vorübergehend, die Rolle einer Maßeinheit spielt.

Es gibt kein Gesetz, das vorschreibt, welche Einheit man für eine bestimmte Größenart wählen soll; wir können daher jede beliebige Größe der gegebenen Art als Einheit annehmen. Wir werden indes später sehen, daß man sich gegenwärtig aus verschiedenen Gründen von einer Willkür bei Wahl dieser Einheiten losgesagt hat. Man hat sich nämlich dahin geeinigt, sie auf Grund einer bestimmten Regel auszuwählen, welche uns in den Stand setzt, die Einheiten aller in der Physik vorkommenden Größen miteinander zu einem harmonischen Ganzen, dem System der Einheiten, zu verbinden.

Die Messung einer physikalischen Größe bedeutet demnach die Vergleichung einer gegebenen Größe mit der festgesetzten Einheit oder die unmittelbare Vergleichung zweier gegebenen Größen miteinander. Hierzu dienen besondere Instrumente und zu dem bestimmten Zwecke erdachte und ausgearbeitete Verfahren. Die Genauigkeit des bei der Messung erhaltenen Ergebnisses hängt von den verschiedenen, bisweilen recht individuellen Eigenschaften der Meßinstrumente, des Meßverfahrens und von Geschick und Übung des die Messung Ausführenden ab.

Als Ergebnis der vorgenommenen Messung erhält man eine Zahl, welche angibt, wievielmals die gewählte Einheit in der zu messenden Größe enthalten ist. Diese Zahl heißt der Zahlenwert der gemessenen physikalischen Größe. Wenn man die gesetzmäßige Abhängigkeit der Erscheinungen zu untersuchen und auszudrücken hat, ersetzt man gewöhnlich die arithmetische Methode durch die algebraische, indem man den Zahlenwert der Größe durch einen Buchstaben bezeichnet. Man muß aber wohl beachten, daß diese Buchstaben nicht die Größen selbst, sondern ausschließlich ihre Zahlenwerte darstellen. Vergißt man dies, so kann man zu ganz falschen Resultaten gelangen; hierbei rührt die Möglichkeit fehlerhafter Vorstellungen daher, daß man jenen Buchstaben die Benennungen der Größen selbst beilegt. Man sagt z. B. die Länge l , die Wärmemenge q , die Stromstärke i , während doch l nicht die Länge, q nicht die Wärmemenge und i nicht die Stromstärke selbst bedeuten; l , q und i sind bloß Zahlen, welche angeben, wieviel Einheiten der Länge, Wärme und Stromstärke in der betrachteten Länge, Wärmemenge und Stromstärke enthalten sind.

Der Zahlenwert einer jeden Größe ist der Größe der gewählten Einheit umgekehrt proportional. Denn wird die Einheit n mal größer, so wird die Zahl, welche angibt, wievielmals die gegebene Größe diese Einheit enthält, n mal kleiner. Daß jene Buchstaben, von denen oben die Rede war, z. B. die angeführten Buchstaben l , q und i , nicht die physikalischen Größen selbst, sondern bloß ihre Zahlenwerte bezeichnen, ergibt sich daraus, daß ihr Wert sich zugleich mit der Wahl der Einheit ändert; wenn man dagegen unter q eine physikalische Größe selbst, die in jedem Einzelfalle gegeben und offenbar von der Wahl der Maßeinheit unabhängig ist, sich gedacht hätte, so würde auch der Wert des Buchstaben q sich nicht zugleich mit dieser Einheit ändern.

Im folgenden werden wir bisweilen Größen begegnen, deren Zahlenwert in jedem Sonderfalle nicht von der Wahl irgendwelcher Maßeinheiten abhängt; man nennt sie abstrakte oder (weniger zutreffend) absolute Zahlen und bezeichnet sie gewöhnlich ebenfalls durch Buchstaben. Es läßt sich aber stets beweisen, daß die Größe, die wir hier im Auge haben, nur scheinbar eine absolute Zahl darstellt; sie ist vielmehr eine physikalische Größe, für welche die Einheit ein für allemal festgesetzt ist. Betrachten wir das folgende Beispiel. Aus der elementaren Physik ist es bekannt, daß man unter dem Brechungsquotienten eines Stoffes das Verhältnis vom Sinus des Einfallswinkels eines Strahles zum Sinus des Brechungswinkels beim Übergang aus dem Vakuum (d. h. aus dem Äther) in jenen Stoff versteht. Durch diese Definition erhält der Brechungsquotient n das Kennzeichen einer unbenannten Zahl (als Verhältnis zweier unbenannten Zahlen) und kommt ihm eine Einheit, von deren Wahl sein Zahlenwert abhängen könnte, nicht zu. Indes ist zu

beachten, daß die Wahl des Vakuums als Bezugsstoff willkürlich ist; die Zahlenwerte aller Größen n ändern sich aber, sobald man sie nicht auf den Übergang aus dem Vakuum, sondern etwa aus der Luft oder einem anderen Stoff bezieht. Die Unveränderlichkeit der Zahlenwerte für den Brechungsquotienten ist daher keine absolute. Man kann sogar noch weiter gehen und folgende Betrachtung anstellen: Die Materie hat unter anderem die Fähigkeit, auf den sich in ihr fortpflanzenden Lichtstrahl einzuwirken. Diese Eigenschaft wird ähnlich vielen anderen durch eine gewisse physikalische Größe dargestellt, welche für die verschiedenen Stoffe quantitativ verschieden ist. Wenn man nun diese Größe für den Äther (siehe § 4) als Einheit annimmt, so findet man, daß ihr Zahlenwert für die verschiedenen Stoffe gleich dem Verhältnis der erwähnten beiden Sinusse wird. Mit Hilfe der Theorie können wir diese Größe noch genauer bestimmen. Sie ist nämlich die Langsamkeit (der reziproke Wert der Schnelligkeit) der Lichtausbreitung im gegebenen Stoffe, und ihr Zahlenwert hängt folglich jedesmal von der Wahl des Stoffes ab, für welchen diese Langsamkeit als Einheit angenommen wurde. Nur in dem Falle, wo man die „Langsamkeit“ im Äther als Einheit festlegt, erhält man für ihren Zahlenwert in einem anderen Medium das Sinusverhältnis. Sicherlich werden diese Darlegungen manchem gekünstelt erscheinen, aber sie beweisen unzweideutig, daß der Brechungsquotient keine absolute Zahl ist. Als physikalische Größen dürfen die absoluten Zahlen nur dann benutzt werden, wenn dies zur Vereinfachung dient. Ist dies der Fall, so soll man sie unbedenklich anwenden, aber keinesfalls darf man sie unnötigerweise einführen, wenn der allgemeinere Größenbegriff da, wo der Zahlenwert von der gewählten Einheit abhängt, unmittelbar aus den beobachteten Erscheinungen sich ergibt. So darf man auch die vollkommen überflüssige Zweiteilung einer nach ihrer innerlichen Bedeutung einheitlichen physikalischen Größe in zwei, von welchen die eine als benannte, die andere als unbenannte Zahl aufgefaßt wird, nicht gutheißen. Als auf ein Beispiel sei hier auf die Dichte und das spezifische Gewicht hingewiesen. Man sagt bisweilen, die Dichte ist das Gewicht oder ist die Masse der Volumeneinheit, das spezifische Gewicht aber ist eine unbenannte Zahl, welche gleich dem Verhältnis von Gewicht oder Masse eines Stoffes zu Gewicht oder Masse des Wassers ist usw. Alles dies ist nicht nur vollkommen überflüssig, sondern beruht auch auf einer fehlerhaften Ansicht über das Wesen der physikalischen Formeln, wovon im folgenden Paragraphen ausführlich gesprochen werden soll. Die Dichte ist weder ein Gewicht noch eine Masse. Auch liegt kein zwingender Grund vor, den Begriff des spezifischen Gewichtes als einer abstrakten Zahl einzuführen. Die Sache verhält sich in Wirklichkeit vielmehr folgendermaßen: Um gewisse Eigenschaften eines gegebenen Stoffes zu beschreiben, kann man eine besondere Art von Größe einführen, die für ihn bezeichnend

ist; man kann sie willkürlich benennen, wir wollen ihr den Namen Dichte beilegen. Diese Größe ist selbstverständlich eine Größe eigener Art (*sui generis*) und kann schon deshalb weder eine Masse, noch auch ein Gewicht sein, denn diese sind physikalische Größen anderer Art. Wie eine jede physikalische Größe hat auch sie ihre besondere Einheit, die willkürlich gewählt sein kann, die aber dennoch nichts anderes sein kann als wiederum eine Dichte. Dem Zahlenwerte dieser Größe bei bestimmter Wahl der Einheit (die Dichte des Wassers wird als Einheit der Dichte angenommen) eine besondere Benennung beizulegen, ist vollkommen überflüssig und bringt nur eine Verwirrung der Begriffe hervor (siehe auch § 7 und Kap. II, § 4).

Im § 1 war gesagt worden, daß Raum und Zeit den doppelten Hintergrund bilden, vor welchem sich die von uns empfangenen Eindrücke vergegenständlichen, und zu Beginn des § 6 waren Raumausdehnung, Zeit und Druck als ursprüngliche Vorstellungen bezeichnet worden, welche keiner Definition bedürfen und daher auch nicht definiert werden können. Der Begriff des Druckes wird aus der subjektiven Empfindung der Kraftanstrengung gewonnen, welche nötig ist, um einem äußeren Druck das Gleichgewicht zu halten; eine Definition seines Wesens ist nicht möglich. Die Messung von Längen, Zeiten und Drucke ist eine der wichtigsten Aufgaben der Physik, und es ist daher angebracht, schon hier einige Worte über die Einheiten mitzuteilen, durch welche diese drei Größen jetzt vorzugsweise gemessen werden.

Als Einheit der Länge dient das Meter, dieses ist gleich der Länge eines am Ende des 18. Jahrhunderts angefertigten und zu Paris aufbewahrten Stabes bei 0°. Es weist einen merklichen Unterschied gegen den zehnmillionten Teil des Pariser Meridianquadranten auf, welcher ursprünglich als Meter definiert wurde. Das internationale Komitee der Maße und Gewichte nahm am 2. Oktober 1879 eine Reihe abgekürzter Bezeichnungen für die verschiedenen Längeneinheiten an. Für das Meter wurde das Zeichen *m* festgesetzt. Tausend Meter heißen Kilometer (*km*); das Meter wird in zehn Dezimeter (*dm*), hundert Zentimeter (*cm*) und tausend Millimeter (*mm*) geteilt; der tausendste Teil eines Millimeters heißt Mikron (μ); der millionte Teil eines Millimeters wird durch das Zeichen $\mu\mu$ bezeichnet. Die Einheiten der Länge werden auch lineare Einheiten genannt. Als Einheit der Oberfläche oder des Flächeninhalts gilt die Größe eines Quadrats, dessen Seite der linearen Einheit gleichkommt. Die Einheit des Raummaßes oder des Volumens ist das Volumen eines Würfels, dessen Kanten gleich der linearen Einheit sind; das Kubikdezimeter kann in den meisten Fällen auch als Liter bezeichnet werden; eine genauere Definition wird weiter unten gegeben werden.

Als Einheit der Zeit müssen wir, wenn wir streng wissenschaftlich verfahren wollen, die Zeit annehmen, in der eine bestimmte Erscheinung zustande kommt; zweckmäßig wählt man letztere derart, daß sie sich

unter völlig gleichen Umständen, d. h. ohne jegliche Veränderung der sie verursachenden Erscheinungsgruppe, eine unbestimmte Anzahl Male wiederholen kann. Diesen Bedingungen genügt die Schwingung eines beliebigen Pendels; die Zeit einer Schwingung kann daher als Einheit der Zeit angesehen werden. Wenn man sich nun dieser Einheit bedient, so zeigt der Versuch, daß die Erde sich um ihre Achse gleichförmig dreht, und dieses gibt uns sodann die wissenschaftliche Grundlage und das Recht dazu, als Zeiteinheit die Umdrehungszeit der Erde um ihre Achse anzunehmen bzw. ein hierzu in einfacher Beziehung stehendes Zeitintervall. Es ist das der sogenannte mittlere Sonnentag, welcher in 24 Stunden, $24 \times 60 = 1440$ Minuten und $24 \times 60 \times 60 = 86400$ Sekunden zerfällt. Historisch ist bei der Wahl der Zeiteinheit der umgekehrte Weg verfolgt worden.

Ausgehend von der subjektiven Vorstellung vom Drucke überzeugt man sich davon, daß auf der Erdoberfläche jeder ruhende Körper auf seine Unterlage einen Druck ausübt. Dieser Druck heißt das Gewicht des Körpers; da dieses nur einen Einzelfall des Druckes darstellt, so müssen beide die gleiche Einheit besitzen. Man ist übereingekommen, daß das Gewicht, d. h. der Druck, welchen in Paris ein ganz bestimmter Körper auf seine Unterlage im luftleeren Raume ausübt, die Einheit des Druckes und Gewichtes sein soll. Derselbe wurde zu Ende des achtzehnten Jahrhunderts aus Platin verfertigt und wird in Paris aufbewahrt. Diese Einheit des Gewichtes und Druckes heißt Kilogramm. Ein Kubikdezimeter reinen Wassers bei 4°C hat ein Gewicht von nahezu einem Kilogramm. Das Volumen eines Kilogramms reinen Wassers von 4°C gilt gegenwärtig als genaue Definition eines Liters. Das Kilogramm wird bezeichnet mit kg; es wird in 1000 Gramm (g) geteilt; das Gramm ist gleich 10 Dezigramm (dg), 100 Zentigramm (cg) und 1000 Milligramm (mg). Aus dem Vorhergehenden folgt, daß das Gewicht eines Kubikzentimeters reinen Wassers von 4°C nahezu einem Gramm gleichkommt, und daß ein Liter nahezu gleich einem Kubikdezimeter ist.

Grammolekül heißt die Menge eines Stoffes, deren Gewicht gleich soviel Grammen ist, als Einheiten in dem Molekulargewicht der Substanz enthalten sind. So ist z. B. das Grammolekül des Wassers gleich 18 Gramm Wasser, das Grammolekül des Sauerstoffs gleich 32 Gramm Sauerstoff usw.

Zum Unterschiede von anderen Einheiten werden wir im weiteren die eben betrachteten Einheiten bisweilen als die französischen bezeichnen.

§ 7. Physikalische Gesetze. Das Aufsuchen eines gesetzmäßigen Zusammenhanges zwischen verschiedenen physikalischen Erscheinungen führt zur Entdeckung der physikalischen Gesetze. Durch diese wird die nähere Art des Zusammenhanges der verschiedenen

physikalischen Größen untereinander nach der qualitativen oder quantitativen Seite festgestellt. Die physikalischen Gesetze handeln fast ausschließlich von den quantitativen Beziehungen, d. h. durch sie wird festgelegt, auf welche Art sich eine Größe quantitativ verändert, falls eine andere, mit ihr gesetzmäßig zusammenhängende Größe um einen bestimmten Betrag größer oder kleiner wird.

Die Zahl der physikalischen Gesetze, welche nur die qualitative Seite der Erscheinungen behandeln, ist verhältnismäßig gering. Ihre Bedeutung ist auch nicht groß, da sie nur die äußeren Kennzeichen der Erscheinungen behandeln und immer verborgen ein noch nicht entdecktes quantitatives Gesetz enthalten. Nicht selten mißbraucht man auch den Ausdruck „Gesetz“, indem man dies Wort anwendet, wo es richtiger wäre, von einer Regel zu sprechen.

Ein physikalisches Gesetz wird auf folgende Weise entdeckt und geprüft. Bezeichnen wir symbolisch durch A und B zwei physikalische Größen (hier sind nicht etwa ihre Zahlenwerte gemeint), dann wird das Gesetz mathematisch als Abhängigkeit zwischen den Zahlenwerten a und b der Größen A und B ausgedrückt. Um diesen Zusammenhang zu entdecken, muß man den Versuch oder die Beobachtung so einrichten, daß die Größe A eine Reihe quantitativ verschiedener Werte annehmen kann, infolgedessen sich auch die Größe B quantitativ ändern wird. Hierbei müssen sich die Größen A und B jedesmal messen lassen, d. h. es muß möglich sein, ihre Zahlenwerte zu bestimmen, wobei für die eine wie für die andere Größe bestimmte Einheiten gewählt sein müssen.

Als unmittelbares Resultat der Versuche und Beobachtungen ergeben sich alsdann zwei Reihen von Zahlen, welche die Zahlenwerte dieser beiden physikalischen Größen sind und die, wie wir sahen, von der Wahl der Maßeinheiten abhängen. Die Zahlen beider Reihen sind natürlich zusammengehörig, einer jeden Zahl a der einen Reihe entspricht eine Zahl b der anderen. Das gesuchte Gesetz sagt nun aus, daß alle Zahlen a aus den Zahlen b mit Hilfe ein und derselben arithmetischen Operation erhalten werden können, indem man letztere in denselben algebraischen, b enthaltenden Ausdruck einsetzt. Symbolisch wird dies durch die Gleichung $a = f(b)$ ausgedrückt, d. h. a ist irgend eine Funktion von b . Hierbei muß man aber zwei eine sehr wichtige Rolle spielende Umstände beachten.

Erstens kann kein Versuch, keine Beobachtung uns die gesuchten Zahlenwerte a und b mit völliger Genauigkeit geben. Dies wird im dritten Abschnitte genauer betrachtet werden. Die unvermeidlichen sogenannten „Beobachtungsfehler“ liefern im Resultat ungenaue Werte der Zahlen a und b , welche im allgemeinen dem zuvor erwähnten Ausdrucke nicht genügen. Beide Seiten des Ausdruckes sind niemals einander genau gleich. Es ist hierbei Sache des Beobachters, durch

kritische Untersuchung der Messungsergebnisse zu entscheiden, ob die auftretenden Abweichungen sich durch wirkliche Beobachtungsfehler erklären lassen oder ob die hypothetisch angenommene Gesetzmäßigkeit $a = f(b)$ versagt.

Zweitens ist in den Zahlen a und b selbst etwas Willkürliches enthalten infolge der willkürlichen Wahl der Größeneinheiten für A und B . Wenn wir andere Einheiten genommen hätten, so würden die Zahlen beider Reihen mit ein und demselben konstanten Faktor multipliziert auftreten, und zwar wäre dieser Faktor gleich dem Verhältnis der früheren Größeneinheit zur neuen. Äußerlich gibt sich dieses Willkürliche darin zu erkennen, daß in dem Ausdrucke, welcher b enthält und der gleich a sein soll, ein oder mehrere Zahlen enthalten sind, deren spezieller Wert, d. h. deren Größe nicht bezeichnend für das physikalische Gesetz selbst ist, sondern von der Wahl der Einheiten für A und B abhängt. Diese Zahlen heißen allgemein Koeffizienten. Einer von ihnen kann immer als Faktor, welcher allen Gliedern des Ausdruckes $f(b)$ gemein ist, angesehen werden. Er heißt der Proportionalitätsfaktor; sein Wert hängt jedenfalls von der gewählten Einheit für die Größe A ab. Verallgemeinernd kann man sagen:

In den Ausdrücken für physikalische Gesetzmäßigkeiten, $a = f(b)$, müssen Koeffizienten enthalten sein, deren Zahlenwerte für die Form des Gesetzes nicht bezeichnend sind, und welche von der Wahl der Einheiten abhängen, mit denen wir die im Gesetze erwähnten physikalischen Größen messen.

Bisweilen sagt man, der Proportionalitätsfaktor selbst habe eine bestimmte physikalische Bedeutung, indem er den Zahlenwert irgendeiner bestimmten neuen physikalischen Größe darstellt. Das ist unrichtig. In allen Fällen, wo sich scheinbar etwas Ähnliches zeigt, beruht dies darauf, daß das von uns ursprünglich aufgestellte Gesetz nicht alle Seiten der Erscheinungen umfaßt, daß also die Größe A nicht nur von der Größe B , sondern noch von den Größen C , D usw. abhängt. Wenn man allen diesen Abhängigkeiten auf den Grund geht, so erweist es sich jedesmal, daß der Proportionalitätsfaktor eine Zahl und nur eine Zahl ist und nicht als Zahlenwert irgendeiner physikalischen Größe angesehen werden kann.

Wir wollen an einem Beispiele erläutern, wie man ein physikalisches Gesetz auffindet und in eine Formel bringt.

Aus der elementaren Physik ist bekannt, eine wie wichtige Rolle die physikalische Größe spielt, welche man Stromstärke nennt, und daß es Methoden gibt, sie zu messen, wobei eine gewisse bestimmte Stromstärke als Einheit angenommen wird. Die Beobachtungen zeigen, daß im Leitungsdrahte, durch welchen der Strom fließt, sich Wärme entwickelt, welche, wie jede Größe, durch ihre eigene, übrigens willkürliche Einheit gemessen wird. Aus den Versuchen geht ferner hervor, daß die

im Drahte entwickelte Wärmemenge abhängt von der Stromstärke und der Zeitdauer, innerhalb welcher die Erscheinung des Stromes andauert; außerdem hängt sie auch noch vom sogenannten Widerstande des Drahtes ab, einer Größe, welche man ebenfalls durch eine besondere Einheit des Widerstandes mißt. Um einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Erscheinung der Wärmeentwicklung im Drahte und der Erscheinung des elektrischen Stromes zu finden, muß man somit drei Gesetze aufsuchen, welche die Abhängigkeit der Wärmemenge Q von der Stromstärke J , dem Widerstande W und der Zeit T (der Stromdauer) ausdrücken. Hierzu hat man drei Doppelreihen von Messungen auszuführen.

Zunächst bestimmt man die Zahlenwerte q und i für die Wärmemenge und Stromstärke, während Stromdauer und Widerstand ungeändert bleiben; hierzu muß man durch ein und denselben Draht während der gleichen Zeit Ströme von verschiedener Stärke senden und jedesmal die Zahlen q und i bestimmen. Betrachtet man sodann die beiden erhaltenen Zahlenreihen, so überzeugt man sich, daß alle die Zahlen q erhalten werden durch Multiplikation des Quadrats vom zugehörigen i mit ein und demselben Faktor, welcher mit C_1 bezeichnet werde; somit findet man, daß $q = C_1 i^2$ ist. Es ist klar, daß man einen anderen Wert für den Koeffizienten C_1 erhalten hätte, falls man die Größen Q und J durch andere Einheiten gemessen hätte — in diesem Falle hätten sich für q und i lauter andere Zahlen ergeben. Wenn man, ohne die Einheiten der Größen Q und J zu ändern, einen anderen Draht gewählt oder die Stromdauer geändert hätte, so hätte man ebenfalls ein anderes C_1 erhalten. Hierdurch wird erwiesen, daß Q nicht nur von J abhängt, sondern noch von anderen Umständen, und daß durch die Formel $q = C_1 i^2$ der gesetzmäßige Zusammenhang, der sich in der untersuchten Erscheinung kundgibt, nicht allseitig wiedergegeben ist.

Ändert man den Draht bei unveränderter Stromstärke und -dauer und mißt man dabei jedesmal den Widerstand W und die Wärmemenge Q , so erhält man abermals zwei Reihen von Zahlen w und q . Dabei ergibt sich, daß die Zahlen q durch Multiplikation der entsprechenden w mit ein und derselben Zahl, welche wir mit C_2 bezeichnen, gewonnen werden. Dies gibt uns die Formel $q = C_2 w$; die Zahl C_2 hängt von den Einheiten ab, durch welche die Wärmemenge und der Widerstand gemessen werden. Wenn man endlich die Stromstärke und den Widerstand des Drahtes ungeändert läßt und die Zeit t und die Wärmemenge mißt, so erhält man die dritte Beziehung $q = C_3 t$.

Aus den drei Versuchsreihen ergibt sich somit, daß der Zahlenwert q für die Wärmemenge sich proportional dem Quadrate des Zahlenwertes i für die Stromstärke, proportional dem Zahlenwerte w für den Widerstand und proportional dem Zahlenwerte t für die Zeit ändert. Hieraus folgt,

daß q dem Produkt der Zahlen i^2 , w und t proportional ist, d. h. wenn man die Größen J , W und T willkürlich ändert und jedesmal Q mißt, so erhält man sämtliche Zahlen q durch Multiplikation der Produkte $i^2 w t$ mit ein und derselben Zahl, die wir C nennen wollen. Dies wird durch folgende Formel wiedergegeben:

$$q = C i^2 w t \dots \dots \dots (1)$$

Hier ist der Proportionalitätskoeffizient C eine Zahl, deren Wert bloß von der Wahl der Einheiten für die Wärmemenge, Stromstärke, Zeit und den Widerstand abhängt. Man darf es nicht vergessen, daß alle physikalischen Formeln, die der vorstehenden (1) ähnlich sind, den Zusammenhang zwischen Zahlenwerten verschiedener Größen ausdrücken, und daß daher die in den Formeln vorkommenden Buchstaben die Zeichen für Zahlen sind. Man hat dies um so mehr im Gedächtnis zu behalten, als es allgemein üblich ist, die physikalischen Gesetze verkürzt zu fassen, wobei man die Größen selbst nennt, anstatt von Zahlenwerten der Größen zu sprechen. Statt das Gesetz richtig auszudrücken, wie es oben geschehen ist, pflegt man es folgendermaßen auszusprechen: die Wärmemenge, welche im stromdurchflossenen Drahte entwickelt wird, ist proportional dem Quadrate der Stromstärke, proportional dem Drahtwiderstande und proportional der Stromdauer. Wir werden weiter unten sehen, zu welchen gefährlichen Folgen eine derartige verkürzte Fassung in Einzelfällen führen kann.

Der Proportionalitätskoeffizient hat stets mehrere (mindestens zwei) physikalische Bedeutungen. Um dies zu beweisen, beschränken wir uns auf ein Beispiel. Die Formel (1) zeigt, daß für $i = 1$, $w = 1$ und $t = 1$ die Zahl $q = C$ wird. Hieraus folgt, daß die Zahl C gleich der Anzahl Wärmeeinheiten ist, welche während der Zeiteinheit in einem Drahte entwickelt werden, dessen Widerstand gleich der Einheit ist und durch welchen (wie man es auszudrücken pflegt) die Einheit des Stromes fließt. Dieselbe Formel ergibt jedoch für $q = 1$, $i = 1$ und $t = 1$, daß $C = 1:w$ ist. In diesem Falle ist die Zahl C gleich der Zahl 1, dividiert durch die Zahl der Widerstandseinheiten des Drahtes, in welchem in der Zeiteinheit durch die Stromeinheit die Einheit der Wärmemenge entwickelt wird.

Setzt man $q = 1$, $i = 1$, $w = 1$, so folgt ferner, daß $C = \frac{1}{t}$ und für $q = 1$, $w = 1$, $t = 1$, daß $C = 1:i^2$ ist. Hieraus ergeben sich noch zwei leicht zu formulierende Bedeutungen der Zahl C . Offensichtlich hängt also der Wert des Proportionalitätskoeffizienten C von der Wahl der Einheiten ab, durch welche die in den Formeln vorkommenden Größen gemessen werden. Bei unendlich mannigfaltigen Einheiten kann auch der Koeffizient C alle nur erdenklichen Zahlenwerte annehmen.

Wenn wir dem Proportionalitätskoeffizienten einen bestimmten, willkürlich gewählten Zahlenwert beilegen, so ist es nicht mehr möglich, die Einheiten aller in unserer Formel vorkommenden Größen willkürlich zu wählen. Eine dieser Größen wird hierdurch festgelegt, wobei wir es jedoch in der Hand haben, zu bestimmen, für welche von den Größen die Einheit nicht mehr wählbar bleiben soll. Die Einheit dieser Größe erweist sich dabei als eindeutig bestimmt; sie erscheint dann gewissermaßen von selbst im Zusammenhange mit den von uns gewählten übrigen Einheiten und dem Proportionalitätskoeffizienten. Nehmen wir beispielsweise an, wir machten den Koeffizienten C in der Formel (1) gleich fünf, so daß also $q = 5 i^2 w t$ werde, und wählen wir die Einheiten der Größen Q , J und T willkürlich, so erhalten wir für $q = 1$, $i = 1$ und $t = 1$ offenbar $w = 1/5$ und hieraus folgt, daß, wenn man die Einheiten der Wärmemenge, der Stromstärke und Zeit willkürlich gewählt hat, als Einheit des Widerstandes unbedingt das Fünffache des Widerstandes eines solchen Drahtes zu gelten hat, in welchem bei Einheit der Stromstärke in der Einheit der Zeit die Einheit der Wärmemenge entwickelt wird. Es ist danach nicht schwer zu bestimmen, welche Einheiten für die Wärmemenge oder Stromstärke oder die Zeit zu nehmen wären, wenn die Einheiten der drei übrigen Größen jedesmal willkürlich gewählt würden.

Sehr häufig setzt man den Proportionalitätskoeffizienten gleich 1. Die Formel (1) nimmt dann die Form $q = i^2 w t$ an. Wenn wir z. B. die Einheiten der Wärmemenge, des Widerstandes und der Zeit willkürlich gewählt hätten, so müßten wir in diesem Falle als Einheit der Stromstärke die Stärke des Stromes annehmen, der in der Zeiteinheit in einem Drahte mit der Einheit des Widerstandes die Einheit der Wärmemenge entwickelt, denn bei $w = 1$, $t = 1$ und $q = 1$ ergibt unsere Formel $i = \pm 1$. Das doppelte Vorzeichen bedeutet, wie wir später sehen werden, daß dieser Strom eine beliebige Richtung haben kann.

Wir hatten vorhin auf die oftmals auftretende Behauptung hingewiesen, daß der Proportionalitätskoeffizient bisweilen die Bedeutung einer physikalischen Größe haben könne, welche durch ihre besondere Einheit gemessen werde, und hatten erwähnt, daß dies unrichtig sei, daß man es vielmehr in ähnlichen Fällen mit einem unvollständigen Ausdrucke des Gesetzes zu tun habe, welcher nicht alle Seiten der gegebenen Erscheinung umfasse. Als Beispiel hierfür untersuchen wir die Wärmeleitung in einer aus irgendeinem Stoffe bestehenden Platte für den Fall, daß eine ihrer Flächen auf der konstanten Temperatur T_1 , die andere auf der niedrigeren Temperatur T_2 erhalten wird. Es möge der Flächeninhalt jeder dieser Flächen der Platte gleich s Flächeneinheiten und ihre Dicke gleich d Längeneinheiten sein. Wir führen eine Versuchsreihe aus und messen die Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$,

den Flächeninhalt s , die Zeit t , die Wärmemenge q und endlich die Dicke d für verschiedene, aus demselben Material bestehenden Platten. Die Versuche zeigen uns sodann, daß die Zahlen q proportional den Zahlen s , den Zahlen t und den Zahlen $T_1 - T_2$ sowie umgekehrt proportional den Zahlen d sind. Bezeichnet man den Proportionalitätskoeffizienten mit k , so erhält man die Formel

$$q = kst \frac{T_1 - T_2}{d} \dots \dots \dots (2)$$

Gewöhnlich schließt man nun folgendermaßen: setzt man in dieser Formel $s = 1$, $t = 1$, $T_1 - T_2 = 1$ (d. h. 1°) und $d = 1$, so findet man $q = k$; folglich ist k die Wärmemenge, welche in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit eines den Grenzflächen parallelen Schnittes fließt, falls die Temperaturdifferenz auf der Einheit der Weglänge 1° beträgt (das Temperaturgefälle gleich 1 ist). Dieses k hängt von der Substanz der Platte ab und stellt eine besondere physikalische Größe dar, die auch ihre besondere Einheit hat.

Ein solcher Schluß aber ist nicht richtig. Die oben angeführten, aus den Versuchen gewonnenen Abhängigkeiten umfassen noch nicht alle Seiten der Erscheinung: die Zahl q hängt nicht nur von der Größe der Fläche s , der Zeit t , der Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ und von der Dicke d , sondern noch vom Material der Platte ab. Um diese Tatsache auszudrücken, führen wir eine neue Größe ein, die wir Wärmeleitfähigkeit nennen. Wir bezeichnen sie mit k und nehmen an, daß sie proportional q sei; q hängt dann von den fünf Größen k , s , t , $(T_1 - T_2)$ und d ab. Wir haben hier also sechs wesentlich verschiedene physikalische Größen vor uns, von denen eine jede durch ihre eigene, vollkommen willkürliche Einheit gemessen werden kann. Die Einheiten können beispielsweise sein: die kleine Kalorie (q), der Quadratzoll (s), das Zentimeter (d), die Minute (t), der Celsiusgrad ($T_1 - T_2$) und die Wärmeleitfähigkeit des Quecksilbers (k). In diesem Falle müssen wir auch die Formel (2) durch die folgende ersetzen:

$$q = Ckst \frac{T_1 - T_2}{d} \dots \dots \dots (3)$$

in welcher C ein wirklicher Proportionalitätsfaktor, eine Zahl ist, die nicht etwa einen Zahlenwert irgendeiner physikalischen Größe bedeutet, sondern nur von der Wahl der Einheiten für die sechs in der Formel enthaltenen Größen abhängt. Setzt man in (3) $C = 1$, so begibt man sich bereits des Rechtes, alle diese Einheiten willkürlich zu wählen, denn die Einheit der einen Größe wird durch die Einheiten der übrigen fünf bestimmt. Am natürlichsten (jedoch nicht unumgänglich notwendig) ist es, die Einheiten für die Größen q , s , t , $(T_1 - T_2)$ und d willkürlich zu wählen. In diesem Falle erhält man für $q = 1$, $s = 1$,

$t = 1$, $T_1 - T_2 = 1$ und $d = 1$ auch $k = 1$. Hieraus folgt, daß, falls man in der allgemeinen Formel (3) $C = 1$ setzt, man als Einheit der Wärmeleitungsfähigkeit die einer Plattensubstanz annehmen muß, durch deren Oberflächeneinheit in der Zeiteinheit die Wärmeeinheit fließt, wenn die Temperaturdifferenz auf der Einheit der Dicke 1^0 beträgt. Wenn unter denselben Bedingungen nicht eine, sondern q Wärmeeinheiten hindurchfließen, so ist auch die Wärmeleitungsfähigkeit nicht gleich 1, sondern gleich einer Zahl k , wobei q und k einander gleich sind. Die Gleichung $q = k$ sagt aus, daß die Anzahl Wärmeeinheiten q gleich ist der Anzahl Einheiten der Wärmeleitungsfähigkeit, und diese Gleichheit wird nur in dem besonderen Falle erhalten, wo wir in der allgemeinen Formel (3) willkürlich $C = 1$ setzen. Somit ist es klar, daß die oben erwähnte übliche Schlußfolgerung, welche zur Definition „ k ist die Wärmemenge usw.“ führt, nicht richtig ist.

Eine gefährbringende Begriffsverwirrung ist insbesondere in jenen einfachsten Fällen möglich, wo wir es überhaupt nur mit zwei physikalischen Größen zu tun haben und die eine von ihnen der anderen proportional ist, wenn also

$$a = Cb \dots \dots \dots (4)$$

ist; hier bezeichnen a und b die beiden physikalischen Größen (d. h. ihre Zahlenwerte, denn nur die letzteren können verallgemeinert durch Buchstaben „bezeichnet“ werden), C ist der Proportionalitätsfaktor, der von der Wahl der Einheiten für die in der Formel vorkommenden Größen abhängt. Nimmt man nun an (was man aber durchaus nicht zu tun verpflichtet ist), daß $C = 1$ ist, so erhält man

$$a = b \dots \dots \dots (5)$$

Solcher Formeln gibt es in der Physik sehr viele; man darf Gleichungen dieser Art ja nicht für Identitäten halten. Wir haben im vorliegenden Falle zwei verschiedene physikalische Größen vor uns, die durch das Proportionalitätsgesetz verknüpft sind. Bei einer bestimmten Auswahl der Einheiten werden die Zahlenwerte beider Größen einander gleich. Wenn man dagegen in ähnlichen Fällen von einer Gleichheit der Größen reden wollte, so könnte sich leicht die Vorstellung von ihrer inneren Identität bilden, welche durchaus nicht aus der zufälligen Gleichheit ihrer Zahlenwerte folgt. Um Mißverständnisse zu vermeiden, wollen wir uns für ähnliche vorkommende Fälle des Ausdruckes „werden durcheinander gemessen“ bedienen. Somit bedeutet der Satz: die Größe a wird durch die Größe b gemessen — daß bei einer willkürlichen Wahl der Einheiten die Zahlenwerte beider wesentlich verschiedener physikalischer Größen sich proportional zueinander ändern, bei einer gewissen, ganz bestimmten Auswahl der Einheiten aber ihre Zahlenwerte untereinander gleich werden. Dies gilt auch für solche Beziehungen zwischen zwei Größen, welche nicht durch

Versuche gewonnen werden, sondern aus der für die eine von ihnen gegebenen Definition folgen.

Hier ein Beispiel dafür. In der Elementarphysik wird der Begriff der Wärmekapazität der Körper definiert. Man darf hierbei nicht etwa sagen, die Wärmekapazität sei gleich der Wärmemenge, welche zur Erwärmung des Körpers um 1° erforderlich ist. Die Wärmemenge q und die Wärmekapazität k eines Körpers sind durchaus verschiedene physikalische Größen, deren Einheiten überhaupt ganz willkürlich gewählt werden können (z. B. die kleine Kalorie und die Wärmekapazität von einem Pfund Quecksilber). Wir haben die allgemeine Formel $q = Ckt$, wo t die Anzahl Grade ist, um welche sich der Körper erwärmt hat. Nur wenn man $C = 1$ setzt, erhält man für $t = 1^{\circ}$ die Gleichheit $q = k$, welche ausdrückt, daß die Wärmekapazität eines Körpers durch die Wärmemenge gemessen wird, die ihn um 1° erwärmt.

Im vorhergehenden Paragraphen wurde die völlig überflüssige Spaltung einer physikalischen Größe in zwei mit verschiedenen Benennungen gerügt und wurde beispielsweise auf „Dichte“ und „spezifisches Gewicht“ hingewiesen. Wir können jetzt genauer zeigen, wodurch diese fehlerhafte Einteilung entstanden ist. Das Gewicht p , das Volumen v und die Dichte δ sind drei wesentlich verschiedene Größen, deren Einheiten vollkommen willkürlich gewählt werden können (z. B. das Pfund, das Kubikdezimeter, die Dichte des Quecksilbers). Sie sind durch die Formel $p = C\delta v$ miteinander verknüpft. Setzt man $C = 1$, so folgt $p = \delta v$, und in diesem Falle sind wir gezwungen, als Einheit der Dichte die Dichte eines solchen Körpers gelten zu lassen, dessen Volumeneinheit die Einheit des Gewichtes darstellt. Für $v = 1$ folgt $p = \delta$, woraus indes nicht hervorgeht, daß die Dichte gleich dem Gewichte der Volumeneinheit sei. Wir haben vielmehr zu sagen, daß „die Dichte durch das Gewicht der Volumeneinheit gemessen wird“ (die Dichte, welche durch die Masse der Volumeneinheit gemessen wird, ist wieder eine andere Größe).

Eine physikalische Größe wird durch eine andere „gemessen“ heißt, daß bei einer gewissen, jedoch nicht notwendigen Auswahl der Einheiten dieser beiden Größen ihre Zahlenwerte untereinander gleich werden.

Empirische Formeln. Wenn man durch das Experiment oder die Beobachtung den gesetzmäßigen Zusammenhang zweier Größen zu finden sucht, erhält man zwei Reihen zusammengehöriger Zahlenwerte a und b . Sehr oft kommt es vor, daß man den Zusammenhang, weil er äußerst verwickelt ist, nicht zu erraten vermag und das gesuchte wahre Gesetz unbekannt bleibt. In solchen Fällen kann man die Beobachtungsergebnisse durch eine empirische Formel ausdrücken, d. h. einen solchen algebraischen Zusammenhang $a = f(b)$, z. B. eine Reihe aufstellen, daß aus demselben für alle gemessenen Werte von b die gemessenen Werte von a sich mit genügender Annäherung ergeben. Die

Gleichheit $a = f(b)$ drückt dann das Gesetz empirisch aus und kommt innerhalb der Grenzen, zwischen welchen die Beobachtungen liegen, dem wahren Gesetze nahe. Von der allgemeinen Form der Funktion $f(b)$ und den Zahlenwerten der in ihr vorkommenden Koeffizienten hängt es ab, ob die Auswahl eine glückliche war.

Wenn es uns gelungen ist, eine solche empirische Formel $a = f(b)$ zu finden, welche „innerhalb der Versuchsgrenzen“ ausreichend gut die Abhängigkeit zwischen den Zahlen a und b wiedergibt, so kann man sie benutzen, um die Zahlen a' zu berechnen, welche den nicht durch unmittelbare Messung erhaltenen Zahlen b' entsprechen. Eine solche Berechnung ist im allgemeinen zulässig, wenn die Zahlen b' zwischen den durch Messung erhaltenen Zahlen b liegen; man nennt dies Verfahren Interpolation. Dasselbe gibt zuverlässige Resultate, besonders dann, wenn die gemessenen Zahlen b einander nahe liegen. Andererseits darf man die empirischen Formeln nur mit großer Vorsicht benutzen, wenn es sich um die Berechnung solcher a handelt, die außerhalb der Beobachtungsgrenzen gelegenen b entsprechen, denn das wahre, unbekannte Gesetz kann hier vom empirischen wesentlich abweichen. Eine Berechnung solcher Art heißt Extrapolation.

Die Größen, welchen man in der Physik begegnet, können in zwei Gruppen eingereiht werden, die sich durch ein nur selten genügend beachtetes, jedoch überaus wichtiges und charakteristisches Kennzeichen unterscheiden.

Zur ersten Gruppe gehört das, was man gewöhnlich Größe nennt; für diese ist offensichtlich der Wert Null möglich; man kann diese Größen zueinander addieren, und ihr geometrisches Verhältnis ist eine unbenannte Zahl, welche angibt, wievielmals eine der Größen in der anderen enthalten ist. Zu den Größen dieser Art gehören Länge, Flächenraum, Volumen, Geschwindigkeit, Kraft, Druck, elektrischer Widerstand, elektromotorische Kraft, Tonstärke, Lichtstärke, Intensität des magnetischen Feldes usw.

Es ist aber noch eine andere Gruppe von Größen bekannt, welche man ohne gewisse Einschränkungen und Erklärungen nicht unmittelbar zu den Größen rechnen darf. Für sie existiert der Begriff der Null nicht oder kann nur sehr bedingt eingeführt werden. Man kann auch nicht von einem geometrischen Verhältnis derselben reden. Solche Größen werden in der Wissenschaft benutzt, hauptsächlich, um als Kennzeichen qualitativer Verschiedenheiten zu dienen. Da sie eine ununterbrochene Reihe darstellen, kann man mit ihrer Hilfe den Begriff der Differenz zweier Größen als einer gewissen Zahl einführen.

Zwei Beispiele mögen klarlegen, um was es sich handelt. Zu den Größen der zweiten Gruppe gehören z. B. die Tonhöhe und die Temperatur, die offenbar gewisse qualitative Unterschiede kennzeichnen. Setzt man gewisse bestimmte Temperaturen und Tonhöhen fest, so kann man

den Begriff der Differenzen oder Intervalle zweier Temperaturen oder Tönhöhen einführen. Dies aber setzt uns in den Stand, eine Skala der Temperaturen oder Töne zu entwerfen und eine Einheit der Temperaturdifferenzen (Grade) oder Tönhöhen (Oktave oder z. B. großer halber Ton) zu wählen. Diese Differenzen sind Größen der ersten Art, sie können gemessen und ihr geometrisches Verhältnis kann gefunden werden. Die Temperaturen und Tönhöhen selbst aber können nicht gemessen werden, eine Null existiert für sie nicht, und man kann nicht vom Verhältnisse zweier Temperaturen oder Tönhöhen reden. Dem widerspricht indes nicht der bedingte Begriff der absoluten Temperatur, der im dritten Bande (die Lord Kelvinsche Skala) erörtert werden soll; ebenso die nur auf Vereinbarung beruhende Messung der Tonhöhe durch die Schwingungszahl. Wir werden in der Folge noch andere Größen dieser zweiten Art kennen lernen (so z. B. das elektrische Potential). Streng genommen gehört zu ihnen auch die Zeit.

Wir wollen nun eine Frage besprechen, die besonders für den Anfänger von der größten Bedeutung ist. Die physikalischen Gesetze sind Naturgesetze und sollten, wenn sie richtig gefaßt sind, mit mathematischer Genauigkeit erfüllt werden. Wir sprechen von „ehernen“ Naturgesetzen, deren Durchbrechung unmöglich ist und ein „Wunder“ genannt würde, wenn sie jemals in die Erscheinung träte.

Verfolgen wir aber die physikalischen Erscheinungen genauer, so überzeugen wir uns, daß es fast kein einziges physikalisches Gesetz gibt, welches genau erfüllt wird. Fast in allen Fällen beobachten wir größere oder geringere „Abweichungen“. Außerdem treffen wir in der Lehre von den physikalischen Erscheinungen auf eine außerordentlich große Anzahl von solchen „Gesetzen“, die stets nur in ganz roher Annäherung erfüllt werden, so daß sie eher den Charakter von Regeln als von wirklichen Gesetzen besitzen. Fragen wir nun erstens, wie es kommt, daß fast bei allen Gesetzen Abweichungen beobachtet werden, und zweitens, welche Bedeutung für die Wissenschaft jene Regeln besitzen, so finden wir die Antwort auf beide Fragen in folgenden Betrachtungen.

Trotz der unzweifelhaften Einfachheit der Grundursachen aller physikalischen Erscheinungen sind diese letzteren selbst dennoch im höchsten Grade verwickelt. Dies ist nicht zu verwundern, wenn man bedenkt, daß z. B. die Grundursache aller Erscheinungen, mit denen sich die theoretische Astronomie beschäftigt, durch das so einfache Newtonsche Gravitationsgesetz bestimmt wird, und daß doch aus diesem Gesetze die so außerordentlich verwickelten Bewegungen der Himmelskörper folgen.

Bei jeder physikalischen Erscheinung spielen stets eine ganze Reihe von Faktoren eine Rolle, indem sie den Gang der Erscheinung beeinflussen. Die Wirkung jedes einzelnen Faktors wird durch ein „ehernes“

Naturgesetz bestimmt; aber in der beobachteten Erscheinung treten die Wirkungen aller Faktoren gleichzeitig zutage und ergeben ein Resultat, in welchem sich diese Wirkungen gegenseitig mehr oder weniger verdecken. Das reine Gesetz könnte nur dann durch die Beobachtung genau bestätigt werden, wenn der betreffende Faktor ganz allein zur Wirkung käme oder wenn die Wirkung aller übrigen eine relativ verschwindend kleine wäre.

Die physikalischen Gesetze beziehen sich also auf ideale Vorgänge, bei denen nur ein einziger Umstand, nur ein Faktor eine Rolle spielt.

Die sogenannten „Abweichungen“ von den physikalischen Gesetzen, also der Umstand, daß in dem einen Falle eine Abweichung nicht zu bemerken ist, während sie in einem anderen groß ist, erklären sich dadurch, daß im ersten Falle die Wirkung eines Faktors derartig vorherrscht, daß die anderen neben ihm keine merkbare Rolle spielen, während im zweiten Falle jene anderen Faktoren die Erscheinung in bemerkbarer, d. h. meßbarer Weise verändern. Wird z. B. das Volumen einer gegebenen Gasmenge bei unveränderter Temperatur durch Zusammendrücken verkleinert, so finden innerhalb des Gases eine ganze Reihe von Vorgängen statt, die auf die Änderung der Spannung des Gases einen Einfluß ausüben und die Rolle der oben erwähnten Faktoren spielen. In einem gewissen Idealfalle, dem das Gas nahekommt, wenn es sehr weit von der Verflüssigung entfernt ist, z. B. beim verdünnten Wasserstoff, ist die Wirkung sämtlicher Faktoren, außer einem, fast unmerklich klein. Die Wirkung dieses einen Faktors wird durch das bekannte Boyle-Mariottesche Gesetz ausgedrückt: der Druck wächst umgekehrt proportional dem Volumen des Gases. Dieses ist ein wirkliches Naturgesetz, aber es sagt nur aus, wie einer der Faktoren, die bei der Volumenänderung des Gases ins Spiel treten, den Druck des Gases beeinflußt. Befindet sich das Gas nicht in jenem idealen Zustande, ist es von dem Zustande der Verflüssigung nicht sehr weit entfernt, so wird die Wirkung anderer Faktoren bemerkbar. Jede dieser Wirkungen folgt einem ehernen Naturgesetz, aber diese Gesetze sind nicht die gleichen. Ihre Wirkungen lagern sich nebeneinander, sie stören einander; sind sie nicht sehr groß, so kommt der erste Faktor noch hauptsächlich in Betracht und wir beobachten nur größere oder geringere Abweichungen vom Boyle-Mariotteschen Gesetze. Werden aber alle Faktoren mehr oder weniger gleichwertig, so ergibt sich eine äußerst verwickelte Erscheinung, in welcher von jenem Gesetze nichts mehr zu merken ist. Sind wir aber auch bis jetzt noch nicht imstande, diese verwickelte Erscheinung in ihre Bestandteile zu zerlegen, d. h. die Einzelgesetze, nach denen die verschiedenen Faktoren wirken, zu formulieren, so dürfen wir doch nicht zweifeln, daß jedes dieser Gesetze ein ehernes, unwandelbares Naturgesetz ist. Dies folgt aus dem Umstande, daß unter genau gegebenen Verhältnissen jede Ursache eine ganz be-

stimmte Wirkung erzeugt, wie groß auch die Anzahl der Faktoren sein mag, die bei dem Zustandekommen dieser Wirkung eine Rolle spielen. Die ehernen Naturgesetze zeigen niemals Abweichungen, und hierin besteht das Wesen des Kausalgesetzes vom Standpunkte der Empiriker.

Wir sahen oben, daß in der Lehre von den physikalischen Erscheinungen eine sehr große Anzahl von Gesetzen auftritt, die nur in ganz roher Annäherung erfüllt werden, und eher als „Regeln“ und nicht als Gesetze bezeichnet werden könnten. Hierher gehört z. B. das sogenannte Gesetz von Dulong und Petit, welches besagt, daß für feste Elemente, hauptsächlich Metalle, das Produkt aus Atomgewicht A und spezifischer Wärme c eine konstante Zahl ist. Bei näherer Untersuchung erweist es sich aber, daß das Produkt Ac für verschiedene Elemente etwa zwischen 5,8 und 6,8 schwankt, also durchaus keinen wirklich konstanten Wert besitzt. Ähnliche angenäherte Gesetzmäßigkeiten gibt es, wie erwähnt, in sehr großer Anzahl. Welche Bedeutung haben sie für die Wissenschaft? Sind sie nicht vielleicht nur ein Spiel des Zufalls? Wenn die Anzahl der Fälle, die das Gesetz, richtiger die Regel, bestätigen, eine geringe ist und die Abweichungen sehr groß sind, so kann es sich in der Tat vielleicht nur um einen Zufall handeln. Wenn aber die Anzahl der Fälle eine bedeutende ist und die Abweichungen nicht zu groß sind, so können wir überzeugt sein, daß kein Zufall vorliegt. Dies gilt z. B. in dem oben erwähnten „Gesetze“ von Dulong und Petit. Für 32 feste Elemente schwankt das Produkt Ac zwischen 5,8 und 6,8, wobei — und das ist die Hauptsache — die Faktoren A und c die allerverschiedensten Werte besitzen; für Aluminium ist $A = 27$ und $Ac = 6,58$, für Blei $A = 206,4$ und $Ac = 6,48$. Dies kann kein Zufall sein.

Die Bedeutung derartiger Regeln ist aus dem oben Dargelegten leicht zu verstehen. Sie beziehen sich auf Erscheinungen, bei deren Zustandekommen mehrere, vielleicht sehr viele Faktoren eine Rolle spielen, wobei der Einfluß eines jeden Faktors auf das beobachtete Endergebnis durch ein Naturgesetz bestimmt wird. Einer dieser Faktoren herrscht zwar vor, aber die Wirkung der übrigen ist nicht gering und tritt deutlich hervor. Das angenäherte Gesetz ist dann eben das Wirkungsgesetz jenes vorherrschenden Faktors. Die zur Erwärmung eines festen Elementes notwendige Wärmemenge besteht aus mehreren Teilen, die zu verschiedenen Zwecken verbraucht werden. Ein vorherrschender Teil ist umgekehrt proportional dem Atomgewicht des Elementes, während die übrigen Teile ganz anderen Gesetzen folgen.

Jedes angenähert richtige Gesetz weist uns also auf das Vorhandensein eines wirklichen Naturgesetzes hin, welches aber in der beobachteten Erscheinung durch das gleichzeitige Auftreten von sekundären Vorgängen, die nach anderen Gesetzen verlaufen, mehr oder weniger

verdeckt wird. Selbstverständlich müssen wir aber genügende Gründe haben, überzeugt zu sein, daß die bemerkte ungefähre Gesetzmäßigkeit oder Regel nicht bloß zufällig erfüllt ist. Man erkennt aus diesen Darlegungen, daß ungefähre Gesetze oder Regeln eine sehr große Bedeutung für die Wissenschaft besitzen: jedes dieser Gesetze ist gleichsam der Vertreter eines wirklichen, aber im gegebenen Falle mehr oder weniger verhüllten Naturgesetzes.

Wir haben versucht, den Unterschied zwischen den die physikalischen Erscheinungen beherrschenden wahren Naturgesetzen und den aus unseren Beobachtungen und Versuchen erschlossenen angenäherten Gesetzmäßigkeiten klarzulegen. In der modernen Physik spielt aber noch eine andere Frage eine umfassende Rolle, und ihre Beantwortung hat uns erst die wahre Bedeutung, die verborgene Quelle und den Wert der Naturgesetze erschlossen. Es ist dies die Frage, innerhalb welcher Grenzen diese Gesetze gültig sind, die Frage, wie weit es möglich ist, daß irgendwo im Raume oder irgend einmal im Laufe der Zeit das Gesetz nicht erfüllt wird, ohne daß wir gezwungen wären, von einem „Wunder“ zu sprechen, von einer durch höhere Einwirkung hervorgerufenen Durchbrechung „eherner“ Gesetze. Wir müssen uns hier mit wenigen Andeutungen begnügen; in Band III und Band V werden wir diese Frage ausführlich besprechen. Wir wollen jetzt nur ein bestimmtes Beispiel ins Auge fassen: das Mariottesche Gesetz in seiner idealen Fassung, welches besagt, daß bei konstant gehaltener Temperatur der Druck einer gegebenen Gasmenge umgekehrt proportional ist dem Volumen dieses Gases. Gilt dieses Gesetz noch für den millionten Teil eines Kubikmillimeters, besonders wenn sich das Gas im höchsten Grade der Verdünnung befindet? Das Gesetz gilt hier nicht mehr, der Druck hat hier einen schwankenden Wert und kann in den verschiedenen, sehr kleinen, nebeneinandergelagerten Teilen eines größeren Volumens in einem gegebenen Augenblicke stark voneinander abweichende Werte besitzen. Aber der Mittelwert für das ganze Volumen bleibt im Laufe der Zeit fast unverändert, und dieser ist es, der dem Mariotteschen Gesetze entspricht. Es ist nicht unmöglich, aber im höchsten Grade unwahrscheinlich, daß der mittlere Druck des Gases auf die Gesamtoberfläche der das Gas umgebenden Wand in einem gegebenen Augenblicke wesentlich, d. h. um eine meßbare Größe von jenem Mittelwerte abweicht. Diese Beobachtung läßt sich verallgemeinern. Die meisten, vielleicht sogar alle „Naturgesetze“ sind Wahrscheinlichkeitssätze, d. h. ihre Erfüllung besitzt einen außerordentlich hohen Grad von Wahrscheinlichkeit; ihre Nichterfüllung ist wohl möglich, aber in so hohem Grade unwahrscheinlich, daß wir in den unserer Beobachtung zugänglichen Räumen und Zeiten die zufällig eintretende große Abweichung von dem Gesetze niemals erleben werden. Was wir niemals beobachten können, weil es zwar

möglich, aber doch über alle Begriffe unwahrscheinlich ist, ist für uns nicht vorhanden, ist für uns unmöglich, und nur in diesem Sinne hat man die Unmöglichkeit einer Durchbrechung der Naturgesetze zu verstehen.

§ 8. Zustand der Materie. Im § 1 hatten wir Materie oder Stoff das in dem Orte des Raumes Vorhandene genannt, in welchem wir die Ursache eines empfungenen Eindruckes vergegenständlichen; den einen begrenzten Raumteil erfüllenden Stoff nannten wir Körper. Die Physik hat es vorzugsweise mit der Materie zu tun und wendet sich nur verhältnismäßig selten der Untersuchung der Körpereigenschaften zu, welche lediglich von der Form der Körper abhängen.

Der Stoff kann gleichartig (homogen) oder ungleichartig (heterogen) sein. Im ersten Falle besitzen alle seine Teile genau gleiche, im zweiten ungleiche Eigenschaften. Dementsprechend kann man auch von homogenen und heterogenen Körpern reden. Die Ungleichartigkeit kann zweierlei Ursachen haben.

Erstens können die Teile des Stoffes derart sein, daß einer von ihnen unter keinen Umständen alle Eigenschaften des anderen erlangen kann (wenigstens nach den neueren Anschauungen); in diesem Falle unterscheiden sich die Stoffteile durch ihren Bestand, ihr Unterschied ist ein chemischer.

Zweitens kann, obwohl die Stoffteile sich durch ihre Eigenschaften unterscheiden, dennoch unter gewissen Bedingungen ein jeder von ihnen alle Eigenschaften eines beliebigen anderen erwerben; in diesem Falle ist die Heterogenität eine physikalische und die Stoffteile unterscheiden sich durch ihren Zustand.

Die Eigenschaften der Materie werden durch eine ganze Reihe verschiedener physikalischer Größen bestimmt. Wir wollen Punktfunktionen solche Größen nennen, welche an verschiedenen Punkten des Raumes verschiedene Zahlenwerte besitzen; hierher gehören physikalische Größen, welche die Eigenschaften der Materie an verschiedenen ihrer Punkte kennzeichnen. Jede Größe, welche, zu einem bestimmten Punkte gehörig, eine bestimmte Richtung hat, heißt Vektor (Geschwindigkeit, Kraft, elektrischer Strom).

Die Materie heißt isotrop, wenn nicht bloß alle Teile gleiche Eigenschaften haben, sondern in jedem Punkte ihre Eigenschaften nach allen Richtungen hin die gleichen sind und von der Richtung nicht abhängen (z. B. wenn die Wärmeleitung, die Lichtgeschwindigkeit, die Ausdehnbarkeit usw. nach allen Richtungen hin die gleichen sind). Die Materie heißt anisotrop (heterotrop), wenn sie im gegebenen Punkte nach verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften besitzt. Es ist aber wohl zu beachten, daß die Materie in bezug auf eine Eigenschaft isotrop, in bezug auf eine andere anisotrop sein kann. Wir werden

z. B. sehen, daß Kristalle des sogenannten regulären Systems isotrop in bezug auf ihre optischen, anisotrop in bezug auf ihre elastischen Eigenschaften sind. Die anisotrope Materie kann gleichzeitig homogen sein, falls ihre Eigenschaften in allen Punkten und auch in parallelen Richtungen dieselben sind. Der Einfachheit halber spricht man bisweilen von isotropen und anisotropen Körpern.

Aus der elementaren Chemie ist es bekannt, daß der Stoff einfach oder zusammengesetzt sein kann. Der letztere besteht aus einer sogenannten chemischen Verbindung mehrerer einfacher Stoffe. Der Stoff besteht aus sehr kleinen Teilen, welche Moleküle heißen.

Ein Molekül ist der kleinste Teil, welcher noch imstande ist, wesentliche Eigenschaften des gegebenen Stoffes zu zeigen. Je nach der Art dieser Eigenschaften unterscheidet man bisweilen physikalische und chemische Moleküle, wobei man den physikalischen einen zusammengesetzteren Bau zuschreibt als den chemischen; jedes der ersteren kann eine große Zahl der letzteren in sich enthalten.

Man unterscheidet oft „chemisch reine“ Stoffe von solchen, welche Beimengungen anderer Stoffe enthalten. Die physikalischen Eigenschaften eines Stoffes werden in vielen Fällen durch quantitativ außerordentlich geringe Beimengungen in erstaunlich hohem Maße verändert. Hierdurch erklären sich die so häufigen Widersprüche zwischen den Ergebnissen der von verschiedenen Forschern ausgeführten Untersuchungen gewisser Eigenschaften verschiedener Stoffe. Es ist nämlich unmöglich, einen Stoff vollkommen von allen Beimengungen zu befreien, so daß es überhaupt chemisch reine Stoffe im buchstäblichen, sozusagen mathematisch genauen Sinne dieses Wortes, gar nicht gibt.

Die heutige Chemie nimmt ferner an, daß die Stoffe sich aus kleinen Teilchen, den Atomen, aufbauen. Der Name stammt daher, daß man früher glaubte, daß sie auf keine Weise zerlegt werden könnten. Wie wir jedoch in § 4 gesehen haben, haben neuere Entdeckungen auf dem Gebiete der elektrischen Erscheinungen dahin geführt, dem chemischen Atom einen verwickelten Bau zuzuschreiben und sein Zerfallen unter gewissen Bedingungen anzunehmen. Die Elektronentheorie (§ 4 und ausführlich im Band V) hat eine Umwälzung auf dem Gebiete unserer Grundvorstellungen veranlaßt und zu dem Begriff der „Struktur des Atoms“ geführt. Wir verstehen unter Atom ein kleines Stoffteilchen, welches allein oder im Verein mit anderen das chemische Molekül bildet. Das Molekül eines einfachen Stoffes besteht aus einem oder mehreren gleichartigen, das Molekül eines zusammengesetzten Stoffes aus zwei oder mehreren, wenigstens zum Teil verschiedenen Atomen.

Bei Besprechung der heterogenen Körper wurde erwähnt, daß ein und dieselbe Materie sich in verschiedenen Zuständen befinden kann. Der Ausdruck „Zustand der Materie“ wird in zweierlei Sinn gebraucht. Im engeren Sinne des Wortes unterscheidet man drei ver-

schiedene Zustände (Aggregatzustände, Formarten) der Materie: den festen, flüssigen und gasförmigen. Von ihnen soll weiter unten die Rede sein.

Im weiteren Sinne kommt jeder Materie eine unendliche Anzahl verschiedener Zustände zu, wenn man den „Zustand“ durch die Gesamtheit aller Eigenschaften bestimmt sein läßt, so daß die Veränderung einer einzigen auch eine Veränderung des Zustandes zur Folge hat. Alle Größen, welche die Eigenschaften der Materie bestimmen, sich also zugleich mit ihrem Zustande ändern, heißen Parameter des Zustandes oder kurz-Parameter. Der Zustand wird durch Funktionen des Parameters gekennzeichnet.

Zu den wichtigsten den Zustand bestimmenden Größen gehören: Temperatur, Dichte (oder statt ihrer das spezifische Volumen) und Druck oder Spannung. Wir unterwerfen diese Größen einer kurzen Betrachtung.

1. Die Temperatur. Der Tastsinn, welcher bei Berührung unseres Körpers mit der Materie in bekannter Weise gereizt wird, gibt uns Auskunft über den sogenannten Wärmeszustand eines Körpers, über den Grad seines Erwärmtseins. Die Begriffe kalt, warm, heiß können ebensowenig definiert werden wie andere subjektive Empfindungen (Farbe, Tonhöhe usw.); sie sind jedem zugänglich und daher allgemein verständlich. Die Größe, welche den Grad des Erwärmtseins eines Körpers bezeichnet, heißt Temperatur: einer Vermehrung des Erwärmtseins entspricht eine Steigerung oder eine Erhöhung der Temperatur, einer Verminderung — eine Verringerung oder Erniedrigung der Temperatur. Die Ursache des größeren oder geringeren Erwärmtseins der Körper nennt man Wärme.

Im vorhergehenden Paragraphen war die Temperatur als eine Größe „zweiter Art“ bezeichnet worden, die an und für sich nicht gemessen werden kann. Setzt man aber gewisse Temperaturen als Ausgangspunkte fest, so ist man in stande, eine Temperaturskala zu entwerfen und die Temperaturdifferenzen als Größen „erster Art“ einzuführen.

Der subjektiven Empfindung einer Temperaturänderung muß eine gewisse Veränderung in dem seine Temperatur ändernden Körper entsprechen. Sie besteht in folgendem. Die Moleküle eines Körpers sind niemals in Ruhe, sie bewegen sich fortwährend. Die Geschwindigkeit ihrer Bewegung jedoch kann größer oder kleiner werden, und gerade dies stellt das Wesen dessen dar, was in unserem Tastsinne die Vorstellung von einer Veränderung des Wärmeszustandes der Materie hervorruft. Je schneller sich die Moleküle bewegen, um so höher ist die Temperatur des gegebenen Stoffes.

Bei der größten Mehrzahl der Stoffe nimmt man wahr, daß sich zugleich mit einer Temperaturerhöhung das von einer gegebenen Menge der Substanz eingenommene Volumen vergrößert. Man benutzt diese

Tatsache dazu, die Einheit der Temperaturdifferenz, den Temperaturgrad zu definieren und eine Temperaturskala zu entwerfen. Letztere kann z. B. beruhen auf der mit der Temperaturänderung vor sich gehenden Volumenänderung des unter konstantem äußeren Drucke stehenden Wasserstoffs. Im dritten Bande werden wir eine andere Methode kennen lernen, die sich auf die Beobachtung der Druckänderung von Wasserstoff bei konstantem Volumen gründet. Die Versuche haben gezeigt, daß man viele Temperaturen immer wieder in gleicher Beschaffenheit erhalten kann, so unter anderen auch die folgenden, zwei ganz bestimmten: die Temperatur des schmelzenden Eises bei bestimmtem Drucke und die des siedenden Wassers, auf dessen Oberfläche (von der Luft oder einem anderen Gase) ein Druck ausgeübt wird, der 1,0336 kg auf jeden Quadratzentimeter oder 10 336 kg auf jeden Quadratmeter beträgt und gleich dem Druck einer Quecksilbersäule (bei 0°) von 760 mm Höhe ist. Um mit Hilfe dieser beiden Temperaturen eine Temperaturskala zu entwerfen, verfahren wir folgendermaßen. Wir bringen eine bestimmte Menge Wasserstoff, z. B. 1 kg, in ein mit schmelzendem Eise umgebenes Gefäß, so daß er die Temperatur dieses Eises annimmt; sein Volumen sei hierbei gleich v , wo v z. B. die Zahl der vom Gase eingenommenen Kubikmeter bezeichnet. Wir umgeben ihn darauf mit Dämpfen siedenden Wassers; er dehnt sich dann aus und nimmt schließlich das konstant bleibende größere Volumen V an. Die ganze Volumenzunahme $V - v$ teilen wir nun in 100 gleiche Teile und nennen einen Grad (1°) die Temperaturdifferenz, welcher die Volumenzunahme des Wasserstoffs um die Größe $\frac{V - v}{100}$ entspricht. Die Schmelztemperatur des Eises kann man als den Anfang der Temperaturskala ansehen; von ihr werden dann alle anderen Temperaturen gerechnet. Dieses drückt man so aus, daß man die Schmelztemperatur des Eises gleich Null setzt (0°); ihr entspricht das Volumen v ; offenbar wird danach die Temperatur des siedenden Wassers, bei welcher unsere gedachte Wasserstoffmenge das Volumen V hat, gleich 100°. Die Temperatur, bei welcher das Volumen gleich

$$v + n \frac{V - v}{100}$$

wird, setzt man gleich n° . Wie man sieht, sind 100° und n° strenggenommen nicht die Temperaturen der Körper, sondern bloß die Differenzen zwischen den Temperaturen der Körper und des schmelzenden Eises. Der ganze Zwischenraum zwischen der Schmelztemperatur des Eises und der Siedetemperatur des Wassers ist bei uns in 100 Teile oder Grade geteilt, wobei ein jeder Grad der Temperaturerhöhung die gleiche Volumenzunahme $\frac{V - v}{100}$ des Wasserstoffs hervorruft. Das Verhältnis dieser Zunahme zum ursprünglichen Volumen v bei 0° heißt der Aus-

dehnungskoeffizient des Wasserstoffs; wenn man ihn mit α bezeichnet, so ist

$$\alpha = \frac{V - v}{100 v} \dots \dots \dots (6)$$

Die Versuche haben ergeben, daß $\alpha = \frac{1}{273} = 0,00366$ ist. Die Größe α stellt sich uns als unbenannte Zahl dar, aber nach § 6 sieht man leicht ein, daß α der Zahlenwert einer besonderen physikalischen Größe ist, die man die Ausdehnbarkeit des Wasserstoffs durch die Wärme nennen könnte. Wenn man die Temperatureinheit (Grad) ändern würde, indem man z. B. das Volumen $V - v$ nicht durch 100 (Celsiuskala), sondern durch 80 (Réaumur) oder durch 180 (Fahrenheit) teilen würde, so würde sich damit zugleich die Einheit der Ausdehnbarkeit durch die Wärme und ihr Zahlenwert α ändern.

Aus der Definition folgt, daß der Ausdehnungskoeffizient α (für den Wasserstoff) eine konstante Größe ist. Da wir ferner annehmen, daß die Temperaturänderungen den Volumenänderungen des Wasserstoffs proportional sind, so gilt, wenn man mit V_0 das Volumen einer gegebenen Wasserstoffmenge bei 0° , mit V_T und V_t die Volumina bei den Temperaturen T und t bezeichnet,

$$(T - t) : (V_T - V_t) = 100 : V_{100} - V_0.$$

Diese Proportion liefert im Vereine mit (6), wo jetzt $V = V_{100}$ und $v = V_0$ ist,

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \frac{V_T - V_t}{T - t} \dots \dots \dots (7)$$

Aus (7) ergibt sich, wenn man $t = 0$ und $T = t$ setzt, der besondere Fall

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} \dots \dots \dots (8)$$

Endlich folgt aus (8)

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t) \dots \dots \dots (9)$$

Für eine andere Temperatur T erhält man $V_T = V_0 (1 + \alpha T)$, und hieraus

$$V_T = \frac{V_t (1 + \alpha T)}{1 + \alpha t} \dots \dots \dots (10)$$

Das Binom $1 + \alpha t$ heißt das Ausdehnungsbynom.

Der Apparat, welcher uns ermöglicht, aus dem Volumen (oder dem Druck) einer gegebenen Wasserstoffmenge auf die Temperatur zu schließen, heißt Wasserstoffthermometer.

Wir nehmen jetzt an Stelle des Wasserstoffs eine bestimmte Menge eines beliebigen anderen Stoffes und führen eine Reihe von Messungen seiner Volumina V_t und der entsprechenden Temperaturen t , welche wir

mit Hilfe des Wasserstoffthermometers messen, aus. Wir erhalten dabei zwei Zahlenreihen V_t und t . Wenn es sich hierbei zeigt, daß gleichen Temperaturerhöhungen auch gleiche Volumenänderungen entsprechen, so erweist sich die Größe α , welche sich nach einer der Formeln (7) oder (8) berechnen läßt, als eine konstante Zahl, die wir Ausdehnungskoeffizient der untersuchten Substanz nennen. Auch die Formeln (9) und (10) behalten ihre Gültigkeit. Wenn hingegen die für Volumen und Temperatur der Substanz gefundenen Zahlen keine konstante, nach Formel (7) berechnete Zahl ergeben, so verliert der frühere Begriff des Ausdehnungskoeffizienten einer Substanz seine Bedeutung. Er bezog sich auf den Wasserstoff und wurde als eine konstante Größe definiert. Wir können aber in diesem Falle den Begriff des Ausdehnungskoeffizienten als einer veränderlichen, von der Temperatur abhängigen Größe einführen. Die Formel (7) gibt uns dann zunächst den sogenannten mittleren Ausdehnungskoeffizienten α_m zwischen den Temperaturgrenzen T und t , so daß

$$\alpha_m = \frac{1}{V_0} \frac{V_T - V_t}{T - t} \dots \dots \dots (11)$$

ist. Diese Größe hängt von den zwei Temperaturen T und t ab.

Die Formel (8) liefert uns den mittleren Ausdehnungskoeffizienten zwischen den Temperaturgrenzen 0^0 und t^0 , welcher in die Formel (9) eingesetzt

$$V_t = V_0 (1 + \alpha_m t) \dots \dots \dots (12)$$

gibt; hier hängt α_m von t ab. Statt (10) erhalten wir jetzt

$$V_T = \frac{V_t (1 + \alpha'_m T)}{1 + \alpha_m t} \dots \dots \dots (13)$$

wo α_m der mittlere Ausdehnungskoeffizient zwischen 0^0 und t^0 , α'_m derselbe zwischen 0^0 und T^0 ist. Wir wollen jetzt annehmen, daß die Substanz bei t^0 das Volumen V einnimmt; erhöht man die Temperatur um die kleine Größe Δt , so ruft dies eine Volumenvergrößerung um die kleine Größe Δv hervor. Nach Formel (11) findet man

$$\alpha_m = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \dots \dots \dots (14)$$

Es ist dies der mittlere Ausdehnungskoeffizient für das kleine Temperaturintervall zwischen t und $t + \Delta t$. Läßt man nun die Größe Δt unbegrenzt kleiner werden, so nimmt auch die Größe Δv unbegrenzt ab; der mittlere Ausdehnungskoeffizient α_m strebt dabei einer gewissen Grenze zu, welche von der Temperatur t abhängt, der Δt hinzugefügt war. Somit ist

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \lim \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} \dots \dots \dots (15)$$

Die Größe α heißt der Ausdehnungskoeffizient der Substanz bei t^0 ; sie ist eine Funktion der Größe t , welche mit Hilfe des Wasserstoffthermometers bestimmt wird.

Bisweilen betrachtet man die Veränderung der linearen Dimensionen eines (festen) Stoffes im Zusammenhange mit den Änderungen seiner Temperatur. Wir bezeichnen mit l_0 ; l_T und l_t die Werte der Länge irgend einer zwei Punkte der gegebenen Stoffmenge verbindenden Geraden bei den Temperaturen 0^0 , T^0 und t^0 , die wie früher mit dem Wasserstoffthermometer gemessen sind; wenn z. B. aus dem Stoffe ein Stab angefertigt war, so können l_0 , l_T und l_t die Längen dieses Stabes bedeuten. Die Größe

$$\beta_m = \frac{1}{l_0} \frac{l_T - l_t}{T - t} \dots \dots \dots (16)$$

heißt dann der mittlere Koeffizient der linearen Ausdehnung zwischen den Temperaturen T und t . Wir haben ferner, entsprechend (12)

$$l_t = l_0(1 + \beta_m t) \dots \dots \dots (17)$$

wo β_m der mittlere Koeffizient der linearen Ausdehnung zwischen 0^0 und t^0 ist, und endlich gibt uns

$$\beta = \frac{1}{l_0} \lim \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \dots \dots \dots (18)$$

den Koeffizienten der linearen Ausdehnung bei t^0 .

Die Temperaturen unterhalb 0^0 werden als negativ betrachtet. Wenn man als Temperatur Null nicht die Schmelztemperatur des Eises, sondern die sogenannte absolute Nulltemperatur annimmt, welche im Vergleich zur Celsiuskala um 273^0 niedriger liegt, so heißt die von diesem Ausgangspunkte gerechnete Temperatur die absolute. Bezeichnet man sie mit T , so folgt aus der Definition

$$T = 273 + t \dots \dots \dots (19)$$

wo t die Temperatur nach der gewöhnlichen Celsiuskala ist.

2. Dichte und spezifisches Volumen. In der Physik bezeichnet man mit dem Ausdrucke „Dichte“ zwei völlig verschiedene Größen; mit einer derselben werden wir uns im zweiten Abschnitte bekannt machen. Der Begriff der anderen ist aus der Beobachtungstatsache abgeleitet worden, daß das Gewicht p eines Stoffes von gegebenem Volumen v von der Art dieses Stoffes abhängt. Hieraus entspringt die Vorstellung von einer gewissen Größe D , die für jede Stoffart bezeichnend ist; man nennt sie Dichte und setzt voraus, daß sie für verschiedene Stoffe proportional dem am selben Orte der Erdoberfläche bestimmten Gewichte p gleicher Volumina dieser Stoffe und bei Gleichheit der Gewichte umgekehrt proportional den Volumina v dieser Gewichte der verschiedenen Stoffe ist. Also ist

$$D = C \frac{p}{v} \dots \dots \dots (20)$$

Setzt man den Koeffizienten $C = 1$ (vgl. § 7), so erhält man

$$D = \frac{p}{v} \dots \dots \dots (21)$$

Diese Formel zeigt, daß für $p = 1$ und $v = 1$ auch die Dichte $D = 1$ wird; also hat man, wenn $C = 1$ gesetzt wird, als Einheit der Dichte die Dichte einer solchen Substanz zu wählen, deren Volumeneinheit die Einheit des Gewichtes besitzt. Wenn man das Gramm und das Kubikzentimeter als Gewichts- bzw. Volumeneinheit ansieht, so wird die Einheit der Dichte angenähert (§ 6) gleich der Dichte des Wassers bei 4° C. Behält man die Formel (20) bei, so kann man die Dichte des Wassers als Einheit annehmen und zugleich die Einheiten des Gewichtes und Volumens willkürlich wählen. Die Formel (21) geht für $v = 1$ in die Gleichheit $D = p$ über. Das zeigt uns, wie bei einer besonderen Wahl der Einheiten die Dichte eines Stoffes durch das Gewicht seiner Volumeneinheit (nach unserer verkürzten Ausdrucksweise) gemessen werden kann.

Bezeichnen wir jetzt mit p_1 das Gewicht des Volumens v von Wasser, dessen Dichte wir als Einheit wählen, so erhalten wir nach (20)

$$1 = C \frac{p_1}{v} \dots \dots \dots (22)$$

Dividiert man (20) durch (22), so erhält man

$$D = \frac{p}{p_1} \dots \dots \dots (23)$$

Der Zahlenwert für die Dichte einer Substanz wird also erhalten, wenn man das Gewicht eines beliebigen Volumens dieser Substanz durch das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser dividiert.

Wir haben (S. 31) darauf hingewiesen, daß kein Grund vorliegt, zwei angeblich verschiedene Größen, welche Dichte und spezifisches Gewicht genannt werden, einzuführen, und daß es völlig überflüssig ist, dem Zahlenwert der Dichte bei bestimmter Wahl der Einheit eine besondere Benennung beizulegen. Wir werden dementsprechend in folgendem stets nur von der Dichte eines Körpers reden.

Bezeichnet man die Zahl $1 : C$ mit c , so erhält man anstatt (20) und (21) Ausdrücke für den Zahlenwert p des Gewichtes eines homogenen Körpers

$$p = c D v \quad \text{oder} \quad p = D v \dots \dots \dots (24)$$

Hier ist c der Zahlenwert des Gewichtes der Volumeneinheit der Substanz, deren Dichte als Einheit angenommen wurde; die zweite

Formel gilt für den Fall, daß die Volumeneinheit einer solchen Substanz die Einheit des Gewichtes besitzt.

Ist die Substanz heterogen, dann verliert die ursprüngliche Definition der Dichte, die in den Formeln (20) und (21) ausgedrückt ist, ihren Sinn. Man kann indes vom Begriffe der Dichte, als einer für die gegebene Substanz konstanten Größe zu dem Begriffe der Dichte als einer kontinuierlich sich ändernden übergehen. So erhalten wir die Formeln

$$D_m = \frac{Cp}{v} \quad \text{oder} \quad D_m = \frac{p}{v} \dots \dots \dots (25)$$

welche die mittlere Dichte des Volumens v ergeben, und ferner die Formeln

$$D = \text{Clim} \frac{\Delta p}{\Delta v} \quad \text{bzw.} \quad D = \lim \frac{\Delta p}{\Delta v} = \frac{dp}{dv} \dots \dots \dots (26)$$

welche für die „Dichte in einem gegebenen Punkte“ (um welchen herum ein sehr kleines Volumen Δv liegt) gelten. Es sind dies die Grenzwerte der mittleren Dichte eines unbegrenzt abnehmenden Volumens Δv .

Als spezifisches Volumen einer homogenen Substanz bezeichnet man eine Größe, welche durch das von der Gewichtseinheit dieser Substanz eingenommene Volumen gemessen wird. Drücken wir diese Größe durch V aus, so gibt die zweite Formel (24)

$$DV = 1 \quad \text{und} \quad V = \frac{1}{D} \dots \dots \dots (27)$$

Bei bestimmter Wahl der Einheiten ist also der Zahlenwert des spezifischen Volumens gleich dem reziproken Zahlenwerte der Dichte.

Mit Änderung der Temperatur ändert sich auch das spezifische Volumen entsprechend der Formel

$$V_t = V_0(1 + \alpha t) \dots \dots \dots (28)$$

wo α der mittlere Ausdehnungskoeffizient zwischen 0° und t° ist. Aus den Formeln (27) und (28) folgt

$$\frac{1}{D_t} = \frac{1}{D_0}(1 + \alpha t) \quad \text{oder} \quad D_t = \frac{D_0}{1 + \alpha t} \dots \dots \dots (29)$$

wo D_t und D_0 die Dichte bei t° und 0° ausdrücken. In den Tabellen für die Zahlenwerte der verschiedenen physikalischen Größen gibt man gewöhnlich die Dichte für 0° an (während die Dichte des Wassers bei 4°C als Einheit angenommen ist); wir wollen sie die tabellarische Dichte nennen. Für Quecksilber ist

$$D_0 = 13,596 \dots \dots \dots (30)$$

3. Druck und Spannung. Die Körper sind in der Natur, wie uns die Beobachtung lehrt, immer einem auf ihre Oberfläche wirkenden Drucke ausgesetzt, der von den anderen sie berührenden Körpern aus-

geht. Diesen Druck p werden wir in Kilogrammen pro Quadratmeter Oberfläche ausdrücken, d. h. wir werden als Einheit des äußeren Druckes den Druck von 1 kg auf jeden Quadratmeter der Oberfläche annehmen. Eine andere Einheit ist der Atmosphärendruck; er ist gleich dem Drucke einer Quecksilbersäule von 760 mm Höhe bei 0° bzw. gleich dem Drucke von rund 1 kg auf jeden Quadratcentimeter. Da eine Wasserschicht von 1 mm Dicke auf jeden Quadratmeter Oberfläche einen Druck von 1 kg ausübt, so ist $A = 760 \times D_0$, wo A den Atmosphärendruck und D_0 die Dichte des Quecksilbers bedeuten; nach (30) erhält man

$$A = 760 \times 13,6 = 10\,336 \text{ kg pro Quadratmeter} \dots (31)$$

Unter der Wirkung des äußeren Druckes verringert sich das Volumen der Körper, aber zu gleicher Zeit nimmt auch der Gegendruck des Körpers auf die ihn unmittelbar berührenden Körper zu; diesen Gegendruck nennen wir elastische Spannung; als Einheit nehmen wir die Spannung an, bei welcher der Körper auf 1 qm Oberfläche der mit ihm in Berührung stehenden Körper einen Druck von 1 kg ausübt. Die Volumenänderung des Körpers hört erst dann auf, wenn seine elastische Spannung gleich dem äußeren Drucke wird. Ändert sich sein Volumen unter der Wirkung äußerer Druckkräfte nicht weiter, so erhält man daher für die elastische Spannung und den äußeren Druck dieselben Zahlenwerte. Infolgedessen kann man unter den gekennzeichneten Bedingungen die beiden Ausdrücke „Druck“ und „elastische Spannung“ unterschiedslos gebrauchen, obgleich diese beiden Größen ihrem Wesen nach durchaus verschieden sind. Übrigens ist leicht einzusehen, daß der Druck, unter dem sich ein Körper befindet, nichts anderes ist, als die elastische Spannung des oder der Körper, welche den ersten von allen Seiten berühren.

Auf S. 39 wurde auf Temperatur, Dichte (oder spezifisches Volumen) und Druck oder Spannung als auf die wichtigsten Zustandsgrößen eines Körpers hingewiesen, und es wurde aufmerksam gemacht, daß bei Änderung jeder beliebigen Eigenschaft eines Körpers, die durch eine obiger Größen bestimmt ist, wir von einer Zustandsänderung des Körpers sprechen werden. Hieraus folgt, daß z. B. jede Temperatur- oder Dichte- oder Druckänderung einer Zustandsänderung des Körpers entspricht, wobei dieser Ausdruck in erweitertem Sinne zu verstehen ist. Im engeren Sinne des Wortes unterscheidet man, wie oben gesagt wurde, drei Zustandsformen (Aggregatzustände) der Materie: die feste, flüssige und gasförmige. Sie sind indes nicht scharf voneinander geschieden; bisweilen befindet sich die Materie in einem Zustande, den man als Zwischenstufe zwischen ihnen bezeichnen kann. So werden wir in Abt. 2 sehen, daß die Materie im sogenannten kolloidalen Zustande, welcher eine Zwischenstufe zwischen dem festen und flüssigen darstellt, ein besonderes Interesse verdient.

Es möge hier auf einige charakteristische Merkmale der drei Zustandsformen hingewiesen werden.

1. Der feste Zustand. Materie im festen Zustande und in bestimmter Menge, ein sogenannter fester Körper, hat eine bestimmte Gestalt, welche sich im allgemeinen unbegrenzt lange erhält. Diese Gestalt kann sich durch Einwirkung äußeren Druckes ändern und wird, nachdem jener aufgehört hat zu wirken, mehr oder weniger vollständig wieder in die ursprüngliche übergehen. Die Temperatur und der äußere Druck ändern das Volumen eines festen Körpers nur sehr wenig. Seine Moleküle befinden sich zwar in Bewegung, doch entfernt sich jedes von ihnen hierbei nur sehr wenig aus einer gewissen mittleren Lage. Teilen läßt sich ein fester Körper nur durch einen verhältnismäßig bedeutenden, auf seine Oberfläche ausgeübten Druck.

2. Der flüssige Zustand. Die Materie im flüssigen Zustande oder ein sogenannter flüssiger Körper hat keine bestimmte Gestalt; auch setzt er einer Formänderung keinen merklichen Widerstand entgegen, und ebenso läßt er sich leicht zerteilen. Das Volumen einer Flüssigkeit ändert sich dagegen, wenn ihre ganze Oberfläche einem Drucke ausgesetzt wird, nur sehr wenig; sobald derselbe nachläßt, wird das frühere Volumen vollständig wieder angenommen. Die Moleküle einer Flüssigkeit bewegen sich nicht ausschließlich um ihre mittleren Lagen, sondern sie verlassen diese allmählich, so daß ihre gegenseitige Anordnung sich verändert. Die Flüssigkeiten sind dem Pascalschen Grundgesetze unterworfen: ein auf die Oberfläche der Flüssigkeit von äußeren Kräften ausgeübter Druck wird durch die Flüssigkeit nach allen Seiten hin gleichmäßig fortgepflanzt, d. h. wenn auf die Einheit der Flüssigkeitsoberfläche ein Druck ausgeübt wird, so wird er auf jede Flächeneinheit der die Flüssigkeit umgebenden Körper übertragen. Wenn man das Eigengewicht der Flüssigkeit mit in Betracht zieht, so folgt aus dem Pascalschen Gesetze das Archimedische Gesetz: ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper erfährt von letzterer einen Auftrieb, welcher einen scheinbaren Gewichtsverlust, gleich dem Gewichte der vom eingetauchten Körper verdrängten Flüssigkeit, veranlaßt.

Alle Flüssigkeiten gehen von selbst und unter allen Umständen ununterbrochen in den gasförmigen Zustand über; diese Erscheinung wird Verdunstung genannt.

3. Der gasförmige Zustand. Materie im gasförmigen Zustande oder einfacher ein Gas besteht aus Molekülen, die sich alle in geraden Linien bewegen und deren Bewegungsrichtung sich nur beim Zusammentreffen mit anderen Molekülen oder der Oberfläche eines das Gas begrenzenden Körpers ändert (z. B. den Wandungen des das Gas einschließenden Gefäßes). Infolgedessen erfüllt ein Gas in kurzer Zeit jeden ihm zur Verfügung stehenden leeren Raum; es hat, wie man sagt, das Bestreben, sich auszudehnen, d. h. ein möglichst großes Volumen

einzunehmen. Die Gesamtheit der Stöße der die Oberfläche eines mit dem Gase in Berührung stehenden Körpers treffenden Gasmoleküle ruft den Druck hervor, welchen dieser Körper von seiten des Gases erleidet. Dieser sogenannte Gasdruck wird, wie wir gesehen haben, entweder durch die Anzahl Kilogramme auf den Quadratmeter Oberfläche oder durch den Atmosphärendruck gemessen. Damit sich das Volumen eines Gases nicht ändert, muß seine Spannung dem auf das Gas von außen her wirkenden Drucke gleich sein. Das Volumen eines Gases nimmt zu oder ab, sobald seine Spannung größer bzw. kleiner ist als der äußere Druck.

Die Gesetze von Pascal und Archimedes gelten auch für die Gase.

Die Gase folgen angenähert den Gesetzen von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac.

Das Gay-Lussacsche (Charlessche) Gesetz lautet: Der Ausdehnungskoeffizient der Gase, welche bei gleichbleibendem Außendruck erwärmt werden, ist konstant und für alle Gase gleich groß, nämlich

$$\alpha = \frac{1}{273} = 0,00366 \dots \dots \dots (32)$$

Die Formel (12) nimmt demnach, wenn man V statt V_t schreibt, folgende Form an

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right) \dots \dots \dots (33)$$

Das Boyle-Mariottesche Gesetz lautet: Das Volumen einer gegebenen Gasmenge ist umgekehrt proportional dem Außendruck (oder die Spannung einer gegebenen Gasmenge ist ihrem Volumen umgekehrt proportional), wenn die Temperatur des Gases ungeändert bleibt.

Diese beiden Gesetze zeigen, daß sich das Volumen eines Gases beträchtlich ändern kann, wenn sich die Temperatur und besonders, wenn sich der Außendruck ändert.

Gasdichte. Es ist wohl zu beachten, daß die Dichte der Gase auf zwei verschiedene Einheiten bezogen wird.

a) Als Einheit der Dichte gilt vielfach die Dichte des Wassers. Bei Zugrundelegung dieser Einheit ändert sich der Zahlenwert für die Dichte eines gegebenen Gases in den weitesten Grenzen mit der Temperatur und dem auf ihm lastenden Druck. Die durch obige Einheit gemessene Dichte eines Gases können wir als Dichte erster Art des Gases bezeichnen.

b) Bei der Dichtebestimmung eines Gases nimmt man sehr oft die Dichte der Luft bei der gleichen Temperatur und demselben Druck als Einheit an. Diese Dichte ist, wenigstens innerhalb der Grenzen, für welche die Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac

für Luft und das zu untersuchende Gas gelten, eine konstante Größe. Wir können sie als Dichte zweiter Art des Gases bezeichnen.

Daß eine strenge Sonderung der beiden Dichten notwendig ist, geht unter anderem daraus hervor, daß im Wortlaute verschiedener sich auf die Gase beziehenden Gesetze gewöhnlich nur von der „Dichte des Gases“ die Rede ist, obgleich bald von der ersten, bald von der zweiten gesprochen wird. Es mögen hier zwei Beispiele dafür folgen:

1. Das Boyle-Mariottesche Gesetz in veränderter Form lautet: Die Dichte einer gegebenen Gasmenge bei konstanter Temperatur ist dem Außendruck direkt proportional. Hier ist von der Dichte erster Art die Rede.

2. Die Geschwindigkeit der Gasmoleküle bei gegebener Temperatur ist der Quadratwurzel aus der Dichte des Gases indirekt proportional. Hier ist die Dichte zweiter Art gemeint. Die Geschwindigkeit der Gasmoleküle ändert sich also nicht bei Verdichtung oder Verdünnung des Gases, wie dies scheinen könnte, falls man die zwei Dichten wechselt.

Der Zustand eines Systems. Wenn man es mit einem System von Körpern oder einzelnen Molekülen zu tun hat, so kann der Begriff des „Zustandes“ noch weiter verallgemeinert werden. Wir wollen jede Änderung in der gegenseitigen Lage der Teile des Systems ebenfalls eine Zustandsänderung des Systems nennen.

Auch in diesem Falle wird die Zustandsänderung durch Änderung der Eigenschaften gekennzeichnet. Hierbei bieten ein besonderes Interesse gewisse Arten von Eigenschaften solcher Körper, die wir allgemein als zusammengesetzte bezeichnen können. Je nach der Art, wie sich die Bestandteile zueinander verhalten, hat man drei Fälle zu unterscheiden:

a) Physikalische, grobe Mischungen (z. B. Sand und Mehl), hier liegen die Bestandteile sichtbar nebeneinander oder sonst lassen sie sich als solche mit Hilfe des Mikroskops oder auf andere Weise erkennen.

b) Lösungen im verallgemeinerten Sinne; hierher gehören die gewöhnlichen Lösungen von festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern in Flüssigkeiten, Mischungen von Flüssigkeiten (z. B. Wasser und Alkohol), von Gasen (z. B. Luft), Legierungen und ähnliche feste, homogene Mischungen usw.

c) Chemische Verbindungen, deren Bestandteile die entsprechenden chemischen Elemente sind.

Wir wollen hier nur die zweite und dritte Gruppe zusammengesetzter Körper betrachten. Unter den Eigenschaften solcher Körper finden sich häufig drei wichtige Arten, die auch besondere Namen erhalten haben. Es sind dies die folgenden:

I. Additive Eigenschaften (Ostwald); wenn der Zahlenwert der Größe x , durch welche eine Eigenschaft des zusammengesetzten Körpers ausgedrückt wird, nach der Mischungsregel aus den Zahlenwerten x_i derselben Größe für die Bestandteile des Körpers berechnet werden kann, so sagen wir, jene Eigenschaft sei eine additive. Die Größe x ist der nach der Mischungsregel berechnete Mittelwert der Größen x_i . Wir haben $mx = \sum m_i x_i$, wo m_i die Massen der Bestandteile sind und $m = \sum m_i$ die Masse des zusammengesetzten Körpers. Statt der Massen können in einzelnen Fällen auch die Volumina auftreten. So ist z. B. die Wärmekapazität c einer Legierung eine Größe, durch welche eine additive Eigenschaft der Legierung gemessen wird, denn man kann c nach der obigen Formel aus den Wärmekapazitäten c_i der Bestandteile der Legierung berechnen. Hierher gehören auch zahlreiche Eigenschaften von chemischen Verbindungen, z. B. Refraktion, Verbrennungswärme usw.

II. Konstitutive Eigenschaften (Ostwald) sind solche Eigenschaften chemischer Verbindungen, welche durch den Aufbau des Moleküls, d. h. durch die Art, wie die das Atom bildenden Moleküle untereinander verkettet sind, beeinflußt werden. Hierher gehören einige optische Eigenschaften, der Siedepunkt, der Schmelzpunkt u. a. Bei isomeren Verbindungen, deren Moleküle aus den gleichen Atomen bestehen, die aber verschiedenartig angeordnet sind, sind die konstitutiven Eigenschaften verschieden, während rein additive offenbar gleich sein müssen.

III. Kolligative Eigenschaften (Ostwald, nach einem Vorschlage W. Wundts) sind solche Eigenschaften zusammengesetzter Körper, die nur von der Masse der Bestandteile, aber nicht von ihrer Art abhängen. Hierher gehören z. B. das Volumen und der Druck eines Gasgemenges, die Dichte eines Dampfes, ferner die Siedepunkterhöhung, Gefrierpunktserniedrigung, osmotischer Druck und Dampfspannung einer Lösung (Bd. III) usw. Kolligative Eigenschaften einer chemischen Verbindung werden durch ihr Molekulargewicht bestimmt und sind unabhängig von der Art, von der Anzahl und von der Anordnung der Atome, aus denen das Molekül der Verbindung besteht. Kolligative Eigenschaften werden daher hauptsächlich zur Bestimmung der Molekulargewichte verwandt.

Zum Schlusse sei noch bemerkt, daß der Übergang eines Körpers oder Systems aus einem gegebenen Zustande in einen anderen auf unendlich vielen verschiedenen Wegen erfolgen kann. So kann z. B. der Übergang einer gegebenen Gasmenge aus einem Zustande niedriger Temperatur und kleinen Volumens in einen mit hoher Temperatur und großem Volumen dadurch erfolgen, daß man entweder das Gas bei konstantem Volumen erwärmt und darauf bei konstanter Temperatur ausdehnt oder umgekehrt zuerst das Volumen und dann die Temperatur

ändert, oder endlich Temperatur und Volumen gleichzeitig ändert, was auf unendlich viele verschiedene Arten geschehen kann.

§ 9. Erhaltung der Materie. Im vorhergehenden Paragraphen hatten wir uns mit den Zustandsänderungen der Materie bekannt gemacht.

Zu den Zustandsänderungen der Materie kann man auch die Vorgänge bei den chemischen Reaktionen rechnen. Vereinen sich Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, so ist in dem letzteren sowohl Wasserstoff als auch Sauerstoff enthalten, jedoch in einem ganz besonderen Zustande der Zerteilung in Atome.

Für alle möglichen, sowohl physikalischen als auch chemischen Zustandsänderungen gilt folgendes Grundprinzip von der Erhaltung der Materie.

Bei keiner irgendwie möglichen physikalischen oder chemischen Veränderung, der die Materie unterworfen wird, verschwindet sie oder wird sie neu erzeugt; ihre Menge bleibt immer unverändert dieselbe.

Weiter unten wird eine Erläuterung dieses Prinzips gegeben und genauer darauf hingewiesen werden, auf welche Größe sich eigentlich diese Unveränderlichkeit bezieht.

Das Prinzip der Erhaltung der Materie wird sehr oft, aber irrtümlich, Lavoisier zugeschrieben. Es wurde aber viel früher, und sogar im Altertume, als etwas Selbstverständliches, nicht selten unbewußt, angewandt, wobei es als Grundlage wissenschaftlicher Betrachtungen diente. So hat z. B. Lomonossow in einem Briefe an Euler vom 5. Juli 1748 dies Prinzip klar ausgesprochen (siehe B. Menschutkin, „Lomonossow als Physiko-Chemiker“, St. Petersburg 1904, S. 258 und Speter, „Lavoisier und seine Vorläufer“, 1910, S. 54). Walden hat die Geschichte des Prinzips der Erhaltung der Materie von den ältesten Zeiten bis zur Gegenwart dargestellt und gezeigt, wie falsch es ist, die Entdeckung dieses Prinzips Lavoisier zuzuschreiben (Journ. d. russ. phys.-chem. Ges., chem. Abt., 1912, II, S. 75).

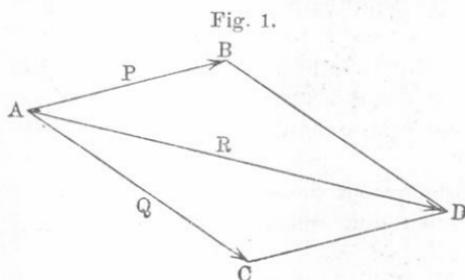
Die Versuche, welche von verschiedenen Forschern ausgeführt wurden, um die Richtigkeit jenes Prinzips zu prüfen, werden wir später besprechen.

§ 10. Vektoren. Auf S. 37 bezeichneten wir als Vektor eine Größe, die im gegebenen Punkte nicht nur einen bestimmten Zahlenwert, sondern auch eine bestimmte Richtung hat.

Jeder Vektor kann durch einen Pfeil dargestellt werden, der von dem Punkte ausgeht, auf welchen der Vektor sich bezieht; es ist dies der Angriffspunkt des Pfeiles. Die Richtung des Pfeiles gibt die des Vektors an; die Länge des Pfeiles wird proportional der Größe

des Vektors gesetzt, d. h. die Anzahl Längeneinheiten, welche in der Länge des Pfeiles enthalten sind, wird gleich oder (besonders, wenn es mehrere Vektoren darzustellen gibt) proportional dem Zahlenwerte des Vektors gemacht.

Aus zwei gegebenen Vektoren mit demselben Angriffspunkte kann man einen dritten konstruieren, welcher durch die Diagonale des Parallelogramms aus den gegebenen Vektoren dargestellt wird. Die letzteren heißen sodann die Komponenten. Der Übergang von zwei gegebenen Vektoren zu einem dritten heißt geometrische Addition zum Unterschiede von der algebraischen, d. h. der gewöhnlichen Summation. Der dritte Vektor heißt die geometrische Summe der gegebenen Vektoren $P = AB$ und



$Q = AC$ (Fig. 1); die geometrische Summe von P und Q ist $R = AD$. Symbolisch wird die geometrische Summierung folgendermaßen ausgedrückt:

$$\overline{R} = \overline{P} + \overline{Q} \dots (34)$$

Die Striche über den Buchstaben bedeuten, daß die Summierung eine geometrische ist.

Die Konstruktion der geometrischen Summe kann auch verkürzt ausgeführt werden: Man zieht vom Endpunkte B eines der beiden Vektoren eine Gerade BD , die gleich und parallel dem anderen Vektor $Q = AC$ ist; mit dem Endpunkte D verbindet man den Punkt A durch eine zweite Gerade; diese stellt dann die gesuchte geometrische Summe dar.

Wenn ein Vektor R gegeben ist, so kann man ihn auf eine unendliche Anzahl von Arten in zwei neue Vektoren P und Q so zerlegen, daß R die geometrische Summe der Vektoren P und Q ist. Dies Verfahren heißt Zerlegung des Vektors R in zwei Komponenten P und Q . Wenn P und Q einen rechten Winkel bilden, so ist

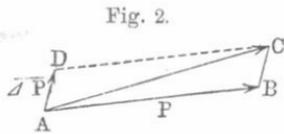
$$R = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \cos(R, P) = \frac{P}{R}, \quad \cos(R, Q) = \frac{Q}{R}.$$

Die geometrische Summe ist gleich der algebraischen, wenn die beiden Vektoren dieselbe Richtung haben. Das gleiche gilt auch von Vektoren mit entgegengesetzter Richtung; es müssen ihnen dann ungleiche Zeichen beigefügt werden, und ihre geometrische Summe wird gleich der algebraischen Differenz. Wenn die Vektoren ihrem Sinne nach als positiv gelten, so besteht folgende Ungleichheit:

$$P - Q \leq \overline{P} + \overline{Q} \leq P + Q \dots \dots \dots (35)$$

wobei $P \geq Q$ ist.

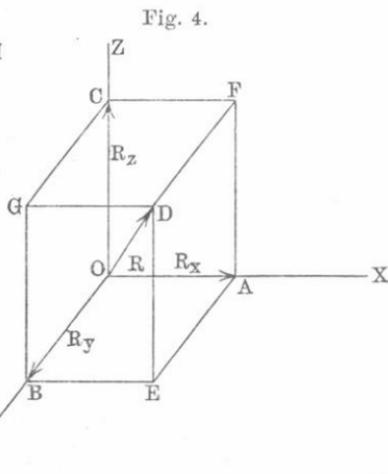
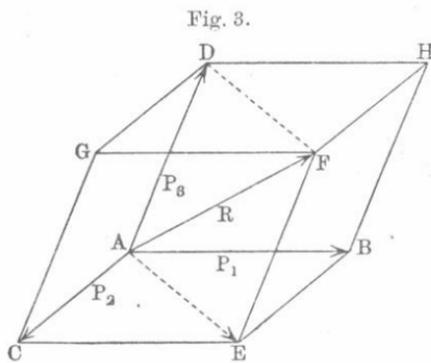
Die Änderung eines Vektors kann eine geometrische sein. Ändert sich der Vektor $P = AB$ (Fig. 2) der Größe und Richtung nach derart, daß der veränderte Vektor durch den Pfeil AC dargestellt wird, so kann man, wenn man das Parallelogramm konstruiert, sich vorstellen, daß die Änderung durch geometrische Addition des Vektors P mit einem Vektor AD hervorgebracht sei. Diesen Vektor nennen wir den geometrischen Zuwachs des Vektors P und bezeichnen ihn mit \overline{AD} zum Unterschiede vom algebraischen Zuwachs ΔP .



Die geometrische Summe R dreier Vektoren P_1, P_2 und P_3 , welche denselben Angriffspunkt A haben (Fig. 3), wird erhalten, wenn man zuerst zwei Vektoren P_1 und P_2 addiert, deren geometrische Summe der Vektor AE ist, und sodann die Summe $R = AF$ aus den Vektoren AE und P_3 bildet. Aus der Figur geht hervor, daß

$$\overline{R} = \overline{P_1} + \overline{P_2} + \overline{P_3}$$

dargestellt wird durch die Diagonale des aus den drei gegebenen Vektoren konstruierten Parallelepipeds.



Einfacher kann man R finden, wenn man vom Endpunkte B eines der drei Vektoren die Gerade $BE \parallel$ und $= P_2$ und darauf von E aus die Gerade $EF \parallel$ und $= P_3$ zieht. Die Gerade, welche A mit F verbindet, ist alsdann der gesuchte Vektor.

Umgekehrt kann man den Vektor R auf unendlich viele verschiedene Arten durch drei Komponentenvektoren ersetzen, nämlich durch die Kanten eines Parallelepipeds, dessen Diagonale R ist. Wenn die drei Komponentenvektoren zueinander senkrecht sind, so ist das Parallelepiped ein rechtwinkliges. Wählen wir den Angriffspunkt der Vektoren zum Anfangspunkte der Koordinatenachsen x, y, z , welche die Richtung der

drei Komponentenvektoren haben, und bezeichnen wir letztere mit R_x , R_y und R_z (Fig. 4), dann ist

$$\bar{R} = \bar{R}_x + \bar{R}_y + \bar{R}_z \dots \dots \dots (36)$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \dots \dots \dots (36, a)$$

$$\cos(R, x) = \frac{R_x}{R}; \quad \cos(R, y) = \frac{R_y}{R}; \quad \cos(R, z) = \frac{R_z}{R} \dots \dots (36, b)$$

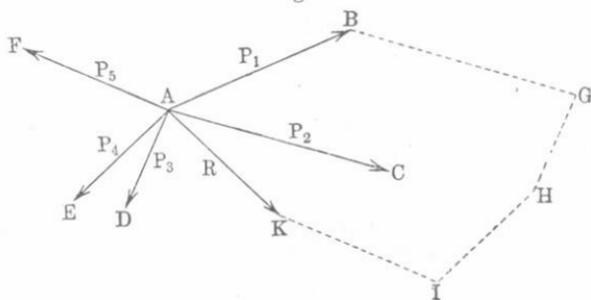
R_x , R_y und R_z sind die Projektionen des Vektors R auf die Richtungen der Koordinatenachsen.

Es seien uns zwei Vektoren P und Q und ihre auf den Koordinatenachsen liegende Komponenten P_x , P_y , P_z , Q_x , Q_y und Q_z gegeben; aus der analytischen Geometrie folgt dann, daß $\cos(P, Q) = \cos(P, x)\cos(Q, x) + \cos(P, y)\cos(Q, y) + \cos(P, z)\cos(Q, z)$ ist.

Setzt man in die rechte Seite die Werte der Kosinuse nach Formel (36, b) ein, so wird

$$PQ \cos(P, Q) = P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z \dots \dots \dots (37)$$

Fig. 5.



Wenn eine beliebige Zahl von Vektoren P_1 , P_2 , P_3, \dots, P_i den gemeinsamen Anfangspunkt A (Fig. 5) hat, so wird ihre geometrische Summe dadurch erhalten, daß man zunächst

zwei Vektoren geometrisch addiert, darauf die erhaltene Summe mit dem dritten addiert usw. Symbolisch drückt man das folgendermaßen aus:

$$\bar{R} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 + \dots + \bar{P}_i + \dots = \Sigma \bar{P}_i \dots \dots (38)$$

Einfacher läßt sich der Vektor R durch Konstruktion des sogenannten Polygons der Vektoren finden; vom Endpunkte B eines der Vektoren zieht man $BG \parallel$ und $= P_2$; dann von G die Gerade $GH \parallel$ und $= P_3$; von H die Gerade $HI \parallel$ und $= P_4$ usw. Die Gerade, welche dann den Punkt A mit dem Punkte K der gebrochenen Linie verbindet, die also das Polygon schließt, stellt die gesuchte geometrische Summe R dar.

Ist $P_{i,x}$ die Projektion des Vektors P_i auf eine beliebige Richtungslinie x und R_x die Projektion des Vektors R auf dieselbe Richtungslinie, so ist

$$R_x = \Sigma P_{i,x} \dots \dots \dots (39)$$

d. h. R_x ist die algebraische Summe der Vektoren $P_{i,x}$. Hieraus folgt nach (36, a)

$$R^2 = (\Sigma P_{i,x})^2 + (\Sigma P_{i,y})^2 + (\Sigma P_{i,z})^2 \dots \dots \dots (40)$$