

# Die Physik und ihre Bedeutung für die Menschheit

von

**O. D. Chwolson**

Prof. ord. an der Universität in Leningrad



Aus dem Russischen übersetzt von Georg Kluge

Mit 33 Abbildungen

---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

ISBN 978-3-663-00289-5      ISBN 978-3-663-02202-2 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-663-02202-2

**Alle Rechte vorbehalten**

**Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1924**

## Vorwort zur deutschen Ausgabe.

Dies Buch verdankt seine Entstehung einer Anregung von Seiten des Schriftstellers M. Gorki, welcher sich vielfach bemüht hat, die Verbreitung solcher populär-wissenschaftlicher Werke bei uns zu fördern, welche möglichst breiten Volksschichten zugänglich sind. Er veranlaßte den Verleger Z. J. Grschebin, die Herausgabe einer Serie von Büchern zu unternehmen, von denen jedes einer bestimmten Wissenschaft oder einem Zweige der Technik gewidmet sein sollte. Nach seinem Plane sollten das Wesen und die Ziele des betreffenden Wissenszweiges dargelegt, vor allem aber seine Bedeutung für die Menschheit scharf hervorgehoben werden. Es sollten populäre Volksbücher sein und beim Leser so gut wie gar keine Vorkenntnisse vorausgesetzt werden. Ich übernahm es, das der Physik gewidmete Buch zu verfassen. Da für die Technik andere Bücher bestimmt waren, begnügte ich mich, die Bedeutung der Physik für die Erkenntnis der uns umgebenden Erscheinungen darzustellen, wobei ich sechs ihrem innersten Wesen nach möglichst verschiedene Themata auswählte und nur zum Schluß ganz kurz die Bedeutung der Physik für die Technik streifte.

Leningrad, im Oktober 1924.

O. Chwolson.

## Vorwort zur russischen Ausgabe.

Die Bedeutung der Physik für die Menschheit beruht auf Entdeckungen, die unsere Kenntnisse bereichert haben, und auf Erfindungen, die aus diesen Entdeckungen hervorgingen und der Menschheit jene Wohltaten der Zivilisation schenkten, welche ihrem Streben nach Bequemlichkeit im weiten Sinne dieses Wortes entsprechen.

Die Erfindungen gehören in das Gebiet der Technik, die in den Fußstapfen der Physik vorwärtsschreitet und die dank der Physik erworbenen Kenntnisse verwertet. In bezug auf die Technik wollen wir uns auf wenige Seiten am Ende des Buches beschränken, die fast nur eine Aufzählung der allgemein bekannten Erfindungen enthalten, die wir der Physik verdanken. Fast das ganze Buch ist der Bereicherung des menschlichen Wissens gewidmet, die sich auf physikalische Forschungen gründet, wobei wir uns auf das wichtigste beschränken müssen, welches die hervorragende Bedeutung der Physik in das rechte Licht rückt. Indem wir das erste Kapitel der Bedeutung der Wissenschaft im allgemeinen und das zweite einer speziellen Charakteristik der Physik, ihren Aufgaben und Methoden widmen, bringen wir in Kapitel III bis VIII sechs Skizzen, deren jede eine bestimmte Gruppe von physikalischen Erscheinungen und die großen Entdeckungen, zu denen ihre Erforschung führte, behandelt. Um jedoch eine richtige und klare Vorstellung von diesen Entdeckungen zu erlangen, muß man gar mancherlei wissen und sich über Sinn und Bedeutung einer großen Anzahl von unumgänglichen Bezeichnungen vollkommen im klaren sein. Es mußte daher, um das Buch wirklich der Allgemeinheit zugänglich zu machen, der Erklärung dieser Bezeichnungen und einer allseitigen Beleuchtung der mit ihnen verknüpften Begriffe viel Platz eingeräumt werden.

Wir waren bestrebt, den sechs Skizzen inhaltlich nach Möglichkeit verschiedenen Charakter zu geben. Drei von ihnen sind dem Aufbau der Materie gewidmet, eine der Strahlungsenergie und zwei jenen großen Gesetzen, die alle physikalischen Erscheinungen in dem unserer Beobachtung zugänglichen Teile des Weltalls beherrschen.

Petrograd, im April 1920.

O. Chwolson.

# Inhaltsverzeichnis.

## 1. Kapitel.

	Seite
<b>Einleitung</b> . . . . .	1

## 2. Kapitel.

### Die Physik, ihre Aufgaben und Methoden.

§ 1. Die allgemeine Aufgabe der Physik; ihre Bedeutung für die anderen Wissenschaften . . . . .	10
§ 2. Die drei Hauptaufgaben der Physik. Die Entdeckung der physikalischen Erscheinungen . . . . .	16
§ 3. Die Erforschung der physikalischen Erscheinungen . . . . .	19
§ 4. Die Erklärung der physikalischen Erscheinungen. Die Hypothesen über ihre Ursachen . . . . .	24
§ 5. Andere Arten von Hypothesen . . . . .	30
§ 6. Die historische Bedeutung der Hypothesen über die Ursachen. Physik und Erkenntnistheorie . . . . .	33
§ 7. Die Einteilung der Physik . . . . .	38
§ 8. Schlußbetrachtung . . . . .	43

## 3. Kapitel.

### Moleküle, Atome und Elektronen.

§ 1. Einleitung . . . . .	45
§ 2. Atome und Moleküle . . . . .	47
§ 3. Gewicht und Dimensionen der Atome und Moleküle . . . . .	51
§ 4. Die Elektronen . . . . .	56
§ 5. Schlußbetrachtung . . . . .	61

## 4. Kapitel.

### Erhaltung der Masse und der Energie.

§ 1. Einleitung . . . . .	62
§ 2. Das Gesetz oder Prinzip von der Erhaltung der Masse . . . . .	63
§ 3. Arbeit und Energie . . . . .	65
§ 4. Das Gesetz oder Prinzip von der Erhaltung der Energie . . . . .	76
§ 5. Schlußbetrachtung . . . . .	87

5. Kapitel.

**Die Wärme als Bewegung der Moleküle und Atome.**

	Seite
§ 1. Einleitung . . . . .	88
§ 2. Was ist Wärme? . . . . .	88
§ 3. Die Grundeigenschaften der Gase . . . . .	96
§ 4. Die Grundlagen der kinetischen Gastheorie . . . . .	100
§ 5. Die Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Die Brownsche Erscheinung . . . . .	106
§ 6. Schlußbetrachtung . . . . .	118

6. Kapitel.

**Die Strahlungsenergie.**

§ 1. Einleitung . . . . .	119
§ 2. Die Ausbreitung der Schwingungen. . . . .	122
§ 3. Die Grunderscheinungen der Optik und die Geschichte der Frage nach dem Wesen des Lichtes . . . . .	127
§ 4. Das Licht als eine sich ausbreitende Wellenbewegung. Die Spektra	134
§ 5. Einige Eigenschaften der Lichtstrahlen . . . . .	141
§ 6. Die Strahlungsenergie. Infrarote und ultraviolette Strahlen . .	145
§ 7. Elektrische Schwingungen . . . . .	153
§ 8. Das Prinzip der Resonanz . . . . .	160
§ 9. Die Hertzschen Strahlen . . . . .	164
§ 10. Die Röntgenstrahlen . . . . .	172
§ 11. Übersicht über alle Arten der Strahlungsenergie . . . . .	178
§ 12. Die Grundidee der elektromagnetischen Theorie der Strahlungs- energie. . . . .	181
§ 13. Der Druck der Strahlungsenergie. Schlußbetrachtung . . .	193

7. Kapitel.

**Der zweite Hauptsatz. Unsere Welt als Organismus.**

§ 1. Einleitung . . . . .	196
§ 2. Die physikalischen Prozesse und ihre Richtung . . . . .	197
§ 3. Natürliche und unnatürliche Prozesse . . . . .	202
§ 4. Die Kompensation der unnatürlichen Prozesse . . . . .	206
§ 5. Der zweite Hauptsatz. Die Energiestreuung . . . . .	213
§ 6. Der zweite Hauptsatz und die Wahrscheinlichkeit des Zustandes	218
§ 7. Unsere Welt als Organismus. . . . .	226
§ 8. Schlußbetrachtung . . . . .	230

8. Kapitel.

**Struktur und Zerfall des Atoms. Radioaktive Erscheinungen.**

§ 1. Einleitung . . . . .	231
§ 2. Atomzahlen. Ionisation der Gase. Positive Elektrizität . . .	231
§ 3. Die Struktur des Atoms. . . . .	236

	Seite
§ 4. Die Ionisation der Gase. Die Emission der Strahlungsenergie	242
§ 5. Die Umwandlung der Elemente. Die Struktur der Materie. Die Durchdringbarkeit der Atome . . . . .	247
§ 6. Die Radioaktivität . . . . .	252
§ 7. Die radioaktiven Umwandlungen und die Lehre vom Zerfall der Atome . . . . .	257
§ 8. Schlußbetrachtung. . . . .	263

9. Kapitel.

**Die Physik und das Streben der Menschen  
nach Bequemlichkeit.**

§ 1. Einleitung . . . . .	264
§ 2. Die Elektrotechnik . . . . .	267
§ 3. Wärmetechnik. Optotechnik. Mechanik . . . . .	273
§ 4. Schlußbetrachtung. . . . .	276
<b>Schluß</b> . . . . .	<b>277</b>

---

## 1. Kapitel.

### Einleitung.

Lang und ungemein kompliziert war der Weg, den die Menschheit seit der Zeit durchschreiten mußte, wo eine zwar einfache, doch artikulierte Rede, der aufrechte Gang und andere wichtige Merkmale den Menschen auf eine besondere höhere Stufe stellten, ihm unermeßliche Perspektiven eröffneten und aus menschenähnlichen Tieren (Anthropoiden) prähistorische Menschen schufen. Die Anfänge dieses Weges verlieren sich in nebliger Ferne, welche die „Geschichte“ des prähistorischen Menschen verhüllt, und wohl kaum wird es jemals gelingen, ein klares und wahrheitsgetreues Bild der allmählichen Entwicklung der Menschheit in jener so weit zurückliegenden Epoche zu entwerfen. Mehr oder weniger bekannt sind uns dagegen die Wege, welche die Menschheit in historischen Zeiten durchschritt und die sie zur Höhe der modernen Kultur führten.

Es besteht für uns vorläufig keine Notwendigkeit, auf das komplizierte Bild oder vielmehr auf die große Anzahl von verschiedenartigen Bildern einzugehen, deren Gesamtheit eine einigermaßen vollständige Darstellung der vielseitigen modernen Kultur geben könnte. Die rein äußerlichen Merkmale dieser Kultur sind allgemein bekannt; wir sehen und fühlen sie bei jedem Schritt, in jedem Augenblick unseres bewußten Daseins und können wir daher an dieser Stelle sogar auf eine flüchtige Charakteristik verzichten.

Sprechen wir in diesem Buche von Kultur, so meinen wir nicht alle ihre Seiten und lassen beispielsweise alles, was mit Kunst und Literatur verknüpft ist, vollkommen außer acht.

In der Folge werden wir auf einzelne besonders wichtige Seiten des Polyeders, unter dessen Bilde uns die moderne Kultur der Menschheit erscheint, ausführlich eingehen müssen. Ohne uns jedoch vorläufig mit Einzelheiten zu befassen, wollen wir

eine wichtige und interessante Frage zu analysieren versuchen: Wie ist die allmähliche Entwicklung der Kultur vor sich gegangen? Wo sind die verborgenen Hebel und Triebfedern zu suchen, die der Menschheit die Möglichkeit gaben, alles das zu erreichen, worauf sie heute mit Recht stolz sein darf?

Wir wissen, daß die Kräfte, welche die Menschheit auf dem Wege der Entwicklung vorwärtsgehen ließen, nicht irgendwo von außen herkamen, daß die Kultur den Menschen nicht gewissermaßen als eine Offenbarung, als fertiges Ergebnis einer Arbeit irgendwelcher äußerer, über ihnen stehender schöpferischer Kräfte dargereicht wurde. Wir wissen vielmehr, daß der Mensch aus eigener Kraft, ausschließlich dank seiner beharrlichen Arbeit und seinem Genie, die gegenwärtige Höhe erreicht hat; daß in der Menschheit selbst die Hebel und Triebfedern verborgen sind, die sie unaufhörlich immer höher und höher heben. Der Mensch hat seine Kultur selbst geschaffen und in seinen Taten ist ihre Quelle zu suchen.

Um eine Antwort auf die von uns gestellte Frage zu erhalten, müssen wir daher zuerst die Taten des Menschen betrachten, und die unzweifelhaft in ihnen verborgene Quelle der Kultur zu finden suchen.

Es versteht sich von selbst, daß unter den Taten des Menschen keine vorhanden ist, deren klar ausgeprägte Aufgabe im Entwickeln der Kultur bestünde. Es gibt keine Menschen und kann auch keine geben, denen die spezielle Aufgabe gestellt wäre, diese Kultur zu fördern; dagegen gibt es welche, deren Arbeit es zu danken ist, daß die Kultur fortfährt, unentwegt zu wachsen, daß ihre alten Seiten sich weiter entwickeln und neue entstehen. Es ist klar, daß die fortwährende Hebung des Kulturniveaus der Menschheit sozusagen ein zufälliges, ja vielleicht unerwartetes „Nebenprodukt“ der menschlichen Tätigkeit darstellt, in der eben die Züge oder Seiten zu suchen sind, welche das so kostbare „Nebenprodukt“ schaffen, Stein an Stein fügen und den majestätischen Bau der menschlichen Kultur errichten.

Versuchen wir daher, in das Wesen der menschlichen Tätigkeit zu dringen und in ihr die Hebel zu finden, durch deren Einfluß dieser Tätigkeit ihre Richtung gegeben und sie aufrecht erhalten wird.

Beobachten wir die Vorgänge um uns her, so sehen wir zunächst, daß, scheinbar ausnahmslos, alle Menschen nach irgend etwas streben, für irgend etwas arbeiten, sich abmühen und kämpfen, irgend etwas erreichen wollen und irgendwelche Wünsche zu befriedigen bestrebt sind. Dem Charakter und den Zielen nach erscheinen uns die Taten der Menschen unendlich mannigfach. In Geschäftigkeit, Kampf und im Wirrwarr sich kreuzender Bestrebungen wird unendlich verschiedenes zu erreichen versucht. Betrachtet man jedoch alle diese so verschiedenartigen Ziele etwas näher, versucht man, sich in die Tätigkeit der Menschen hineinzudenken und in das Wesen der Ziele, die sie erstreben, tiefer einzudringen, so zeigt es sich, daß die Frage nach den Hebeln, unter deren Druck die menschlichen Taten vollzogen werden, sich ziemlich einfach beantworten läßt, und daß die Anzahl dieser Hebel nur sehr gering ist. Es erweist sich, daß diese ganze menschliche Geschäftigkeit, dieses scheinbare Chaos von Bestrebungen, Hoffnungen und Wünschen mit ihren glücklichen Erfolgen und bitteren Enttäuschungen sich auf drei Hauptziele zurückführen läßt, um deren Erreichung die Menschen ihr ganzes Leben lang kämpfen. Nicht alle drei Ziele spielen die gleiche Rolle. Nach dem ersten streben ausnahmslos alle Menschen; nach dem zweiten und dritten dagegen verhältnismäßig nur wenige.

Diese drei großen Ziele, auf die sich, für uns unmerklich, alle unsere Beschäftigungen und Taten einstellen, heißen: Bequemlichkeit, Erkenntnis und Ruhm. Wir wollen nicht darüber streiten, ob die von uns betrachtete Frage sich tatsächlich mit diesen drei Zielen erschöpft und ob es nicht noch andere, wenn auch weniger wichtige Hebel gibt, die neben den erwähnten drei Haupthebeln die Tätigkeit der Menschen leiten. Man könnte die Liebe nennen . . . Es ist das jedoch ein Hebel ganz besonderer Art, dessen Wirkung zeitlich beschränkt ist, und die Liebe zur Familie kann wohl ohne weiteres auf den Hebel Bequemlichkeit zurückgeführt werden. Auch das Streben nach Schönheit und Moral kann bei den Zwecken, die wir verfolgen, außer acht gelassen werden.

Der dritte der drei Haupthebel, das Streben nach Ruhm, möge unbetrachtet bleiben. Sein Einfluß in der Kulturgeschichte, als der eines vollkommen selbständigen Faktors, ist unabhängig

von jenem Streben nach Bequemlichkeit und wohl kaum von irgendwelcher Bedeutung; möglich, daß er verschwindend klein, ja sogar negativ war. Wir wollen diese Frage hier keiner Analyse unterwerfen, denn das Ergebnis würde für uns keine merkliche Bedeutung besitzen. Mithin bleiben nur zwei Hauptziele übrig, nach denen die Menschen streben: zwei Hebel sind es, die fast alle Taten der Menschen beherrschen: das Streben nach Bequemlichkeit und das Streben nach Erkenntnis. Und diese wollen wir nun näher betrachten.

Wenden wir uns zunächst dem ersten Hebel zu, der zwar nicht wichtiger ist als der zweite, insofern jedoch die Hauptrolle spielt, als er die Taten aller Menschen ohne Ausnahme beherrscht. Das Streben nach Bequemlichkeit regiert gebieterisch das menschliche Geschlecht, erfüllt sein Leben, dringt in alle unzähligen Abzweigungen jener Kanäle ein, in denen die Tätigkeit der Menschen dahinströmt. Es versteht sich von selbst, daß der Wortbegriff „Bequemlichkeit“ hier in sehr weitem Sinne aufzufassen ist. Unter Bequemlichkeit verstehen wir vor allen Dingen die Beseitigung alles dessen, was unser Leben erschwert, uns überflüssige Arbeit aufbürdet, Zeit und Kräfte fordert, die zu sparen wir nach Möglichkeit stets bestrebt sind. Hierher gehört auch das Bestreben, uns von allem frei zu machen, was uns Unruhe und Leiden verursacht, wie Krankheiten und allerlei Gefahren, die uns bedrohen können: von Tieren, Menschen oder Naturkräften, die für gewöhnlich ruhend, doch plötzlich zu gefährlichen Feinden des Menschen werden. Man denke an Erscheinungen, wie Stürme, Gewitter, Überschwemmungen, Erdbeben, Lavinen, Bergstürze, Feuerschaden usw. Hierher gehört zweifellos auch das Streben nach Reichtum, oder wenigstens nach einem Ausweg aus der Armut, wie sie enge, kalte und feuchte Räume, Mangel an warmer Kleidung und ausreichender Nahrung mit sich bringen. Man erkennt, welch mannigfaltige Seiten der Begriff Bequemlichkeit umfaßt, doch ist es selbstverständlich, daß die Hauptrolle die Bequemlichkeit im gewöhnlichen Sinne des Wortes spielt, die Bequemlichkeit, der nicht nur die unzähligen zu ihrer Herbeiführung geschaffenen Gegenstände dienen, sondern auch technische Einrichtungen in immer höherer Vollendung in Verkehr, Nachrichtenübermittlung, Beleuchtung usw. Die Jagd nach

Bequemlichkeit im weiten Sinne des Wortes ist es, die all die unzähligen und, wie es scheinen könnte, gänzlich verschiedenartigen Ziele umfaßt, nach denen die Menschen streben und um die sie einen unaufhörlichen Kampf vom Beginn des selbständigen Lebens bis zum letzten Atemzuge führen. Weiter unten werden wir an Beispielen zeigen, wie das Streben der Menschheit nach Bequemlichkeit die Wissenschaft, Technik und Industrie zu fruchtbarer Betätigung anregt.

Als zweites Ziel, nach dem die Menschen, wenn auch in erheblich geringerer Zahl, eifrig und unentwegt streben, nannten wir die Erkenntnis. Sie unterscheidet sich wesentlich vom gewöhnlichen Wissen. Worin besteht nun jenes Streben nach Erkenntnis, das in uns lebt, sich in den Tiefen unserer Seele birgt, als eine ihrer geheimnisvollen und wunderbaren Eigenschaften? Es besteht in dem Drange, alles zu erforschen und in seiner Entwicklung zu verfolgen, was wir sinnlich wahrnehmen oder auch auf Grund sinnlicher Wahrnehmungen folgern. Dieser Wissensdrang ist vollkommen unabhängig davon, ob die erlangte Erkenntnis uns irgendwelchen Nutzen bringen kann, d. h. irgendwie unseren Wohlstand und die Bequemlichkeit unseres Lebens zu vergrößern imstande ist. Der Durst nach Erkenntnis ist von leerer Neugierde weit entfernt; in ihm birgt sich eine der wunderbarsten, erhabensten Eigenschaften des Menschen. Wir wollen die uns umgebende Natur, von der wir selbst ein Teilchen bilden, erkennen, ihre Geheimnisse ergründen und einen Blick in das innere Wesen des Geschehens werfen. Wir wollen uns nicht auf das bloße Wissen beschränken, wir streben nach Erkenntnis, die mit dem Verstehen auf das Engste verknüpft ist.

Spuren dieses Strebens nach Erkenntnis kann man auch bei niedrig stehenden Völkern finden; jedoch bezieht es sich dort fast ausschließlich auf solche Gegenstände oder Erscheinungen, die dem Menschen nützlich oder schädlich sind. Fehlt die Möglichkeit der Erkenntnis, dann hilft man sich damit, derartige Erscheinungen als Handlungen verschiedenartiger Götter, Göttinnen, böser und guter Geister usw. aufzufassen. Auch jetzt ist dieser Ausweg, Erscheinungen zu deuten, in allerlei Aberglauben (Haus- und Waldgeister, Nymphen usw.) noch ziemlich verbreitet. In dem Maße jedoch, in dem der Mensch sich mehr und mehr geistig

erhebt, macht sich immer lebhafter in ihm der Wunsch geltend, die wahren, seiner unmittelbaren Beobachtung entzogenen Ursachen der ihn umgebenden Erscheinungen zu erkennen, sich in ihnen zurechtzufinden und in ihr verborgenes Wesen einzudringen. Es wäre überflüssig, Beispiele anzuführen, auf einige der unzähligen Fragen hinzuweisen, die der Durst nach Erkenntnis bei Betrachtung alles dessen aufwirft, was im Himmel und auf Erden vor sich geht, in der toten, unorganisierten Materie und in der organisierten lebendigen, aus der die Tiere und Pflanzen aufgebaut sind. In diesem Buche soll nur von solchen Erscheinungen die Rede sein, die sich in der toten Materie abspielen.

Unwillkürlich drängt sich die Frage auf, ob dem menschlichen Streben nach Erkenntnis nicht eine gewisse ursprüngliche Veranlassung zugrunde liegt, die, vielleicht nicht stets klar erkannt, den Menschen den Weg zum Verstehen alles dessen, was ihn umringt und was er beobachtet, gehen läßt. Eine derartige verborgene Triebfeder gibt es ohne Zweifel, und es dürfte wohl nicht schwer fallen, sie anzugeben. Von allen Gegenständen und Erscheinungen, die in der uns umgebenden Welt einer Beobachtung zugänglich sind, bieten wohl das größte Interesse der Mensch selbst und die rätselhaften Erscheinungen, die mit dem Leben und der Selbsterkenntnis verknüpft sind. Heine fragt:

„Sagt mir, was bedeutet der Mensch?  
Woher ist er kommen? Wo geht er hin?  
Wer wohnt dort oben auf goldenen Sternen?“

Er fügt hinzu:

„Und ein Narr wartet auf Antwort.“

In Wirklichkeit aber verliert die Menschheit die Hoffnung nicht, einst Antwort auf alle diese Fragen zu erhalten. Es sind ja die brennendsten Fragen, die den Menschen vom Augenblick an bewegen, wo er beginnt, die Erscheinungen der äußeren Welt einer bewußten Kritik zu unterwerfen und seine innersten Erlebnisse, die der Beobachtung eines anderen Menschen unzugänglich sind, zu analysieren. Das Rätsel des eigenen Seins, des Lebens, und vielleicht in noch höherem Maße das Rätsel des Todes zu lösen, ist das höchste Problem, das ersehnteste Ziel, nach dem die Gedanken und Hoffnungen des Menschen streben.

Vielleicht nicht immer klar erfaßt, lockt doch dieses ewige Problem stets die Menschheit, und wohl nie wird sie aufhören, nach einer Lösung zu suchen. Und wenn der Mensch danach dürstet, die Geheimnisse der toten und der lebendigen Natur zu ergründen, so leitet ihn die in seiner Seele verborgene Hoffnung, auf diesem Umwege wenigstens um ein Haarbreit der Kardinalfrage des eigenen Seins näher zu kommen. In der Hoffnung, sich selbst zu erkennen, sucht der Mensch die äußere Natur und alle Lebensäußerungen des einzelnen Menschen, wie auch ganzer Völker zu verstehen, er erforscht ihre Geschichte, Sprache und ihre ganze komplizierte Lebensweise.

Das Streben nach Erkenntnis müssen wir daher dem Streben nach Bequemlichkeit gleichstellen. Beide sind gleich wichtig und intensiv, wenn auch nicht in gleichem Maße verbreitet. In der ewigen Hast und dem Chaos des Lebens regieren sie fast alle Taten des Menschen.

Am Anfang des Kapitels hatten wir die Frage aufgeworfen: Wie ist die allmähliche Entwicklung der menschlichen Kultur vor sich gegangen? Wo sind die verborgenen Hebel und Triebfedern zu suchen, deren Einfluß der Menschheit die Möglichkeit gab, alles das zu erreichen, worauf sie heute mit Recht stolz sein darf? Es ist bereits darauf hingewiesen worden, daß der Mensch seine Kultur selbst geschaffen hat und daß eben in seinen Taten die kulturfördernden Kräfte zu suchen sind. Diese Taten aber werden, wie wir sahen, hauptsächlich vom Streben nach Bequemlichkeit und Erkenntnis regiert. Wir schließen daraus, daß dieses Streben die Urquelle der Kulturentwicklung darstellt.

Ihr Entstehen und ihre Entwicklung hat die Kultur dem menschlichen Streben nach Bequemlichkeit und Erkenntnis zu verdanken.

Es drängt sich nun eine andere Frage auf: In welcher Sphäre der menschlichen Tätigkeit konzentrieren sich die unmittelbaren Quellen der Kulturentwicklung? Wer hat denn schließlich die Menschen aus dem Urzustand zur Höhe der modernen Kultur, aus Unwissenheit zum Wissen und Können geführt? Auf diese Fragen kann nur eine Antwort gegeben werden: die wissenschaftliche Tätigkeit des Menschen gab ihm die Kultur; die

Göttin Wissenschaft erhob die Menschheit und beschenkte sie mit allen Kulturgütern, ohne die das Leben heute undenkbar wäre. Falsch wäre es jedoch anzunehmen, die Wissenschaft sei ein Produkt der Kultur. Wo die Wissenschaft den ihr gebührenden Platz einnimmt, dort gedeiht das Volk, dort wächst und erstarkt die Kultur, dort findet man alle Bequemlichkeiten des Lebens. Mit Recht sagt ein russischer Dichter: „Wo die Wissenschaft hochgehalten wird, dort steht auch der Mensch hoch.“

Die Wissenschaft führt zum Verstehen der uns umgebenden Gegenstände und Erscheinungen. Sie deckt die Eigenschaften der verschiedenen Stoffe auf, redet von inneren, einer unmittelbaren Beobachtung entzogenen Zusammenhängen zwischen einzelnen Erscheinungen, den Gesetzen, welchen diese Erscheinungen gehorchen, ihren Quellen und den Resultaten, zu denen sie führen. Nach und nach deckt sie die Geheimnisse der toten und der lebendigen Natur auf. Sie gibt uns Kunde vom Aufbau der Materie, zeigt das Wesen des Lichtes, der Wärme und der Elektrizität. Sie ist die Fackel, deren Strahlen ins Innere der Erde dringen, bis zu den Gestirnen reichen und die Geheimnisse der lebendigen organisierten Materie beleuchten. Der Durst nach Erkenntnis führte zur Wissenschaft und sie allein kann ihn löschen.

Ungezählte Erfindungen stellen die unmittelbare Quelle der Bequemlichkeiten dar, die ein Kulturmensch genießt. Wie sind diese Erfindungen zustande gekommen, welcher fruchtbare Boden hat sie hervorgebracht? Auf diese Frage gibt es nur eine Antwort: als Urquelle aller Erfindungen, die zum Wohle und zur Bequemlichkeit des Menschen gemacht wurden, erscheint dieselbe Göttin — Wissenschaft. Freigiebig bedenkt sie uns mit Erkenntnis und Bequemlichkeit, und diese beiden Gaben sind auf das engste miteinander verknüpft. Indem sie ausschließlich nach Erkenntnis strebt, erforscht die Wissenschaft bis in die kleinsten Einzelheiten die Eigenschaften der verschiedenen Stoffe. Sie deckt sie auf und lehrt uns, unzählige neue Stoffe herzustellen, die als solche in der Natur nicht vorkommen und in vielen Fällen ungeahnte, ja zuweilen überraschende und für die Menschheit unschätzbar nützliche Eigenschaften aufweisen. Daneben erforscht die Wissenschaft die um

uns her auftretenden Erscheinungen. Nach einem stets streng durchdachten Plane ruft sie künstlich neue Erscheinungen hervor, deren mögliches Auftreten vorhergesehen oder geahnt werden kann. Dabei stößt sie zuweilen unerwartet, scheinbar zufällig, auf solche Erscheinungen, die keine Abart der bereits bekannten darstellen, sondern ihrem Wesen nach zweifellos neu sind, der Menschheit unermeßliche Perspektiven eröffnen und allmählich zu Quellen neuer Güter und „Bequemlichkeiten“ im weiten Sinne des Wortes werden. Um jedoch die verschiedenen Erscheinungen auswerten zu können, muß man sie tief und allseitig erforscht haben. Dazu dienen die wissenschaftlichen Laboratorien und Institute, in denen unentwegt gearbeitet wird, und wo die großen Entdeckungen zum Wohle der Menschheit das Licht der Welt erblicken. Die Wissenschaft ist bestrebt, alle Seiten einer Erscheinung zu erforschen. Sie versucht, die Bedingungen ihres Entstehens zu entdecken, ihr Wesen zu erfassen, die zuweilen äußerst komplizierten Gesetze, denen sie gehorcht, zu ergründen und die meist tief verborgenen Zusammenhänge zu finden, die zwischen ihr und anderen Erscheinungen bestehen, welche zuweilen so wenig Gemeinsames aufweisen, daß ein Zusammenhang überhaupt nicht für möglich gehalten wurde. Der tiefen Erforschung der Eigenschaften verschiedener Stoffe und der in ihnen auftretenden Erscheinungen haben wir zu verdanken, daß unser Wissen reicher wird, und es uns möglich wird, die Stoffe und Erscheinungen zum Wohle der Menschheit zu verwerten, und damit ist eine Vervollkommnung der Bequemlichkeiten gegeben, die eine Grundbedingung der Kulturblüte darstellt. Fassen wir alle Ausführungen kurz zusammen, so können wir sagen, daß die Wissenschaft, deren ausschließliche Aufgabe darin besteht, dem Menschen das von ihm erstrebte Wissen zu verleihen, zu unzähligen Entdeckungen führt. Die Ausnutzung derselben bringt die vielen Erfindungen, die das Streben nach Bequemlichkeit befriedigen. Die miteinander eng verknüpften Entdeckungen und Erfindungen nehmen mithin ihren Ursprung in der Wissenschaft. Als unmittelbare Aufgabe der Wissenschaft müssen wir jedoch lediglich die Vertiefung unserer Kenntnisse ansehen, ohne an praktische Ziele, d. h. an die Bequemlichkeiten zu denken, die der Menschheit von Nutzen sein könnten.

Die Wissenschaft gibt uns die Entdeckungen: das ist ihre ureigenste Aufgabe. Sie ist für den Nutzen, den der Mensch daraus zu ziehen vermag, nicht interessiert. Von Wichtigkeit ist für sie nur die Bereicherung unseres Wissens, das mit wissenschaftlicher Arbeit verknüpft ist und mit jedem Schritt auf dem unendlichen Wege zur Erkenntnis der Wahrheit. Sprechen wir von Wissenschaft, so meinen wir die sogenannte reine Wissenschaft im Gegensatz zur angewandten, d. h. zur Technik mit ihren unzähligen Abzweigungen.

Wir gelangen also endgültig zu folgender Formulierung: die Wissenschaft liefert uns unmittelbar die Entdeckungen, die zur Erkenntnis führen und mittelbar die Erfindungen, die uns Bequemlichkeit gewährleisten. Die beiden großen Ziele, nach denen die Menschheit strebt, werden dank der Wissenschaft erreicht und in ihr ist die Quelle der Kultur zu erblicken.

Wir sprachen bis jetzt von der Wissenschaft als von einem Ganzen, das alles der Beobachtung zugängliche erforscht und uns die Kenntnisse gibt, nach denen wir dürsten. In dem Maße jedoch, in welchem die schier unermessliche Zahl der mannigfaltigen Forschungsobjekte wuchs, begann auch die Wissenschaft in Spezialgebiete zu zerfallen. Heute haben wir es mit einer großen Anzahl verschiedener Wissenschaften zu tun, deren jede ihre eigene Aufgabe, eigenen Wirkungskreis, eigene Methoden besitzt und eine mehr oder weniger selbständige Quelle der Erkenntnis darstellt. Einer solchen Spezialwissenschaft soll vorliegendes Buch gewidmet sein: der Physik und ihren Verdiensten um die Menschheit.

## 2. Kapitel.

### Die Physik, ihre Aufgaben und Methoden.

§ 1. Die allgemeine Aufgabe der Physik; ihre Bedeutung für die anderen Wissenschaften. Es ist bereits gesagt worden, daß die Wissenschaft im weitesten Sinne des Wortes in eine große Anzahl von Spezialwissenschaften zerfallen ist. Falsch wäre es jedoch anzunehmen, daß einige von diesen wichtiger seien als andere und ihrer Bedeutung und Stellung nach vorzuziehen wären.

Zweifellos sind alle Wissenschaften gleich interessant und wichtig. Dennoch muß zugegeben werden, daß die Physik eine Ausnahmestellung einnimmt, einen Mittelpunkt bildet, um den sich eine große Anzahl von anderen Wissenschaften gruppiert, die aus ihrer reichen wissenschaftlichen Schatzkammer schöpft und teilweise ihre Forschungsmethoden sich zu eigen gemacht hat. Von diesen Wissenschaften soll weiter unten die Rede sein.

Wir wollen zuerst die Aufgabe der Physik ganz allgemein definieren. Späterhin werden wir gezwungen sein, die Definition enger zu fassen, doch wird uns die Größe der Aufgabe als wenig verändert erscheinen gegenüber der ersten Definition. Es ist erwähnt worden, daß die Materie, aus der die uns umgebenden Körper aufgebaut sind, in zwei Arten auftritt: als tote, unorganisierte, und als lebendige, organisierte Materie. Aus letzterer besteht das Tier- und das Pflanzenreich. Die Aufgabe der Physik, im weitesten Sinne des Wortes, kann folgendermaßen formuliert werden: die Eigenschaften der toten Materie und alle in dieser vorkommenden Erscheinungen zu erforschen. Es muß an dieser Stelle hinzugefügt werden, daß die lebendige organisierte Materie aus denselben Substanzen besteht, die auch in totem unorganisiertem Zustande vorkommen oder wenigstens gewonnen werden können. Es ist daher klar, daß die Ergebnisse, zu denen die Physik gelangt, fast in vollem Umfange auch auf die lebendige Materie angewandt werden können. Mit diesen Ergebnissen erschöpfen sich jedoch die Eigenschaften der lebendigen Materie und die in ihr auftretenden Erscheinungen bei weitem nicht. Nur das Wesen des Lebens, dieser geheimnisvollen Quelle von Prozessen, mit denen sich die biologischen Wissenschaften befassen, läßt die Physik unberührt.

Die Definition, die soeben für die Aufgabe der Physik gegeben wurde, muß verengt werden, denn aus der Physik, als einer die ganze tote Natur umfassenden Wissenschaft, ist eine Reihe von Wissenschaften hervorgegangen. Diese befassen sich mit bestimmten Gruppen von Erscheinungen, die in allen Arten der toten Materie auftreten oder an einige besondere Arten gebunden sind. Die Lostrennung einer ganzen Reihe Wissenschaften von der Physik ist uralte und eine von ihnen, die Astronomie, ist vielleicht älter als die Physik selbst. Das Gebiet dieser Wissenschaften ist

stets gewachsen und heute bilden sie selbständige reiche Quellen des Wissens und der Erkenntnis. Es sind das folgende Gebiete:

1. Die Mechanik, d. h. die Lehre von Bewegungen und Kräften. Ihre Grundlagen wurzeln bis zum heutigen Tage in der Physik, und nur die weitere mathematische Bearbeitung komplizierterer Fragen führte zu dieser besonderen Wissenschaft, die heute teilweise der reinen Mathematik näher steht als der Physik.

2. Die Chemie, die Erscheinungen erforscht, unter deren Einfluß sich die Zusammensetzung der Materie ändert und infolge von „chemischer“ Zerlegung oder Verbindung anderer Stoffe neue entstehen. Heute stellt die Chemie eine selbständige, ungeheuer umfangreiche Wissenschaft dar und ist ihrerseits in eine große Anzahl von Spezialgebieten zerfallen, wie sie z. B. unter dem Namen anorganische, organische, analytische, technische, physikalische, physiologische usw. Chemie bekannt sind.

3. Die Astronomie, welche die Gestirne erforscht und ihre Bahnen, Aufbau und die auf ihrer Oberfläche auftretenden Erscheinungen zu ergründen sucht.

4. Die Geophysik, die zum Gegenstand ihrer Forschung die physikalischen Erscheinungen macht, welche auf der Oberfläche der Erde und teilweise in ihrem Innern auftreten. Sie zerfällt in die Meteorologie, die physikalische Geographie, die Seismologie (Erdbebenlehre), optische Erscheinungen der Atmosphäre, die Lehre vom Erdmagnetismus, von der Luftelektrizität usw.

5. Die Mineralogie und Kristallographie.

6. Die Geologie.

Alle diese Wissenschaften befassen sich, wie die Physik selbst, mit der toten unorganisierten Natur. Es ist unmöglich, eine strenge Grenze zwischen ihnen und der Physik zu ziehen. In ihrer allmählichen Entwicklung fortschreitend, haben sie sich immer mehr von der Physik entfernt und verloren scheinbar jeglichen Zusammenhang mit ihr. Da trat ein historisch wichtiges und bemerkenswertes Ereignis ein. Einige der genannten Wissenschaften wandten sich plötzlich wieder der Physik zu und begannen aus ihrer Schatzkammer, dem aufgespeicherten reichen

Material zu schöpfen. Sie bedienten sich nicht nur der Ergebnisse, sondern auch der Methoden der Physik. Das Ergebnis war überraschend: im Bestande dieser Wissenschaften bildeten sich neue umfangreiche Gebiete, eigentlich neue, sozusagen Zwischen- oder Grenzwissenschaften mit der Physik. Letztere spielt in ihnen eine derart wichtige Rolle, daß es unmöglich ist, einige Abteilungen von der Physik zu trennen, da sie in gleichem Maße dieser und den neuentstandenen Wissenschaften angehören. Jeder, der sich speziell mit Physik befaßt, muß diese neuen Gebiete kennenlernen. Den ungeheuren Nutzen, welchen die Schwenkung der Wissenschaften zur Physik mit sich brachte, ersieht man schon daraus, daß die neuentstandenen Zwischenwissenschaften ihre eigenen Lehrstühle an Universitäten und anderen Hochschulen besitzen, über reich bestellte Lehrinstitute, eigene Fachzeitschriften, zahlreiche Lehrbücher und eine umfangreiche Literatur verfügen. Es sollen hier diese neuen Wissenschaften aufgezählt werden, deren Namen teilweise schon die Rolle, welche die Physik bei ihrer Begründung und in ihrer Entwicklung spielte, klar an den Tag legen.

1. Die physikalische Chemie, die ihr Entstehen dem Umstande verdankt, daß die Chemie sich der Physik zuwandte und ihre Ergebnisse und Methoden benutzte. Fast alle Abteilungen der physikalischen Chemie lehnen sich eng an die reine Physik an, und jeder Physiker muß sie selbstverständlich kennenlernen. Einige Fragen der physikalischen Chemie sind mit dem größten Erfolge von Physikspezialisten bearbeitet worden, die von der sogenannten reinen Chemie weit entfernt waren. Ihrerseits hat die physikalische Chemie die Physik mit zahlreichen neuen wichtigen Ergebnissen bereichert.

2. Die Astrophysik. Im Laufe von mehreren Jahrtausenden hat sich die Astronomie ausschließlich mit der Bewegung der Gestirne befaßt. In der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts begann sie aber plötzlich die Methoden der Physik auszunutzen und bediente sich der von dieser geschaffenen Apparate, wie des Spektroskops, Photometers, des Polariskops, des photographischen Apparates und anderer physikalischer Instrumente. Es entstand ein völlig neuer Zweig der Astronomie, der den Namen Astrophysik erhielt. Es ist das zweifellos eine der interessantesten

Wissenschaften. Sie hat die verborgenen Geheimnisse des Weltalls vor uns aufgedeckt und gab uns in unerschöpflichem Überfluß Kenntnisse, nach denen die Menschheit dürstet. Sie hat unseren Horizont erweitert, indem sie die Substanzen angab, aus denen die Gestirne bestehen und eine Reihe der erstaunlichsten auf ihrer Oberfläche auftretenden Erscheinungen nachwies. Vom Anbeginn der Welt an haben die Gestirne die Blicke und Gedanken der Menschen angezogen, die bestrebt waren, in die geheimnisvolle Weite des Himmels zu dringen und zu ergründen suchten, was die unbeweglichen Sterne darstellen, die merkwürdige Milchstraße und die rätselhaften Kometen, die einst die Menschen in großen Schrecken versetzten. Heute sind der Astrophysik in astronomischen Observatorien besondere Abteilungen mit eigenen Instrumenten und sogar Laboratorien eingeräumt. Wir wollen nicht vergessen, daß die Astrophysik ihre Existenz in vollem Umfange der Physik zu verdanken hat.

3. Die Kristallophysik. Unter Kristallen versteht man feste Stoffe, die hauptsächlich infolge von Lösung (z. B. in Wasser) oder von Schmelzung entstehen. Sie haben die Gestalt eines mehr oder weniger regelmäßigen Polyeders, d. h. ihre Oberfläche wird von ebenen Figuren, wie Drei-, Vier-, Fünfecken usw. gebildet. Die Kristallographie erforscht die Gestalt der Kristalle und ihre geometrischen Eigenschaften, die Kristallophysik die in ihnen auftretenden mannigfaltigen physikalischen Erscheinungen. Sie zerfällt daher fast in ebensoviel Abteilungen wie die Physik selbst. Es sei beispielsweise auf die Licht-, Wärme-, auf die magnetischen, elektrischen und elastischen Erscheinungen in den Kristallen hingewiesen. Die Aufgabe der Kristallophysik besteht natürlich darin, zu ergründen, inwieweit alle diese Erscheinungen je nach der Eigenart der Gestalt und des inneren Aufbaues der Kristalle speziellen Charakter besitzen. Zu den hervorragendsten Spezialisten auf diesem Gebiete gehören wiederum einige Professoren der Physik.

4. Die Geophysik, d. h. die Physik der Erdkugel, fußt vollkommen auf der Physik, deren Abteilungen für sie fast gleich wichtig sind.

5. Die Mineralogie und die Geologie besitzen gleichfalls Gebiete, in denen die Physik eine wesentliche Rolle spielt.

6. Die Mechanik trug, wie gesagt, bis jetzt fast durchweg den Charakter einer mathematischen Wissenschaft. Es schien, daß die vom großen englischen Forscher Newton (1643 bis 1727) aufgestellten Grundprinzipien ein unerschütterliches Fundament der Mechanik bilden sollten. In letzterer Zeit hat jedoch auch hier unter dem Einfluß der Physik ein Umschwung eingesetzt, der den Newtonschen Prinzipien eine wesentlich andere Form gibt. Die physikalische Lehre von den elektrischen und den magnetischen Erscheinungen hat zu einer vollkommenen Änderung dieser Prinzipien geführt, die im Laufe von zwei Jahrhunderten als Grundlage nicht nur der Mechanik, sondern auch eines bedeutenden Teiles der Physik selbst gegolten haben. Heute macht die mechanische Weltauffassung allmählich einer anderen Platz, in welcher die mechanischen Prinzipien von Newton durch Gesetze, die auf einer sorgfältigen und allseitigen Erforschung von elektromagnetischen Erscheinungen fußen, ersetzt werden. Auf diese Frage werden wir noch zurückkommen (6. Kap., § 12).

Die Frage nach der Bedeutung der Physik für die anderen Wissenschaften findet ihre Beantwortung, wenn auch nicht in erschöpfender Weise, in den vorhergehenden Zeilen. Wie wir gesehen haben, sind alle Wissenschaften, die sich mit der toten Natur befassen, auf das engste verknüpft mit der Physik, der sie das Entstehen von „Zwischenwissenschaften“ verdanken. Doch auch für eine ganze Reihe anderer Wissenschaften ist die Physik von großer Bedeutung. Hierher gehört vor allen Dingen die Physiologie der Tiere und Pflanzen, wo die Anwendung der Physik auf Erscheinungen der lebendigen Natur eine sehr wesentliche Rolle spielt. Es genügt, die Physiologie des Sehorgans zu erwähnen, die so viel den Arbeiten des berühmten Physikers Helmholtz (1821 bis 1894) zu verdanken hat. Auch für die Medizin ist die Physik von großer Bedeutung. Man denke z. B. an die drei verschiedenen Heilmethoden mittels der Elektrizität: durch Gleichstrom, Induktionsstrom und elektrostatische Ladungen. Wir besitzen ferner die Heilmethode durch Röntgenstrahlen und radioaktive Substanzen und sind imstande, mit Hilfe der Röntgenstrahlen den menschlichen Körper zu durchleuchten, um Knochenbeschädigungen festzustellen, Fremd-

körper, wie Metallsplitter im Innern des Körpers, und krankhafte Neubildungen nachzuweisen.

Es erübrigt sich, an dieser Stelle über die Bedeutung der Physik für die Technik zu sprechen. Der größte Teil dieser Wissenschaft ist auf Entdeckungen der Physik aufgebaut. Das letzte Kapitel dieses Buches wird uns zeigen, was die Physik dem Menschen in dieser Hinsicht gegeben hat. Möglich, daß die Physik mit der Zeit auch auf einige andere, ihr bis jetzt fern stehende Wissenschaften Einfluß gewinnen wird. Hierher gehören z. B. die Wissenschaften, die sich mit Sprachen und Dialekten der verschiedenen Völker befassen. Die Rede besteht ja aus Lauten und ist es daher möglich, daß ein Teil der Physik, die Akustik, einmal in der Lage sein wird, die erwähnten Wissenschaften mit wertvollem Material zu versehen, ihnen neue Methoden der Sprachenkunde zu liefern und neue Wege zu weisen, auf denen die Gesetze erkannt werden können, die zur allmählichen Änderung der Sprache und der von anderen Völkern übernommenen Ausdrücke führen.

**§ 2. Die drei Hauptaufgaben der Physik. Die Entdeckung der physikalischen Erscheinungen.** Es ist bereits auf die allgemeine Aufgabe der Physik und auf ihre Bedeutung für die anderen Wissenschaften hingewiesen worden. Wie erfüllt nun die Physik ihre Aufgabe, d. h. auf welche Weise erforscht sie die Eigenschaften der toten unorganisierten Natur und die Erscheinungen, die in dieser auftreten? Welches sind die Grundzüge der von ihr benutzten Methode, die sie zu den großen Resultaten führte, der Quelle ihres Ruhms, dem Stolze der ganzen Menschheit?

Bevor wir uns der Methode der Physik zuwenden, müssen wir erwähnen, daß die Erfüllung der allgemeinen Aufgabe der Physik in drei verschiedene Teile zerfällt. Es ist bis jetzt diese Aufgabe als die Erforschung der Eigenschaften der toten Materie und der in dieser auftretenden Erscheinungen charakterisiert worden. In der Folge soll jedoch nur von Erscheinungen die Rede sein, denn die Eigenschaften der toten Materie resultieren aus diesen Erscheinungen, als deren Quelle sie anzusehen sind. Wir sagen daher kurz, daß die Physik die in der toten Materie auftretenden Erscheinungen erforscht, die

wir mit dem Namen physikalische Erscheinungen belegen wollen. Die Erfüllung dieser Aufgabe zerfällt in drei Teile: die Physik muß die Erscheinungen entdecken, erforschen und erklären. Diese drei Ziele wollen wir nun betrachten. Die in diesem Buche angeführten Beispiele werden uns ermöglichen, ein tieferes Verständnis für diese Ziele zu gewinnen und in ihr Wesen einzudringen.

Wir wenden uns der ersten Aufgabe, der Entdeckung der Erscheinungen, zu. Es ist ja klar, daß mit der Entdeckung erst die spezielle Arbeit beginnt, die einer bestimmten Erscheinung oder einer Gruppe von Erscheinungen gewidmet ist, die verwandt sind und gleichen oder verschiedenen, aber wesensgleichen Quellen entspringen. Die Entdeckung der Erscheinungen kann auf zwei Wegen erfolgen: zufällig und, wie wir vorerst kurz sagen wollen, nicht zufällig. Es ist von Wichtigkeit und Interesse zu bemerken, daß zufällige Entdeckungen, von denen man annehmen könnte, daß sie ziemlich oft stattfinden, in Wirklichkeit äußerst selten sind. Als Beispiel kann die Entdeckung (1789) des italienischen Arztes Galvani (1737 bis 1798) (oder seiner Frau) dienen, der zufällig bemerkte, wie die Froschschenkel krampfhaft Zuckungen ausführten, eine eher physiologische Erscheinung, die aber den großen italienischen Physiker Volta (1745 bis 1827) die nicht mehr zufällige Entdeckung des elektrischen Stromes machen ließ. Es wird behauptet, daß der dänische Forscher Oerstedt (1777 bis 1851) 1820 während einer Vorlesung bemerkte, daß eine zufällig in der Nähe eines stromdurchflossenen Drahtes aufgestellte Magnetnadel abgelenkt wurde. Auf diese Weise wurde eine Wirkung des elektrischen Stromes auf Magnete entdeckt, d. h. zum erstenmal ein Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen nachgewiesen. Andere wieder behaupten, Oerstedt habe nach einer Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel gesucht und habe die Entdeckung nicht zufällig gemacht. Bald darauf entdeckte der französische Forscher Ampère (1775 bis 1836), sicher nicht zufällig, eine ganze Reihe von grundlegenden elektromagnetischen Erscheinungen. Der deutsche Forscher Röntgen (1845 bis 1923) entdeckte zweifellos zufällig (1895), daß ein mit einer gewissen besonderen Substanz durchtränktes Papier, das unter Einwirkung

von unsichtbaren ultravioletten Strahlen leuchtete, auch ohne von solchen getroffen zu werden, fluoreszierte. Es befand sich zufällig auf einem Tische, auf welchem Röntgen gerade Experimente mit der Fluoreszenz eines verdünnten Gases beim Durchgang des elektrischen Stromes ausführte. Die Röhre, in der sich das Gas befand, war mit undurchsichtigem schwarzen Papier umwickelt, so daß angenommen werden mußte, die Röhre entsende irgendwelche Strahlen, die schwarzes Papier frei durchdringend auf die erwähnte Substanz treffend, dieselbe zum Leuchten bringen. Das waren eben die sogenannten „Röntgenstrahlen“, die später ausführlich besprochen werden sollen. Ihre erstaunlichen Eigenschaften wurden später, jedoch nicht mehr zufällig, hauptsächlich von Röntgen selbst entdeckt.

Wir haben auf einige der seltenen Fälle hingewiesen, in denen wichtige Erscheinungen zweifellos ganz zufällig entdeckt worden sind. In Wirklichkeit sind fast sämtliche physikalischen Erscheinungen nicht zufällig entdeckt, sondern vorausgesehen und im voraus erraten worden. Worauf dieses Voraussehen beruht, darüber soll später die Rede sein (s. § 5), wenn wir die Hypothesen betrachten werden und die gewaltige, wenn auch, wie wir sehen werden, zwiefache Rolle, die sie in der Wissenschaft, und zwar nicht nur in der Physik spielen. Um aber schon an dieser Stelle den Begriff einer nicht zufälligen Entdeckung etwas zu klären, sei der Analogie wegen daran erinnert, auf welche Weise in der Geographie Entdeckungen gemacht wurden und noch gemacht werden. Offenbar darf hier von einem völligen Zufall nur in den seltensten Fällen gesprochen werden, wenn z. B. ein Reisender sich in schon genügend erforschten Gegenden aufhält und an die Möglichkeit, auf irgend etwas wesentlich Neues und Interessantes zu stoßen, nicht im entferntesten denkt, und dennoch ganz unerwartet etwas entdeckt, vielleicht weil er ahnungslos einen Weg eingeschlagen hatte, der vor ihm wenig oder gar nicht erforscht war. Man denke bloß an die größte aller geographischen Entdeckungen (1492), die man Columbus (1446 bis 1506) zu verdanken hat, und man wird verstehen, wie wenig zufällig sie war und welche Rolle dabei der feste Glaube an die Existenz eines Erdteils westlich von Europa spielte.

§ 3. Die Erforschung der physikalischen Erscheinungen. Die Erforschung von Erscheinungen bildet vielleicht den Hauptteil der Tätigkeit eines Physikers. Sie kann sich sowohl auf neu entdeckte, als auch auf bereits längst bekannte Erscheinungen beziehen. Im zweiten Falle ist der Boden, allgemein gesprochen, mehr vorbereitet, und es ist dem Forscher leichter, die Richtung zu finden, in welcher er, in der Hoffnung, etwas Neues zu finden, arbeiten muß. Die Forschung kann qualitativ und quantitativ sein. Im ersten Falle handelt es sich um die verschiedenen Arten oder Gestalten, in denen die betreffende Erscheinung unter mannigfaltigen speziellen Bedingungen auftritt. Zu solchen Bedingungen gehören beispielsweise verschiedene Temperaturen und Drucke oder, allgemein gesprochen, verschiedene Intensität dieser oder jener Einwirkung, die den Charakter der Erscheinung ändern kann: die Einwirkung von Licht, der Spannung elektrischer oder magnetischer Kräfte, der Anwesenheit verschiedener Substanzen, wie Gase, Salze, Säuren usw. auf die zu erforschende Erscheinung. In der Tat kann eine allseitige Erforschung einer bestimmten Erscheinung infolge der großen Anzahl von Ursachen, unter deren Einfluß die Erscheinung ihre Gestalt oder andere Merkmale ändern kann, eine schier unerschöpfliche Aufgabe darstellen.

Es ist zweifellos wichtiger, die quantitativen Seiten einer physikalischen Erscheinung zu erforschen, d. h. die quantitativen Abhängigkeiten festzustellen, die zwischen den verschiedenen, in der betreffenden Erscheinung mehr oder weniger maßgebenden Größen vorhanden sind. Wir wollen uns nicht auf weitere allgemeine Überlegungen einlassen, denn solche könnten als wenig verständlich erscheinen. In der Folge werden wir zahlreichen Beispielen von quantitativer Erforschung physikalischer Erscheinungen begegnen, so daß die Frage sich ohne weiteres klären wird. Jetzt begnügen wir uns mit dem Hinweis, daß als Resultat der quantitativen Erforschung die Entdeckung jener Gesetze anzusehen ist, denen die Erscheinungen gehorchen. Oft stellen diese Gesetze den charakteristischsten und wichtigsten Teil der betreffenden Erscheinung dar und geben die Möglichkeit, in das Wesen der Erscheinung zu dringen, sowie die Wurzeln, aus denen sie emporwächst, und die auf ihre Gestalt und Verlauf einwirkenden Ursachen zu finden. Wir werden sehen, daß man außer mit Ge-

setzen auch oft mit Regeln zu tun hat, die gleichfalls von großer Bedeutung für die Wissenschaft sind.

Die quantitative Erforschung einer Erscheinung läuft stets auf die Ausführung irgendwelcher Messungen hinaus. Aus dem täglichen Leben wissen wir, wie Länge, Gewicht und Temperatur gemessen werden. Dabei wird eine Länge gewöhnlich sehr schnell und einfach mit Hilfe von Maßstäben oder gar Bändern gemessen, wenn keine große Genauigkeit verlangt wird, und ein Fehler von etwa einem Zehntel Zoll keine Rolle spielt. Gewichts- und Temperaturmessungen erfordern bereits kompliziertere Instrumente, wie Wagen und Thermometer. In der Physik dagegen hat man es mit einer ungeheuren Anzahl der verschiedenartigsten physikalischen Größen zu tun, von denen wir die bekannteren hervorheben wollen: Luftdruck oder Gasdruck (Barometer, Manometer), Luftfeuchtigkeit (Hygrometer), Lichtstärke (Photometer), elektrische Stromstärke (Galvanometer, Amperemeter), Wärmemenge (Kalorimeter) usw. Zur Messung der verschiedenen physikalischen Größen benutzt man besondere Apparate oder Instrumente, die zuweilen äußerst kompliziert sind. Sie werden stets allerlei Veränderungen unterworfen, damit eine möglichst große Genauigkeit sowie Bequemlichkeit und Schnelligkeit im Gebrauch erzielt wird. Viele, zuweilen sehr große und gut bestellte Werkstätten stellen physikalische Meßinstrumente her, und nicht selten begnügen sie sich mit der Ausführung einer begrenzten Anzahl von verschiedenen Instrumenten, die entweder ähnliche, besonders charakteristische Bestandteile haben oder zur Messung von Größen bestimmt sind, die einem und demselben Gebiete der Physik angehören. Es gibt fast gar keine Instrumente, die lediglich zu Beobachtungszwecken verwandt werden können, ohne daß sie gleichzeitig gestatten, Messungen auszuführen. Hierher gehören z. B. die Lupe, die gewöhnlichen Mikroskope und Fernrohre. Es darf aber nicht vergessen werden, daß einfache Beobachtungen ohne Messungen in der Physik eine verhältnismäßig geringe Rolle spielen. Die Meßapparate werden also stets vollkommener. Zuweilen wird durch die Änderung ihre Einrichtung einfacher, meist aber komplizierter.

Es gibt zweierlei Messungen: absolute und relative. Im ersten Falle wird die gegebene Größe unmittelbar gemessen, d. h.

es wird festgestellt, wievielmals die gewählte Maßeinheit in ihr enthalten ist. Es wird z. B. eine gegebene Länge in Millimetern, Zentimetern, Metern gemessen; ein Gewicht in Milligrammen, Zentigrammen, Grammen; ein Volumen in Kubikzentimetern oder Litern; die elektrische Stromstärke in Ampere usw. Bei relativen Messungen dagegen hat man es mit zwei gegebenen physikalischen Größen einer Art zu tun, und die Aufgabe der Messung läuft darauf hinaus, ihr numerisches Verhältnis zu bestimmen, d. h. festzustellen, wievielmals die eine Größe in der anderen enthalten ist. So kann man zwei Längen, zwei Volumina, zwei Gewichte, zwei Stromstärken, zwei Lichtstärken, die Stärken zweier Magnete usw. miteinander vergleichen. Dem Wesen nach besteht kein großer Unterschied zwischen den beiden Messungen, denn nimmt man als eine der beiden zu vergleichenden Größen die gewählte Maßeinheit, so wird die relative Messung zur absoluten. In Wirklichkeit ist jedoch der Unterschied zuweilen sehr groß, und es werden verschiedene Apparate benutzt, je nachdem, ob eine absolute oder relative Messung auszuführen ist.

Die Ausführung von genauen Messungen ist eine große Kunst und, wie auch jede andere Kunst, kann sie nicht von jedermann erlernt werden. Wie überall, so spielt auch hier das angeborene Talent eine große Rolle, und besondere Eigenschaften des Auges, des Ohres und hauptsächlich der Hände sind Voraussetzung. Nicht umsonst sagt man, irgend ein bekannter Forscher habe „goldene“ Hände. Die Aufgabe besteht darin, daß mit Hilfe des gegebenen Apparates die besten, d. h. genauesten Resultate erzielt werden, oder, mit anderen Worten, daß der bei jeder Messung unvermeidliche Fehler möglichst klein wird, einen möglichst geringen prozentualen Anteil der zu messenden Größe ausmacht. Um in dieser Hinsicht wirklich zu den besten Ergebnissen zu gelangen, braucht man zuweilen ganze Jahre zur Übung, große Praxis und Umsicht. Es ist nicht nur gewöhnliche Vorsicht erforderlich, ohne die man den Apparat verderben und in einigen Fällen sich selbst und anderen Schaden zufügen kann; es bedarf auch einer in jedem Falle besonderen Umsicht bei der Wahl der Meßmethode, der Aufstellungsart der Apparate und besonders bei Versuchen, auf Grund der Messungsergebnisse irgend einen Schluß zu ziehen. Gewissenhaftigkeit,

Geduld und Fleiß sollten die Devise eines jeden sein, der physikalische Messungen ausführt. Der wichtigste, aber auch schwierigste Umstand liegt in der Notwendigkeit, alle Nebenbedingungen, d. h. äußere Einwirkungen, in Betracht zu ziehen, welche die Messung beeinflussen und das Ergebnis verzerren können: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, zuweilen Luftströmung, falsche Beleuchtung des Apparates usw. Man muß alle Eigenheiten des Meßapparates und alles, was auf seine Angaben einwirken kann, studiert haben, sich eine große Gewandtheit in allen Manipulationen während der Messung aneignen, um eine äußerste Genauigkeit der Resultate zu erzielen und gleichzeitig in der Lage zu sein, den Grad der erreichten Genauigkeit, d. h. die Größe des möglichen Fehlers festzustellen. Wir wollen alle diese Ausführungen an einem Beispiel erläutern und wählen dazu die Gewichtsmessung irgend eines Körpers mittels einer Wage, indem wir es dem Leser überlassen, sich die weiteren Einzelheiten zu überlegen. Es soll ein Körper gewogen werden, dessen Gewicht ungefähr 200 g beträgt. Bei Benutzung einer „groben“, d. h. schlecht gebauten, billigen Wage kann man mit einem Fehler von fast einem ganzen Gramm rechnen, was ein halbes Prozent der ganzen Größe ausmacht. Bei einer besser konstruierten, überhaupt teureren Wage kann man ein Dezigramm, ein Zentigramm, ja sogar ein Milligramm garantieren, d. h. ein Zweihundertstel Prozent oder ein Zwanzigtausendstel der zu messenden Größe. Es gibt jedoch äußerst komplizierte Wagen, die bei großer Routine der die Messung ausführenden Person eine Genauigkeit fast bis zu einem Hunderttausendstel Prozent, d. h. bis zum zehnmillionsten Teil des ganzen Gewichtes ergeben. Das sind natürlich Ausnahmefälle: die Vorbereitung, Übung und Ausführung einer solchen Messung verlangen Jahre. Allerdings können dafür die Resultate von großem wissenschaftlichen Wert sein. Eine Reihe solcher genauen Wägungen kostete den Experimentator Landolt (1831 bis 1910) zehn Jahre Arbeit (1900 bis 1910).

Öfters kommt es vor, daß der Experimentator auf einen neuen Fall stößt, der in so hohem Grade von den mehr oder weniger bekannten Messungen abweicht, daß er eine völlig neue Messungsmethode mit einem neuen, dazu passenden Apparat erfinden muß. So war es z. B. nach der Entdeckung der radio-

aktiven Substanzen von höchster Wichtigkeit, die Dichte des gasförmigen Körpers, der unter dem Namen Radiumemanation oder Niton bekannt ist, zu bestimmen. Diese Bestimmung mußte von entscheidender Bedeutung für eine der Grundfragen der Radioaktivitätslehre sein. Die große Schwierigkeit bestand nun darin, daß man dies Gas nur in ganz geringer Menge, in Gestalt eines winzigen Bläschens, gewinnen kann. Zwei englische Forscher, Ramsay (1852 bis 1916) und Gray, kamen (1911) mit größter Mühe in den Besitz eines solchen Bläschens, das nur die Größe von 0,073 cmm besaß. Um seine Dichte mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, mußte es gewogen werden, dabei mit einer Genauigkeit bis zu einigen Millionsteln eines Milligramms. Offenbar konnte hier keine Wage von gewöhnlicher Art genügen. Es mußte ein ganz besonderer Apparat (Mikrowage) konstruiert und eine neue Wägungsmethode erfunden werden. Auf diese Weise gelang es den genannten Forschern tatsächlich, nicht nur die Wägung auszuführen, sondern auch die gewünschte Genauigkeit zu erzielen. Damit war eine der wichtigsten, damals noch strittigen Fragen in der Lehre über die Entstehung der radioaktiven Substanzen gelöst. Hier mußten die Forscher außer allen übrigen Eigenschaften noch eine große Erfindungsgabe besitzen. Es sei hinzugefügt, daß das Bläschen 710 Millionstel Milligramm wog und daß die Genauigkeit der Messung ungefähr ein halbes Prozent betrug. Ähnlichen Messungen an ganz kleinen Größen begegnet man in der Geschichte der Physik auch auf anderen Gebieten. Beispielsweise ist es gelungen, eine Länge von  $\frac{1}{2000}$  mm mit einer Genauigkeit von einem Hundertmillionstel Millimeter zu messen und die Dauer einer Erscheinung zu bestimmen, die ein Tausendmillionstel Sekunde beträgt. Selbstverständlich sind zur Ausführung solcher Messungen besondere Methoden und Apparate erforderlich. Die Konstruktion der letzteren verlangt aber große Erfahrung, Erfindungsgabe und vor allen Dingen jene Kühnheit und Beharrlichkeit, die keine Schwierigkeiten fürchten und, ohne bei Mißerfolgen die Hoffnung aufzugeben, weiter kämpfen und schließlich ihr Ziel erreichen.

Alles das bezieht sich auch auf jeden neuen physikalischen Versuch oder Experiment. Die Experimentierkunst reift nach Jahrzehnten zur Vollendung, den Grund bildet aber stets die

natürliche Veranlagung. Jeder Versuch ist eine Frage, die an die Natur gerichtet wird. Es liegt an der Kunst des Experimentators, die Frage so zu stellen, daß die Natur eine klare und eindeutige Antwort gibt. Man muß diese Antwort verstehen und ihre Bedeutung bewerten können, aber auch Schlüsse ziehen, die in der Lage sind, unsere Kenntnisse und die Wissenschaft zu bereichern, denn das ist das Hauptziel des wissenschaftlichen Schaffens.

Man sieht, daß der zweite der drei Teile, in welche die Aufgabe der Physik zerfällt, die Erforschung der Erscheinungen, auf Versuche und fast stets auf Messungen verschiedener physikalischer Größen hinausläuft. Es beschäftigen sich damit Menschen, die ihr ganzes Leben dem Dienste der Wissenschaft widmen und unentwegt nach dem idealen Ziele streben, das in Bereicherung unserer Kenntnisse von den Substanzen, aus denen das Weltgewebe und folglich auch der Mensch geschaffen sind, besteht.

**§ 4. Die Erklärung der physikalischen Erscheinungen. Die Hypothesen über ihre Ursachen.** Die Entdeckung und Erforschung der Erscheinungen führen den Menschen im Schlußresultat zu einer großen Anzahl von Tatsachen. Als solche erweisen sich natürlich alle Erscheinungen mit ihren charakteristischen und vielseitigen Einzelheiten, sowie alle Gesetze und Regeln, denen diese Erscheinungen gehorchen. Streng genommen sind sie Bestandteile des Wesens der Erscheinungen und bilden jedenfalls den wichtigsten Teil ihrer einigermaßen vollständigen Charakteristik. Alle diese Tatsachen jedoch, sie mögen noch so zahlreich, verschiedenartig und interessant sein, bilden noch nicht das, was als Wissenschaft bezeichnet werden könnte. Sie sind nichts weiter als ein Haufen von Steinen, aus denen das Gebäude der Wissenschaft erst errichtet werden soll. Wenn ein gewöhnlicher Bau ausgeführt wird, so werden die Steine in Haufen verteilt, die für einzelne, dem Charakter nach zuweilen verschiedene Teile des Gebäudes bestimmt werden. Sodann müssen die Steine in bestimmter Ordnung aneinandergelegt und fest verbunden werden. Außerdem muß jeder Teil des Gebäudes sein festes und zweckentsprechendes Fundament erhalten. Etwas Analoges vollzieht sich beim Aufbau einer Wissenschaft. Vor allen Dingen müssen

aus der großen Menge von Tatsachen die offenbar mehr oder weniger miteinander verwandten ausgesondert werden. Als eine solche Gruppe kann man z. B. alle Lichterscheinungen bezeichnen, oder einen Teil von ihnen, wie diejenigen, die beim Übergang des Lichtes aus einer Substanz in eine andere auftreten (Brechung des Lichtes, seine Zerlegung in Spektra). Als andere Gruppen kann man wiederum Lichterscheinungen in Kristallen ansehen, oder solche, die unter Einwirkung von magnetischen Kräften entstehen usw. Im Gebäude der Wissenschaft liegt allen Erscheinungen, die eine umfangreiche, zuweilen aber auch sehr kleine Gruppe bilden, stets ein gemeinsamer Gedanke zugrunde. Sie lassen sich alle auf einem gemeinsamen Fundament aufbauen, und dieses Fundament muß als Quelle zur Erklärung aller Erscheinungen der betreffenden Gruppe dienen. Je umfangreicher die Gruppe von Erscheinungen, die sich alle aus einem gemeinsamen Fundament heraus erklären lassen, desto höher entwickelt ist die Wissenschaft. Würde man für jede einzelne Erscheinung eine selbständige Erklärung aufstellen, so würde das niemanden befriedigen, und eine derartige Menge von Tatsachen und Erklärungen könnte keinen Anspruch darauf erheben, als Wissenschaft bezeichnet zu werden. Es ist jedoch noch nicht erschöpfend definiert worden, was wir eigentlich unter Erklärung einer Gruppe von Erscheinungen oder einer einzelnen, z. B. neu entdeckten Erscheinung verstehen. Dazu muß man vor allem den Begriff der Hypothesen und die gewaltige Rolle, die sie in allen Wissenschaften spielen, kennenlernen.

Unter Hypothese im weiten Sinne des Wortes versteht man jede Annahme oder Voraussetzung, deren Richtigkeit im gegebenen Augenblick nicht nachgeprüft werden kann. Gelingt das nachträglich, so ist die Frage nach der Richtigkeit der Hypothese gelöst und diese als solche hört zu existieren auf. Entweder muß sie als der Ausdruck einer unumstößlichen Tatsache angenommen werden, oder man verzichtet auf sie, wenn sie falsch gewesen. Die Hypothesen können sich auf verschiedene Seiten des wissenschaftlichen Schaffens beziehen. Man unterscheidet Hypothesen der Ursache, des Zusammenhangs, der Existenz von Erscheinungen und Hypothesen der Gesetze.

Eine auffallend wichtige Rolle spielen in der Physik die Hypothesen der Ursache. Es sind im Grunde genommen bestimmte Annahmen, die über die Existenz solcher Tatsachen gemacht werden, aus denen sich, falls sie wirklich vorhanden, logischerweise die Existenz der Erscheinungen, die man beobachtet und zu deren Deutung die Hypothese aufgestellt wurde, erklären läßt. Je zahlreicher und mannigfaltiger die Gruppe der Erscheinungen, die sich aus einer gemeinsamen Hypothese erklären lassen, desto wichtiger ist diese und desto größer ist die Rolle, die sie in der Wissenschaft spielt. In dem Maße, in welchem die Anzahl der aus einer Hypothese resultierenden Erscheinungen wächst, wird auch die Wahrscheinlichkeit größer, daß die Hypothese richtig ist und daß die angenommenen Tatsachen wirklich existieren. Diese Wahrscheinlichkeit kann aber niemals durch Gewißheit ersetzt werden, außer natürlich, daß die Hypothese einer unmittelbaren Nachprüfung zugänglich wird.

Eine Ausnahme bilden jene wenigen Hypothesen, aus denen sich eine unermessliche Zahl von Erscheinungen erklären läßt. In diesem Falle kann die Wahrscheinlichkeit der Hypothese zur Gewißheit werden. Als Beispiel sei auf die Hypothese hingewiesen, nach welcher sich die Erde um ihre eigene Achse und um die Sonne dreht. Auch die Hypothese, welche behauptet, daß die Materie aus in fortwährender Bewegung befindlichen Atomen besteht, kann man heute nicht mehr als Hypothese ansprechen.

Auf einer angenommenen und klar formulierten Hypothese über die Grundursache einer Gruppe von bekannten und gründlich erforschten Erscheinungen wird die Theorie derselben aufgebaut, d. h. ihre Erklärung gegeben und auf diese Weise derjenige Teil der Wissenschaft errichtet, der ihnen gewidmet ist. Die beobachteten und zu erforschenden Erscheinungen vollziehen sich sozusagen auf offener Bühne. Die Hypothesen dagegen beziehen sich auf das, was hinter den Kulissen des Welttheaters vor sich geht, d. h. dort, wohin unsere Beobachtung nicht dringen kann und wo das auf Erfahrung beruhende Wissen Vermutungen Platz macht. In diesen verborgenen Ursachen ist aber die gemeinsame Quelle von zuweilen sehr zahlreichen und verschiedenartigen Erscheinungen zu suchen, birgt sich ihr Urbeginn, aus dem sie als notwendige und logische Folge erwachsen. Die Theorie ist also

das Ergebnis des Übergangs von einer Tatsachenmasse, den Bausteinen der Wissenschaft, zur Errichtung des ihnen entsprechenden Teiles des Gebäudes. Ausgehend von der Hypothese, werden durch logische Überlegungen die Erscheinungen, d. h. ihre qualitativen und quantitativen Seiten, alle beobachteten Gesetze und Regeln erklärt. Von einer physikalischen Theorie wird aber nicht nur die Erklärung aller schon bekannten Tatsachen erwartet: sie muß neue Erscheinungen voraussagen können. In der Tat muß es möglich sein, aus einer der Theorie zugrunde liegenden Hypothese auf dem Wege logischer Überlegungen alle resultierenden Schlußfolgerungen zu ziehen, d. h. möglichst erschöpfend die Frage zu beantworten: Welche Erscheinungen müssen im Bereich der Möglichkeit liegen und welchen Regeln und Gesetzen müssen sie gehorchen, wenn die verborgene Ursache, deren Vorhandensein die Hypothese annimmt, wirklich existiert? Es ist wenig wahrscheinlich, daß alle Erscheinungen, deren Möglichkeit aus der gegebenen Hypothese resultiert, bereits entdeckt und erforscht sein könnten. Die Theorie ist also imstande, auf das Vorhandensein solcher Erscheinungen hinzuweisen, deren Existenz noch nie jemand auch nur ahnen konnte, sei es auch bloß deswegen, weil sie völlig neu und unerwartet sind. In anderen Fällen sagt die Theorie irgendwelche neue qualitative Seiten oder quantitative Gesetze von solchen Erscheinungen voraus, die zwar längst bekannt sind, an denen aber das von der Theorie Vorausgesagte noch nicht beobachtet wurde. Alle Voraussagungen der Theorie müssen durch Versuche nachgeprüft werden. Die Physik ist besonders stolz auf die Entdeckung von Erscheinungen oder Gesetzen, die theoretisch gemacht, d. h. auf dem Papier als notwendige Folge der angenommenen Hypothesen berechnet wurden. Zeigt eine experimentelle Untersuchung, daß die Erscheinung oder das Gesetz in der Tat vorhanden sind, so hat die Theorie recht behalten. Sie hat ihre Kraft bewiesen, indem sie nicht nur das Bekannte erklärte, sondern auch Unbekanntes aufdeckte. In der Folge werden wir auf eine ganze Reihe von Entdeckungen stoßen, die auf diesem Wege gemacht wurden als Entwicklungsergebnis der auf einer bestimmten Hypothese beruhenden Theorie. Solchen richtigen Voraussagungen der Theorie darf man aber nicht zu

großen Wert beimessen, und es wäre direkt leichtsinnig, auf Grund weniger oder auch nur einer einzigen richtigen Voraussagung zu behaupten, daß die Grundhypothese richtig sei, daß die ganze Theorie richtig aufgebaut ist und für immer ein fest errichteter Teil der Wissenschaft bleibt. Zweifellos sprechen eine klare und ungezwungene Erklärung von bekannten Erscheinungen und Gesetzen sowie eine richtige Voraussagung von zahlreichen neuen, stark zugunsten der betreffenden Hypothese und der auf ihr errichteten Theorie. Dennoch können sie aber nie als Beweis für die Richtigkeit der Hypothese aufgefaßt werden, da es vorkommt, daß eine und dieselbe Gruppe von Erscheinungen die Folge von vielen, ganz verschiedenen Ursachen sein kann. Darin besteht eben die Aufgabe der Wissenschaft, aus allen möglichen Ursachen die wahrscheinlichste herauszufinden.

Jede Hypothese, zusammen mit der auf ihr aufgebauten Theorie, stellt, wie die Geschichte der Physik zeigt, etwas Ephemeres, Vergängliches dar, und ein verhältnismäßig leichter Stoß kann sie vernichten. Eine gegebene Hypothese möge noch so viel Erscheinungen und Gesetze erklärt und vorausgesagt haben, die Wissenschaft verwirft sie ohne Bedenken, sobald auch nur eine Voraussagung sich im Versuch nicht bewahrheitet oder eine neue Erscheinung entdeckt wird, die sich auf Grund dieser Hypothese nicht deuten läßt oder ihr gar widerspricht. Rückt sie aus dem Bereich der Möglichkeit, so muß sie durch eine neue ersetzt und der betroffene Teil der Wissenschaft einem mehr oder weniger bedeutenden Umbau unterworfen werden. Die Geschichte der Physik weiß von vielen derartigen Fällen zu berichten. Es ist beispielsweise vorgekommen, daß eine bestimmte Hypothese, die von allen Forschern anerkannt war, sich 75 Jahre hindurch behauptete und als fest und unerschütterlich galt. Sie erklärte alle damals bekannten Lichterscheinungen und sagte mit absoluter Genauigkeit neue unerwartete voraus, die ohne eine solche theoretische Voraussagung wohl nie entdeckt worden wären, da selbst die Möglichkeit solcher Erscheinungen niemandem einfallen konnte. Man glaubte, daß diese Theorie zu den feststehendsten gehöre und stets einen unangreifbaren Teil der Physik bilden werde. Die Richtigkeit ihrer Grundhypothese verglich man kühn mit derjenigen der Erdbewegung. Es ist hier die Hypo-

these gemeint, daß das Licht eine schwingende Bewegung darstelle, die sich in einem besonderen, den Weltraum ausfüllenden Medium, dem Weltäther, ausbreitet. Und wie steht es heute? Kein einziger Forscher glaubt mehr an die Theorie der Ätherschwingungen, und eine große Anzahl von hervorragenden Forschern verneinen sogar die Existenz des Weltäthers. Und das kam daher, daß zahlreiche und verschiedenartige neue Erscheinungen entdeckt wurden, welche in den Rahmen der Theorie der Ätherschwingungen absolut nicht hineinpaßten, so daß letztere durch die elektromagnetische Lichttheorie von Maxwell (1831 bis 1879), eine der größten Schöpfungen des menschlichen Genies, ersetzt werden mußte. In der ersten Hälfte der achtziger Jahre entdeckte Hertz (1857 bis 1894) die heute in der drahtlosen Telegraphie benutzten elektrischen Strahlen und verhalf dadurch der Maxwellschen Theorie zum Triumph. Die Theorie der Ätherschwingungen ist für immer abgetan. Zwar bestehen die Hauptgrundlagen der Maxwellschen Theorie auch heute noch als fester Bestandteil der Wissenschaft, doch wurde sie in ihren Einzelheiten im Anfang des Jahrhunderts sehr wesentlichen Umwandlungen unterworfen. Sie erhielt neue charakteristische Züge durch die Theorie der Elektronen (Urteilchen der negativen Elektrizität, s. 3. Kap.), die allmählich in alle Gebiete der Physik eindringt. Etwas später soll von der wahren Bedeutung eines so plötzlichen Verzichtes auf eine umfangreiche und scheinbar blühende Theorie, und der Annahme einer neuen, auf einer ganz neuen Hypothese, einem neuen Fundament aufgebauten die Rede sein.

Je größer die Anzahl von verschiedenartigen Erscheinungen, die durch eine Hypothese erklärt werden können, desto besser ist es. Das Vorhandensein einer Menge von Hypothesen, deren jede nur eine kleine Zahl von Erscheinungen deuten kann, weist auf eine schwache Entwicklung des betreffenden Abschnitts der Wissenschaft. Je weniger Hypothesen vorhanden sind, desto größer ist der Aufschwung der Wissenschaft. Das Auftreten einer guten Hypothese kann für die Wissenschaft einen großen Schritt nach vorwärts bedeuten. Noch wichtiger aber ist das Verschwinden einer Hypothese, ohne daß sie durch eine andere ersetzt werden muß, oder das Verschmelzen von mehreren Hypothesen in eine, die mehrere Gruppen von Erscheinungen, die bis dahin für zu-

sammenhanglos galten, bedient. „Die Wissenschaft ist nicht bestrebt, Hypothesen aufzustellen, sondern sie zu beseitigen“, sagt Ostwald (geb. 1853).

Die Wissenschaft würde eine ideale Vollendung erreichen, wenn sie nur mehr eine einzige Hypothese besäße, als deren natürliche Folge die Gesamtheit aller beobachteten Erscheinungen mit allen ihren quantitativen Gesetzen angesehen werden könnte und so ein innerer Zusammenhang zwischen allen Erscheinungen gefunden wäre.

Jetzt kann auf die Frage: „Was versteht man unter der Erklärung der physikalischen Erscheinungen?“ eine endgültige Antwort gegeben werden. Wird von einer Gruppe bereits bekannter und mehr oder weniger erforschter Erscheinungen geredet, so läßt sich die Erklärung auf einen Beweis zurückführen, daß sie eine notwendige Folge einer gewissen Hypothese über die verborgener Ursachen dieser Erscheinungen darstellen. Eine einzelne, neu entdeckte Erscheinung erklären, heißt ihren inneren Zusammenhang mit anderen, schon bekannten Erscheinungen zeigen. Es muß nachgewiesen werden, daß auch sie die natürliche Folge einer oder mehrerer Hypothesen darstellt, die von der Wissenschaft im gegebenen Augenblick angenommen sind, mit einem Wort, daß sie in den Rahmen einer bereits vorhandenen Theorie hineinpaßt.

**§ 5. Andere Arten von Hypothesen.** Es sind die Hypothesen über die verborgenen Ursachen betrachtet worden. Sie sind es, die man gewöhnlich im Auge hat, wenn man von physikalischen Hypothesen spricht.

Wie wir sahen, bilden sie einen Bestandteil der Wissenschaft, das Fundament ihrer verschiedenen Teile, d. h. der einzelnen Theorien. Es gibt aber noch andere Hypothesen, unvermeidliche Gefährten einer jeden wissenschaftlichen Tätigkeit, die zur Entdeckung neuer Erscheinungen, Gesetze oder Zusammenhänge zwischen bereits bekannten Erscheinungen führt. Ihnen hat man zu danken, daß die Wissenschaft sich entwickelt und Entdeckungen gemacht werden, die früher als nicht zufällig bezeichnet worden sind. Jetzt ist es möglich, diese Bezeichnung zu erläutern und zu zeigen, worin die Nichtzufälligkeit der Entdeckungen auf physikalischem Gebiete besteht. Um zu verstehen,

worum es sich hier eigentlich handelt, muß man versuchen, sozusagen in den Mechanismus der schöpferischen wissenschaftlichen Tätigkeit einzudringen. Man muß sich klar vorstellen können, wie die wissenschaftliche Arbeit geleistet wird, wie neue Resultate erzielt, neue Erscheinungen, Gesetze und Zusammenhänge entdeckt werden. Es zeigt sich, daß der Forscher in seiner wissenschaftlichen Tätigkeit ohne irgend eine Hypothese keinen Schritt tun kann, wenn man natürlich die seltenen Fälle der „zufälligen“ Entdeckungen, für die oben Beispiele angeführt wurden, ausnimmt. In der Tat, die wissenschaftliche Arbeit möge so beschaffen sein, wie sie will, dringt man in den „Mechanismus“ ihrer Entstehung, so erkennt man, daß der Forscher sich bei ihrer Ausführung von einer bestimmten Hypothese leiten ließ. Das wird leicht verständlich, wenn man verschiedene Fälle der wissenschaftlichen Tätigkeit auf physikalischem Gebiet betrachtet. Jede wissenschaftliche Arbeit muß planmäßig ausgeführt werden.

Dank seinen Kenntnissen und seiner Erfahrung kann sich der Forscher alle Einzelheiten der Erscheinungen, in deren Gebiet die von ihm behandelte Frage gehört, klar vorstellen. Wie gelingt es ihm aber, eine neue Erscheinung zu entdecken? Kenntnisse und Erfahrung lassen ihn voraussetzen, daß unter bestimmten neuen Bedingungen, unter veränderten Verhältnissen, etwas Neues erwartet werden darf. Es ist ja klar, daß niemand einen Versuch unternehmen wird, ohne von ihm etwas zu erwarten. In dieser Erwartung, in dieser Annahme, daß etwas Neues zustande kommt, ist eben die Leithypothese verborgen.

Der Forscher geht von der Hypothese über die Existenz einer Erscheinung aus, deren Charakter und Bild ihm entweder ganz unbekannt sind, oder in allgemeinen Zügen nebelhaft vorschweben. Die Frage, ob die Hypothese richtig oder falsch war, kann erst nach Ausführung des Versuches beantwortet werden. Im zweiten Falle ändert der Forscher gewöhnlich seine Hypothese etwas ab und sucht die Erscheinung unter anderen Bedingungen zu finden.

Auf analoge Weise werden auch neue Gesetze entdeckt. Die Untersuchung irgend einer Erscheinung zeigt dem Forscher einen Zusammenhang zwischen zwei physikalischen Größen, der offenbar

durch ein bestimmtes Gesetz ausgedrückt werden kann. So hängt z. B. die in einem stromdurchflossenen Draht im Laufe einer bestimmten Zeit frei werdende Wärmemenge zweifellos von der Stromstärke ab. Der Forscher sucht nach diesem Gesetz, indem er verschiedene Gesetze ausprobiert, d. h. von einer Reihe Hypothesen ausgeht, daß das eine oder andere Gesetz „passen“, mit der im Versuch beobachteten Abhängigkeit übereinstimmen könnte. Es kann vorkommen, daß keines der hypothetisch angenommenen Gesetze die beobachtete Abhängigkeit auszudrücken imstande ist. In diesem Falle bleibt das wahre Gesetz unbekannt.

Ein anderer Fall der wissenschaftlichen Tätigkeit ist es wiederum, wenn der Forscher auf Grund von zuweilen ganz allgemeinen Überlegungen zum Schluß gelangt, daß zwischen zwei Gruppen von Erscheinungen, die nichts Gemeinsames zu haben schienen, ein Zusammenhang bestehen muß, daß z. B. irgend eine Wirkung der einen Erscheinung die Entstehung oder das äußere Bild der anderen beeinflußt. Das ist die Hypothese über den Zusammenhang, die infolge ihrer unbestimmten Form nicht unmittelbar nachgeprüft werden kann. Von seiner Hypothese ausgehend, sucht der Forscher nach diesem Zusammenhang und stellt dabei eine Reihe von neuen Hypothesen über die Bedingungen auf, unter denen der vorausgesetzte Zusammenhang gefunden werden könnte. Jede dieser zusätzlichen Hypothesen zwingt den Forscher, in der Hoffnung, den gesuchten Zusammenhang zu finden, einen entsprechenden Versuch auszuführen. Erweist es sich, daß der gewählte Weg zum Ziele führt, so hat die Grundhypothese über das Bestehen eines Zusammenhangs ihre Bestätigung gefunden. So hat Faraday (1791 bis 1876) nach einem Zusammenhang zwischen Licht- und magnetischen Erscheinungen gesucht und fand schließlich (1845), daß unter Einwirkung von magnetischen Kräften im Innern von durchsichtigen Körpern der Lichtstrahl eine besondere Art von Rotation um seine eigene Richtung ausführen kann. Es ist bereits auf die zufällige Entdeckung (Oerstedt) eines Zusammenhangs zwischen magnetischen und elektrischen Erscheinungen hingewiesen worden. Später erwies es sich, daß der Zusammenhang noch viel tiefer ist, und es wurden die Erregung von Magnetismus durch elektrische

Ströme und darauf durch Faraday (1831) die Erregung von Induktionsströmen durch Magnete und andere Ströme entdeckt.

Die angeführten Beispiele zeigen zur Genüge, welche Rolle die Hypothesen, die unumgänglichen Gefährten des Forschers bei seiner wissenschaftlichen Tätigkeit, spielen.

Der berühmte Physiologe Claude Bernard (1813 bis 1878) sagt: „Eine angenommene Idee oder Hypothese ist der notwendige Ausgangspunkt einer jeden experimentellen Untersuchung. Es ist undenkbar, ohne eine solche etwas Neues zu entdecken.“ Der Erfolg einer wissenschaftlichen Arbeit hängt offenbar von der Kunst ab, die richtige Hypothese zu wählen, d. h. einen Weg zu betreten, der zum Ziele führen kann. Diese Kunst bestimmt das Talent der Forscher, an deren Spitze Namen wie Newton, Faraday, Fresnel, Hertz u. a. stehen. Auf die Frage, wie man zur Aufstellung einer Hypothese gelangt, die der Wissenschaft zum Fortschritt verhelfen kann, findet man eine Antwort in den Worten von Kepler (1571 bis 1630): „Mein guter Genius hat mir diesen Gedanken eingegeben“.

Es ist S. 17 gezeigt worden, daß wissenschaftliche Entdeckungen mit seltenen Ausnahmen „nicht zufällig“ gemacht werden. Unsere Ausführungen haben zur Genüge erklärt, worin diese Nichtzufälligkeit besteht und welche Rolle Wissen, Erfahrung und Talent bei Aufstellung von Leithypothesen spielen, die den blinden Zufall ersetzen.

**§ 6. Die historische Bedeutung der Hypothesen über die Ursachen. Physik und Erkenntnistheorie.** Kehren wir nochmals zu den Hypothesen über die Ursachen bestimmter Gruppen von Erscheinungen zurück. Wir sehen, daß eine bestimmte Hypothese über die Ursache den Grundstein dessen bildet, was wir unter der Theorie einer zuweilen sehr umfangreichen Gruppe von oft der Form nach ganz verschiedenartigen Erscheinungen verstehen. Es ist aber auch auf die Kurzlebigkeit solcher Hypothesen hingewiesen worden, bei deren Ausschaltung die auf ihnen aufgebaute Theorie zusammenstürzt, so daß der betreffende Teil der Wissenschaft unter Zugrundelegung einer neuen Hypothese über die Ursache von neuem errichtet werden muß. Als Beispiel wurde die Theorie der Lichterscheinungen angeführt, die auf der Hypo-

these der Ätherschwingungen beruhte. Hier drängt sich aber unwillkürlich eine ernste Frage auf. Hypothesen und aus ihnen heraus geschaffene Theorien haben, wie die Geschichte der Physik zeigt, meist nur eine kurze Lebensdauer. Nach einer Zeit der Blüte verfallen sie allmählich, erweisen sich als veraltet, entsprechen nicht mehr den neuen Anforderungen der Wissenschaft und müssen schließlich gänzlich abgelehnt werden. Fast jede neue Theorie trägt schon bei ihrem Entstehen den Todeskeim in sich und wird mit der Zeit durch eine andere, auf einer neuen Grundhypothese aufgebaute ersetzt. Wenn das aber so ist, so fragt man sich unwillkürlich: welche Bedeutung konnten denn solche Theorien und Hypothesen besitzen, die doch, da sie durch andere ersetzt wurden, offenbar falsch waren? Was hat es für einen Sinn, das Gebäude der Wissenschaft zu errichten, wenn jeder Teil früher oder später zerstört und von neuem aufgebaut werden muß? Von welchem Nutzen für die Wissenschaft waren diese überwundenen Theorien, deren Ruinen uns den Weg zeigen, den die historische Entwicklung der Physik gegangen ist? Lohnt es sich überhaupt, am Aufbau von Theorien weiterzuarbeiten, die sich doch nicht halten können? Und wo ist schließlich der ewige Wert der Wissenschaft, wo die Wahrheit, nach der sie strebt? Antwort auf alle diese Fragen gibt uns die Geschichte der Wissenschaft, und sie zwingt uns, jeden Pessimismus und Skeptizismus fallen zu lassen. Im Gegenteil, wir bringen der Wissenschaft und ihren Ergebnissen gute Hoffnung und tiefen Glauben entgegen und vertrauen auf ihre weitere Entwicklung und die Früchte, die sie der Menschheit noch darbieten wird. Es wäre nämlich grundfalsch anzunehmen, daß eine Theorie, welche die Wissenschaft durch lange Zeit beherrschte und dann abgetan wurde, verschwinde, ohne Spuren zu hinterlassen. Dem ist nicht so! Eine überlebte Theorie hat das Ihre getan und das bleibt bestehen. Sie hat der Wissenschaft Nutzen, zuweilen sehr großen Nutzen und neues Material gebracht und hat die Menschheit mit solchen Kenntnissen beschenkt, von denen sich loszusagen kein Grund vorliegt. Wie ist aber das möglich geworden, wenn die Hypothese, auf der alles aufgebaut war, sich schließlich als unannehmbar, falsch, der Wirklichkeit nicht entsprechend erwies? Dieses Wort Wirklichkeit kann die Antwort darauf erteilen.

Was ist Wirklichkeit, d. h. die Wahrheit, zu deren Erkenntnis die Wissenschaft streben muß? Haben wir denn ein Recht zu behaupten, die Wahrheit als solche sei unserem Verstande zugänglich? Könnten wir sie voll erfassen, wenn es uns gelänge, hinter die Kulissen der Bühne zu dringen, auf der sich die einer unmittelbaren Beobachtung zugänglichen physikalischen Erscheinungen abspielen? Auf diese Frage finden wir keine Antwort und müssen bescheiden die Aufgabe der Wissenschaft auf das Bestreben, der Wahrheit näherzukommen, beschränken. Die Voraussetzung einer neuen Hypothese läßt sich dem Versuch vergleichen, ein Modell dessen herzustellen, was sich hinter den Grenzen unserer Beobachtung verbirgt. Hat sich das Modell als ungenügend erwiesen, so war es doch nicht durchweg falsch. Es hatte ohne Zweifel viele Seiten, die der unbekanntten Wahrheit nahe kamen oder ihr gar völlig entsprachen. Es ist daher verständlich, daß es möglich war, auf Grund dieses Modells, dieser Hypothese, alle Erscheinungen, die gerade diesen Seiten der Wahrheit entsprachen, zu erklären und sogar vorauszusagen. Die betreffende Hypothese konnte also den Nutzen bringen, den die Menschheit ihr stets als Verdienst anrechnen wird, und welcher die Rolle charakterisiert, die sie in der Geschichte der Wissenschaft gespielt hat. Die Erscheinungen, Gesetze und Regeln, deren Entdeckung ihr zu verdanken ist, verbleiben für immer der Schatzkammer der Wissenschaft, und die Kenntnisse, mit denen sie uns beschenkte, werden als Ganzes, oder wenigstens in den wesentlichsten Teilen, fast keinen Änderungen mehr unterworfen. Sie werden fast in vollem Umfange von der neuen Theorie übernommen. Alles Wertvolle bleibt bestehen, und nur das absolut Falsche wird zurückgewiesen. Die neue Theorie erbt von der alten alles, was diese geschaffen hat, und das ist meist bedeutend mehr, als was sie selbst seinerzeit von ihrer Vorgängerin übernommen hatte. Mit diesem Material versehen, setzt die neue Theorie die Arbeit der vorhergehenden fort. Ihr liegt eine neue Hypothese zugrunde, die all die Seiten der alten besitzt, welche nicht ersetzt werden mußten und von denen wir gesagt hatten, daß sie der betreffenden Seite der unbekanntten verborgenen Wahrheit nahe kamen oder ihr gar völlig entsprachen. Die anderen Seiten der alten Hypothese werden aber in der neuen durch solche ersetzt,

von denen man annehmen kann, daß sie der Wahrheit näher stehen als die alten. Der Ersatz einer alten Hypothese durch eine neue und ein entsprechender Umbau der Theorie eröffnen vor uns neue Möglichkeiten, neue Horizonte, und bedeuten einen wichtigen Schritt auf dem Wege zur Wahrheit, von der wir nicht wissen, ob sie vom menschlichen Verstand erfaßt werden kann. Die Entwicklung der Wissenschaft ist ein Näherkommen der Wahrheit. Auf diesem Wege geleiten uns die aufeinanderfolgenden Hypothesen und Theorien, deren Entstehen, Blühen und Absterben den Gegenstand der Geschichte der Physik darstellt. Nun lassen sich die Fragen nach der wissenschaftlichen Bedeutung der Hypothesen über die Ursachen beantworten. Ihre unvermeidliche Vergänglichkeit darf uns nicht abschrecken. Hypothesen und Theorien sterben, wie auch Menschen sterben, die immerhin eine wertvolle, wenn nicht gar große Spur in der Geschichte der Menschheit zurücklassen. Ihr Andenken wird in Ehren gehalten, denn sie haben nicht umsonst gelebt. Auch von Theorien und Hypothesen läßt sich dasselbe sagen: sie haben nicht umsonst gelebt.

Es sind die Grenzen des menschlichen Erkenntnisvermögens erwähnt worden. Daß solche Grenzen tatsächlich vorhanden sind, lehrt uns eine Reihe von ewigen Fragen, die nicht gelöst werden können, obwohl die Menschheit nie aufhört, an ihnen zu arbeiten, und nie die Hoffnung aufgibt, der Lösung einmal näher kommen zu können. Indem wir die biologischen Wissenschaften mit ihrer fundamentalen Frage nach dem Wesen des Lebens außer acht lassen, wollen wir auf zwei Hauptfragen hinweisen, die dem Menschen Qualen der Ungewißheit verursachen: die Endlichkeit oder Unendlichkeit des Raumes und besonders der Zeit. Es ist hier nicht am Platze, diese beiden Fragen zu analysieren, wir begnügen uns mit dem Hinweis, daß sie große Bedeutung für den Teil der Physik besitzen, der von Energiestreuung, einer der größten Entdeckungen des menschlichen Geistes (s. 7. Kap.) handelt. Das Prinzip der Energiestreuung möge noch so tief erforscht und geklärt sein, seine Grundquellen mögen noch so klar vor uns liegen, es bleibt doch noch eine Reihe von Fragen übrig, gerade der interessantesten und anziehendsten, ohne deren Lösung das Prinzip nicht als völlig geklärt angesehen

werden kann. Eine solche Klärung ist aber unmöglich, denn sie ist eng verknüpft mit den erwähnten Fragen, die sich auf den Raum und insbesondere auf die Zeit beziehen. Hier ist unser Streben begrenzt. Vor uns gähnt ein Abgrund, den wir nicht überbrücken können. Somit sind also rein physikalische Fragen aufs engste verknüpft mit solchen, deren Lösung teilweise jenseits der Grenzen des menschlichen Verstandes liegt.

Mit der Frage nach den Grenzen des menschlichen Erkenntnisvermögens hängt auch die allgemeine Frage zusammen, wie es dem Menschen gelingt, von den ihn umgebenden Erscheinungen Kenntnis zu erlangen. Diese, auch für die Physik wichtigste Frage wird im Abschnitt der Philosophie behandelt, der unter dem Namen Erkenntnistheorie bekannt ist. Denkt der Forscher nicht an ihre Grundlagen, so läuft er Gefahr, grobe Fehler zu begehen, einer Verirrung zum Opfer zu fallen. Es kann daher denjenigen, die überhaupt jede Philosophie von oben herab behandeln, nicht beigestimmt werden. Wenn auch unbewußt, folgen sie in ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit dennoch den Lehren der Erkenntnistheorie. Ohne dieselbe könnten sie einige der einfachsten, uns stets begleitenden Erscheinungen überhaupt nicht erklären. Einige Andeutungen mögen genügen. Bekanntlich existieren für jeden Menschen zwei Welten, eine innere und eine äußere. Unsere Sinnesorgane spielen die Vermittlerrolle zwischen beiden Welten. Die Außenwelt ist imstande, die Sinnesorgane zu beeinflussen, in ihnen Änderungen hervorzurufen oder, wie man zu sagen pflegt, sie zu erregen. Die innere Welt wird durch die Gesamtheit aller Erscheinungen, die einer unmittelbaren Beobachtung seitens eines anderen Menschen unbedingt entzogen sind, bestimmt. Eine durch die Außenwelt verursachte Erregung des Organs wird an die innere Welt weitergegeben und ruft in ihr eine Empfindung hervor, die allerdings Bewußtsein voraussetzt. Die von der inneren Welt aufgenommene Empfindung wird in den Außenraum übertragen, als Etwas, einem bestimmten Ort und einer bestimmten Zeit Angehörendes. Wir übergeben mit anderen Worten unsere inneren Empfindungen der Außenwelt, wobei Raum und Zeit den Hintergrund bilden, von dem sie sich abheben. An den Stellen des Raumes, an denen sie sich befinden, setzen wir unwillkürlich den Sitz ihrer Ursache voraus. Die Unter-

suchung des Objektivierungsprozesses, der unbewußt vollzogen wird, gehört zur Philosophie. Wir erkennen mithin die Außenwelt auf Grund der Empfindungen, die sie in uns hervorruft, indem sie unsere Sinnesorgane erregt: wir sehen, hören, fühlen usw. Da der Vernunftschluß, der jede Objektivierung begleitet, ausschließlich auf der erhaltenen Empfindung beruht, so ziehen vollkommen gleiche Empfindungen unbedingt gleiche objektivierte Ursachen nach sich, und diese Gleichheit bewahrt sich sogar gegen unseren Willen in Fällen, wo die übrigen Sinnesorgane uns die Ungleichheit der Ursachen bezeugen, welche gleiche Empfindungen hervorriefen. Darin birgt sich eine der Hauptquellen falscher Schlußfolgerungen, die zu mannigfaltigen Sinnes-täuschungen, vor allem zu optischen Täuschungen, Gehörst-äuschungen usw. führen. Das einfachste Beispiel stellt die Abbildung eines Gegenstandes hinter einem ebenen und einem konvexen Spiegel dar, oder vor einem konkaven, d. h. im freien Raume. Als andere Quelle solcher Täuschungen kann das Fehlen der Gewohnheit bei neuen Empfindungen dienen. Wir wissen sehr gut, daß hinter dem Spiegel kein Gegenstand vorhanden ist, und dennoch können wir uns nicht dazu zwingen, ihn nicht zu sehen. Um also eine derartige elementare Erscheinung, wie die Abbildung eines Gegenstandes im Spiegel, erklären zu können, muß man sich an die Grundlagen der Erkenntnistheorie halten. Sie nur kann uns vor vielen Fehlern schützen, die bei wissenschaftlichen Untersuchungen uns auf falsche Wege bringen können.

**§ 7. Die Einteilung der Physik.** Etwa bis zum letzten Viertel des verflorbenen Jahrhunderts wurde die Physik in eine Reihe von streng begrenzten Abschnitten eingeteilt. Jeder derselben war einer Gruppe von solchen Erscheinungen gewidmet, deren mehr oder weniger nahe Verwandtschaft keinem Zweifel unterlag. Zum Teil hing aber diese Einteilung auch von den Sinnesorganen ab, mit denen die betreffenden Erscheinungen aufgenommen werden. Man ließ sich mit anderen Worten nicht so sehr von objektiven Merkmalen leiten, die ja allein maßgebend und bei der Einteilung von entscheidender Bedeutung sein sollten, sondern von subjektiven, die von den Eigenschaften und dem Bau des menschlichen Körpers abhängen. So hatte man in der Physik

einen Abschnitt, der Erscheinungen gewidmet war, die vom Sehorgan aufgenommen werden — die Optik oder Lichtlehre. Ein anderer Abschnitt behandelte die vom Hörorgan aufgenommenen Erscheinungen und hieß Akustik oder Schallehre. Ein besonderes Gebiet bildete die Lehre von Wärmeerscheinungen, die wir vor allen Dingen durch den Gefühlssinn kennenlernen. Gesondert wurden die Eigenschaften der festen, flüssigen und gasförmigen Körper behandelt. Endlich stellten die Lehren von den elektrischen und magnetischen Erscheinungen, die besonderen Charakter besaßen und so gar nichts Gemeinsames mit den soeben beschriebenen Erscheinungen zu haben schienen, zwei gesonderte Abschnitte dieser Wissenschaft dar. Gewiß kannte man verschiedene Erscheinungen, die gleichzeitig mehreren Gebieten der Physik angehörten. Das wies aber nur auf innere Zusammenhänge zwischen den Erscheinungen hin, die im Grunde genommen doch verschieden waren. Das einigende Moment für alle Abschnitte der Physik erstand am Ende der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts im Gesetz von der Erhaltung der Energie, das wir im 4. Kap. näher kennenlernen werden.

Im Laufe der Zeit verwischten sich allmählich die scharfen Grenzen zwischen den einzelnen Gebieten. Stellenweise verschwanden sie vollkommen, so daß zwei Abschnitte der Physik nunmehr einen bildeten. Sie bauten sich nun auf einem gemeinsamen Fundament auf, und das will sagen, daß zwei Hypothesen, die zweien Theorien zugrunde lagen, durch eine ersetzt wurden. Dieser einen Hypothese entsprang eine gemeinsame Theorie für zwei Gruppen von Erscheinungen, die bis dahin als dem Wesen nach verschieden galten und in zwei streng voneinander getrennten Gebieten der Physik behandelt wurden. Die erste derartige Vereinigung von zwei Gebieten in eins begann bereits in den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, nachdem Ampère die Lehre von den elektrischen Molekularströmen, welche um die Magneteilchen fließen, in Vorschlag gebracht hatte. Er hatte auf diese Weise die magnetischen Erscheinungen auf die elektrischen zurückgeführt und zwei Abschnitte der Physik zu einem vereinigt. Nachdem verschiedene Zweifel überwunden waren, wurde Ampères Idee von allen angenommen, und heute bildet die Lehre von den magnetischen und elektrischen Erscheinungen

ein Ganzes, das auf einem gemeinsamen Fundament aufgebaut ist. Es ist das die Elektronentheorie, die den Gegenstand des nächsten Kapitels bilden soll. Die bemerkenswerteste Vereinigung zweier Abschnitte der Physik vollzog sich in den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, als nach den theoretischen Arbeiten von Maxwell, dem Schöpfer der schon erwähnten elektromagnetischen Lichttheorie, die Versuche von Hertz, der die elektrischen Strahlen entdeckte, die Richtigkeit der Maxwell'schen Grundgedanken bewiesen. Das ganze gewaltige Gebiet der Optik verschmolz mit der Lehre von den elektrischen und magnetischen Erscheinungen. Aus einem vollkommen selbständigen Gebiete der Physik wurde sie sozusagen zu einem Kapitel dieser Lehre. Im Resultat haben wir drei alte Gebiete der Physik, die, soweit es sich um die Erklärung dreier Arten von Erscheinungen handelt, in eins verschmolzen. Die Lehrbücher haben zwar den besonderen Abschnitt der Optik beibehalten. In diesem werden aber die Erscheinungen lediglich beschrieben und ihre Gesetze besprochen. Tiefere Erklärungen kann aber nur der Abschnitt über elektrische und magnetische Erscheinungen geben, denn das Licht ist eine elektromagnetische Erscheinung (6. Kap., § 12).

Die Lehre von den Wärmeerscheinungen nahm einst eine ganz gesonderte Stellung ein. Sie beruhte auf der Hypothese, daß es einen besonderen „Wärmestoff“ gäbe. Als aber in den vierziger Jahren des verflossenen Jahrhunderts die Energielehre sich fest eingebürgert hatte, verschwand der Wärmestoff für immer von der Bildfläche und machte einer anderen Hypothese Platz. Nach dieser beruht das Wesen der Wärme auf raschen unregelmäßigen Bewegungen der einzelnen Urteilchen der Materie. Die Lehre von den Wärmeerscheinungen bildet also nur einen Teil der allgemeinen Bewegungslehre, d. h. sie fußt auf den Gesetzen der Mechanik. Die weitere Entwicklung dieser Theorie führte 1911 zu einem neuen, verblüffenden Ergebnis. Eine eingehende Untersuchung der Wärmebewegung der Stoffteilchen zeigte, daß diese sich von Schallschwingungen nur durch größere Geschwindigkeit unterscheidet. Verhältnismäßig langsame Schwingungen der Teilchen stellen also Schallerscheinungen dar und werden vom Hörorgan aufgenommen, während die raschesten das Wesen der Wärmeerscheinungen darstellen, für die das Gefühlsorgan zu-

ständig ist. Auf diese Weise wurde unerwartet zwischen zwei so großen Abschnitten der Physik, wie sie die Akustik und die Wärmelehre sind, die einander so fern standen, eine breite Brücke geschlagen.

Alles, was über die Annäherung oder gar Verschmelzung von umfangreichen Abschnitten der Physik gesagt worden ist, bezieht sich in noch höherem Maße auf die Unterabteilungen oder Kapitel, in welche die Abschnitte zerfallen. In diesen Kapiteln müssen nämlich zusätzliche Hypothesen verschiedener Art eingeführt werden. Sie ergänzen die Grundhypothese, auf der die gemeinsame Theorie der ganzen umfangreichen Gruppe von Erscheinungen aufgebaut ist, und dienen zur näheren Erläuterung der verschiedenen Seiten der einzelnen Gruppen. Auch hier lehrt die Geschichte der Physik, daß öfters mehrere Hypothesen, die in verschiedenen Kapiteln eines Abschnittes eine Rolle gespielt hatten, durch eine ersetzt wurden. Die Folge war, daß an Stelle von mehreren verschiedenen Theorien, welche den entsprechenden Gruppen gewidmet waren, eine gemeinsame Theorie trat. Daß die Verminderung der Zahl der Hypothesen für die Wissenschaft von größter Bedeutung ist, haben wir bereits S. 29 gesehen.

Es ist die Physik als eine Wissenschaft definiert worden, die sich mit Erscheinungen in der toten unorganisierten Materie befaßt. Die Physik hat die Aufgabe, diese Erscheinungen zu entdecken, zu erforschen und zu erklären. Läßt man die Lehre von der Bewegung und den Kräften, die ja zur Mechanik gehört, beiseite, so verbleiben sieben Abschnitte. Sie haben zum Gegenstand:

1. Feste Körper.
2. Flüssige Körper.
3. Gasförmige Körper.
4. Schall (Akustik).
5. Licht oder genauer Strahlungsenergie (Optik).
6. Wärme.
7. Elektrizität und Magnetismus.

Die drei ersten Abschnitte bilden zusammen genommen das, was man, nicht sehr zutreffend, mit dem Namen „Physik der Molekularkräfte“ oder einfach „Molekularphysik“ belegt hat.

Das Verzeichnis der einzelnen Abschnitte gibt uns die Möglichkeit, die Ziele der Physik und die Richtungen, in denen sie die Beantwortung der Fragen der wissensdurstigen Menschheit sucht, etwas näher zu definieren. Die Ziele lassen sich am besten an einer Reihe von Fragen zeigen. Die Aufgabe der Physik ist es, auf diese Fragen möglichst klare und erschöpfende Antwort zu finden. Selbstverständlich können hier nur die hauptsächlichsten Fragen angeführt werden.

Wie ist der innere Aufbau der Materie beschaffen? Aus welchen Urteilchen besteht sie? Welcher Art Kräfte wirken zwischen den einzelnen Teilchen und wo ist ihre Quelle zu suchen? Was für Bewegungen führen die Teilchen aus? Wie ist ihr innerer Aufbau, welche Kräfte wirken in ihnen, und welcher Art Bewegungen können sie ausführen? Wie sind sie dimensioniert?

Wie lassen sich die Sondereigenschaften der Stoffe in festem, flüssigem und gasförmigem Zustande erklären?

Welchen Charakter besitzen jene Bewegungen der Teilchen und ihrer weiteren Bestandteile, die das Wesen der Wärme darstellen? Wie ändern sich diese Bewegungen in Abhängigkeit von der Temperatur? Wie beeinflußt überhaupt die Temperatur die verschiedenen Eigenschaften der festen, flüssigen und gasförmigen Substanz und die in ihr auftretenden Erscheinungen? Wie wird die Wärme von der einen Stelle der Substanz zu einer anderen übertragen? Auf welche Weise vollzieht sich das Schmelzen und Verdampfen der festen Körper, die Erstarrung und Verdunstung der flüssigen, die Verflüssigung der gasförmigen, überhaupt der Übergang des Stoffes aus einem der drei „Zustände“ in einen anderen?

Worin besteht die Quelle jenes großen Prinzips, das alle in der Welt vorkommenden Erscheinungen beherrscht und uns lehrt, daß die Welt ein Organismus ist, der sich in einer bestimmten Richtung entwickelt? Das gewaltige Prinzip, das das höchste aller Gesetze bestimmt, das Gesetz der Weltevolution, das unter der Bezeichnung „Prinzip der Energiestreuung“, „zweiter Hauptsatz der Thermodynamik“, oder einfach „zweiter Hauptsatz“ bekannt ist?

Was ist das Licht oder, allgemeiner gesprochen, die Strahlungsenergie? Wie entsteht diese Energie im Innern der Materie und wie wird sie von dieser nach allen Richtungen ausgestrahlt? Wie

erklärt man die Grundeigenschaften der Strahlungsenergie: Reflexion, Brechung, Zerlegung in sogenannte Spektre, Absorption beim Durchgang durch die Materie, Interferenz, Polarisierung usw. ? Wie entstehen die besonderen optischen Erscheinungen, die man in Kristallen beobachtet ?

Was ist Elektrizität ? Was ist Magnetismus ? Wie entstehen sie unter verschiedenen Bedingungen ? Wie beeinflussen elektrische und magnetische Kräfte die Eigenschaften der Substanz, und worin besteht der innere Mechanismus dieser Wirkung ? Was ist der elektrische Strom und wie entsteht er unter verschiedenen Bedingungen ? Worauf beruht der innere Mechanismus seiner verschiedenen Wirkungen, die sich in Wärme, chemischen (Elektrolyse), mechanischen, induktiven Erscheinungen usw. äußern ? Worin besteht das Geheimnis der rätselhaften radioaktiven Substanzen ?

Das angeführte Fragenverzeichnis, das natürlich beliebig lang gemacht werden kann, indem auch die Einzelheiten der Erscheinungen mit hineinbezogen werden, ist imstande, einen Begriff vom allgemeinen Charakter der Ziele, zu denen die Physik führt, und der Kenntnisse, die sie im Überfluß der dankbaren Menschheit darbietet, zu geben. Der allgemeine Charakter der hier angeführten Fragen läßt sich also in die Worte kleiden: Erkenntnis des verborgenen Gebietes, in dem die Urquellen der Erscheinungen wirken, die sich auf offener Weltbühne abspielen und von uns wissenschaftlich untersucht werden. Und keine Grenzen hat die Tiefe, bis zu der die Wissenschaft zu dringen bestrebt ist. In der Folge werden wir die wichtigsten Ergebnisse der Physik kennenlernen. Sie werden zeigen, in welchem Maße es dieser Wissenschaft gelungen ist, den Wissensdurst zu stillen, dem sie ihr Entstehen, Blüte und Entwicklung zu verdanken hat.

**§ 8. Schlußbetrachtung.** Im ersten Kapitel haben wir gesehen, welche Rolle das Streben nach Bequemlichkeit und Erkenntnis im menschlichen Leben spielt. Wir sahen, daß auf dem Boden dieses Strebens die Kultur emporwächst und sich entwickelt, und daß die Wissenschaft die Urquelle der Kultur ist, die uns Kenntnisse und dann alle Lebensbequemlichkeiten gibt, an die wir gewöhnt sind. Das zweite Kapitel hatten wir speziell

der Physik gewidmet und lernten ihre Aufgaben und Methoden kennen. Jetzt gehen wir zu unserem Hauptthema über, d. h. zu einer ausführlichen Betrachtung dessen, was die Physik der Menschheit gegeben, welche Kenntnisse und Bequemlichkeiten diese der Wissenschaft zu verdanken hat. Wir wollen, mit anderen Worten, darlegen, was die Physik für die Kultur des Menschen getan hat. Beide Richtungen, die wir mit Erkenntnis und Bequemlichkeit bezeichnet haben, wollen wir gesondert betrachten. Wir beginnen mit den Kenntnissen, die, als unmittelbar der Aufgabe der Physik entsprechend, von dieser aufgedeckt wurden. Ihre Betrachtung wird fast das ganze Buch beanspruchen, und dennoch werden wir uns nur auf das Wesentlichste und Interessanteste beschränken müssen. Die Bequemlichkeiten, die man der Physik zu danken hat, gehören in das Gebiet der Technik, und dieser soll nur ein kurzer Abschnitt gewidmet sein. Ohne auf Einzelheiten technischen Charakters einzugehen, soll er lediglich das erwähnen, was die Technik der Physik zu verdanken hat.

Wir haben nicht die Absicht, alle Gebiete der Physik zu berühren, denn dieses Werk soll kein Lehrbuch sein. Auch die Einteilung soll anders vorgenommen werden, als es in Lehrbüchern zu geschehen pflegt. Nach Möglichkeit sollen allgemeine prinzipielle Fragen herausgegriffen und alles mit ihnen in Verbindung stehende, auch wenn es verschiedenen Gebieten der Physik angehört, besprochen werden.

Bei Betrachtung der Kenntnisse, mit denen uns die Physik beschenkt hat, wird es in vielen Fällen unmöglich sein, den langen und komplizierten Weg zu verfolgen, der zu dem betreffenden Ergebnis geführt hat. Es ist für uns von größerer Wichtigkeit, genau anzugeben, was die Physik erreicht und welche tiefen Kenntnisse sie vor uns aufgedeckt hat.

Bei Berechnung von Längen, Oberflächen, Volumina und Gewichten bedient sich die Wissenschaft nur des metrischen Systems. Die Temperatur werden wir stets in Grad Celsius (C) angeben, nicht aber in Reaumur (R), obwohl letzteres im täglichen Gebrauch sehr verbreitet ist.

### 3. Kapitel.

## Moleküle, Atome und Elektronen.

**§ 1. Einleitung.** Das, woraus die in der Natur vorkommenden oder vom Menschen künstlich hergestellten Körper bestehen, werden wir mit dem Namen Stoff oder Materie bezeichnen. Schon im Altertum zog die Materie die Aufmerksamkeit der denkenden Menschen auf sich. Man war bestrebt, das Geheimnis ihres inneren Aufbaues zu lüften und vor allem zu ergründen, ob die Materie den von ihr eingenommenen Raum durchweg ausfüllt. Tatsächlich scheint es ja, daß kein leerer Raum übrigbleibt, wenn man solche Körper, wie Schwämme, Holzkohle usw. ausnimmt, in denen die leeren Kanäle sogar mit bloßem Auge oder noch besser durch ein Vergrößerungsglas (Lupe) oder unter dem Mikroskop leicht zu erblicken sind. Diese Kanäle nennt man Poren und bezeichnet den Stoff selbst als porös. Viele Körper verraten das Vorhandensein von Poren dadurch, daß sie Flüssigkeiten, z. B. Wasser, aufsaugen. So kann man sich leicht davon überzeugen, daß Kreide imstande ist, große Wassermengen aufzunehmen. Unter sehr hohem Druck kann man Wasser sogar durch ziemlich dicke Metallschichten hindurchpressen, und doch scheint uns Metall ganz dicht und unporös zu sein. Besonders auffallend ist es, daß viele Gase von festen Körpern absorbiert werden und sogar durch dieselben ziemlich leicht hindurchgehen, vorzüglich wenn die Körper erwärmt sind. So dringt z. B. Helium, ein Gas, von dem noch oft die Rede sein wird, mit Leichtigkeit durch heiße Quarzplatten. Das interessanteste Beispiel bietet jedoch das schwere Metall Palladium, das seinen Eigenschaften nach dem Gold, Platin und Osmium, aus dem heutzutage die Fäden für elektrische Lampen hergestellt werden, nahe steht. Palladium absorbiert in gewaltigen Mengen Wasserstoff, ebenfalls ein Gas, dem wir noch oft begegnen werden. Es zeigt sich, daß bei gewöhnlichem Atmosphärendruck Palladium eine Wasserstoffmenge absorbiert, deren Volumen das des Palladiums selbst um das 1000fache übersteigt. Es leuchtet ein, daß auch

dieses Metall den von ihm „eingenommenen“ Raum nicht vollkommen ausfüllt, denn es muß doch schließlich für den absorbierten Wasserstoff Platz vorhanden sein. Derartige Erscheinungen zwingen uns zu der Annahme, daß die Materie nicht kompakt ist und den von ihr scheinbar eingenommenen Raum nicht vollkommen in Anspruch nimmt. Bereits im Altertum tauchte der Gedanke auf, daß die Materie aus einzelnen winzigen Teilchen bestehe. Man gab ihnen den Namen Atome, was so viel wie unteilbar bedeutet. Von unzerstörbaren und unveränderlichen kleinsten Teilchen spricht schon Anaxagoras (500 bis 428 v. Chr.). Als Schöpfer der Atomtheorie gilt aber gewöhnlich Demokrites (460 bis 370 v. Chr.). Aristoteles (384 bis 322 v. Chr.) hat sich wiederum gegen die Existenz der Atome ausgesprochen. Später haben Epikur (341 bis 270 v. Chr.) und besonders Lucretius (96 bis 55 v. Chr.) den Gedanken von Demokrites weiter entwickelt. Im Laufe von vielen Jahrhunderten hat darauf die Atomtheorie keine irgendwie nennenswerte Rolle gespielt. Erst Gassendi (1592 bis 1655) hat sie wieder ins Leben gerufen. Er führte den Begriff von Kräften ein, die zwischen den Atomen wirken und erklärte das Verschwinden irgend einer Art Materie und das Entstehen einer neuen Art als das Resultat der Umgruppierung der Atome. Diesen Gedanken schloß sich Boyle (1627 bis 1691) an, der als der Vorgänger von Dalton anzusehen ist, denn als erster hat er die Bedeutung der Atomtheorie für die Erklärung von chemischen Erscheinungen nachgewiesen. Als der wahre Begründer der modernen Atomlehre muß jedoch Dalton (1766 bis 1844) genannt werden, der im Jahre 1808 in seinem Werke „Das neue System der Chemie“ seine Theorie dargelegt hat. Es erübrigt sich, weitere Namen anzuführen, denn die ganze Chemie, sowie umfangreiche Abschnitte der Physik sind heute auf der Atomlehre oder, genauer ausgedrückt, auf der Molekulartheorie aufgebaut. Es ist das eine der wenigen Theorien, deren Grundhypothese heute nicht mehr als Hypothese betrachtet wird. Wir wollen sie so darlegen, wie sie die moderne Wissenschaft beherrscht. Es wird das erste Beispiel dafür sein, wie tief unsere Kenntnisse in die verborgene Welt gedrungen sind, der offenbar die Moleküle, Atome und Elektronen, dies ursprüngliche Baumaterial der ganzen,

unserer Beobachtung zugänglichen Welt, angehören. Wenn auch diese Theorie ihre Anfangsentwicklung der Chemie zu verdanken hat, beruhen doch ihre Blüte, Ausbreitung und Vertiefung ausschließlich auf Ergebnissen physikalischer Forschung. In der modernen Lehre von den Molekülen, Atomen und Elektronen ist ein gewaltiger Triumph der Physik zu erblicken, ein Triumph des Genies, das in unersättlichem Streben nach Erkenntnis in die unbekanntete Welt dringt. Wohl sind unsere Sinnesorgane nicht imstande, diese Welt in sich aufzunehmen, doch zeigt es sich, daß die hier gesetzten Schranken dem Lichte der Wissenschaft nicht standhalten können.

**§ 2. Atome und Moleküle.** Wenn von allerlei Stoff die Rede ist, aus dem alle uns umgebenden Gegenstände bestehen, so wird zuweilen statt „Stoff“ der Ausdruck „Körper“ gebraucht, was leicht zu Mißverständnissen führen kann. Denn Körper sind schließlich auch die Gegenstände selbst, und diese können zuweilen sehr komplizierten Bau besitzen und aus verschiedenen Stoffen bestehen. So sind z. B. der Tisch, die Uhr, die Lokomotive, die Pumpe, der Mond usw. zweifellos „Körper“. In der Folge werden wir aber dem Ausdruck „Körper“ auch die Bedeutung „Stoff“ geben und z. B. Glas, Kupfer, Spiritus, Sauerstoff usw. als Körper bezeichnen. Von unserer Betrachtung schließen wir alle Gemische, Legierungen und Lösungen aus und wenden uns Körpern (Stoffen) zu, die im chemischen Sinne „rein“ sind, d. h. keinerlei Beimengungen fremder Stoffe enthalten.

Alle chemisch reinen Stoffe lassen sich in zwei Gruppen einteilen: in einfache Körper, die man auch als Elemente bezeichnet, und in zusammengesetzte, die „chemische Verbindungen“ zweier oder einer größeren Anzahl von einfachen Körpern darstellen. Was diese Worte bedeuten, wird aus dem Folgenden ersichtlich werden.

Der einfache Stoff (radioaktive Substanzen seien vorläufig ausgenommen) kann unter keinen Umständen in mehrere zerfallen, die von ihm selbst oder untereinander verschieden wären. Dergleichen kann er nicht als einziges Resultat der gegenseitigen Wirkung von mehreren Stoffen gewonnen werden, die, im einfachen Körper aufgehend, aufhören würden, als solche zu existieren.

Mit anderen Worten können einfache Körper weder einer chemischen Analyse, d. h. einer Zerlegung in Bestandteile, noch einer chemischen Synthese, d. h. einer Zusammensetzung aus den einzelnen Bestandteilen, unterworfen werden. Zu den Elementen gehören alle reinen Metalle, von denen sehr viele, wie Eisen, Kupfer, Blei, Zinn, Zink, Aluminium, Quecksilber, Silber, Gold, Platin, Nickel usw. allgemein bekannt sind. Es gibt im ganzen etwa 55 verschiedene Metalle. Mit vielen von ihnen wird man in diesem Buche zu tun haben. Es sei beispielsweise auf die leichten Metalle Kalium und Natrium hingewiesen, die auf dem Wasser schwimmen und bei gewöhnlicher Temperatur so weich sind, daß man sie mit dem Messer leicht schneiden kann. Zu den Metallen gehört auch das Radium, von dessen erstaunlichen Eigenschaften wohl alle gehört haben. Von Elementen, die nicht zu den Metallen gezählt werden, erwähnen wir die festen Körper: Jod, Schwefel, Phosphor, Silicium, Arsenik (reines, nicht etwa das weiße Pulver, das fälschlicherweise gewöhnlich so genannt wird) und Kohlenstoff (kommt in drei Arten vor: als Kohle, Graphit und als Diamant). Von gasförmigen Elementen seien folgende hervorgehoben: Sauerstoff und Stickstoff, die Bestandteile der Luft bilden, Wasserstoff, der 14mal so leicht ist als die Luft, und Chlor (grünliches Gas von erstickendem Geruch). Von besonderem Interesse sind jedoch die Gase: Neon, Argon, Krypton, Xenon und Helium, von denen die ersten vier in sehr geringen Mengen in der Luft enthalten sind. Argon allerdings macht fast 1 Proz. der ganzen Luftmasse aus. Ausschließliches Interesse bietet das Element Helium. Es kommt in verschiedenen Mineralien vor und wird aus diesen durch Glühen gewonnen. Die Gesamtzahl der verschiedenen Elemente übersteigt 100 (wenn man die radioaktiven Stoffe mitrechnet).

Denken wir uns eine gewisse Menge irgend eines Elementes und zerlegen wir sie in Gedanken in immer kleinere und kleinere Teile. Wir gelangen schließlich zu solchen Teilen, die sich unter keinen Bedingungen noch weiter zerkleinern lassen. Das sind eben die Atome, die kleinsten, einander vollkommen gleichen Teile, aus denen das betreffende Element besteht. Im achten Kapitel, das sich mit der Frage nach dem Aufbau der Atome befaßt, werden wir sehen, daß die Zerlegung eines Atoms in noch

kleinere Teile desselben Stoffes, sogar in Gedanken undurchführbar ist. Erst kürzlich ist die Wissenschaft dahinter gekommen, wodurch sich die Atome der verschiedenen Elemente voneinander unterscheiden.

Zusammengesetzte Körper stellen „chemische Verbindungen“ von zwei oder mehreren einfachen Körpern, d. h. Elementen, dar. Die Bedeutung dieser Worte wird aus folgender Betrachtung klar. Denken wir uns einen zusammengesetzten Körper, d. h. irgend einen aus Nichtelementen bestehenden reinen Stoff und zerlegen ihn in Gedanken in immer kleinere und kleinere Teile, so gelangen wir schließlich zu solchen Teilen, die sich nicht mehr in noch kleinere Teile desselben Stoffes zerlegen lassen. Man nennt sie Moleküle, zuweilen auch „Teilchen“, obwohl diese Bezeichnung zu Mißverständnissen Anlaß geben kann. Man versteht nämlich unter „Teilchen“ öfters solche Teile eines Stoffes, die zwar an und für sich sehr klein sind, nichtsdestoweniger aber viele Millionen von Molekülen enthalten können. Jedes Molekül besteht aus Atomen derjenigen Elemente, die den Bestand des betrachteten Stoffes ausmachen. So besteht z. B. das Wassermolekül aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen; das Kochsalzmolekül enthält ein Atom des Metalles Natrium und ein Chloratom. Ein Molekül des kohlen sauren Gases, das sich z. B. aus Selterswasser ausscheidet und fälschlich Kohlensäure genannt wird, besteht aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen; ein Zuckermolekül wird wiederum aus 12 Kohlenstoffatomen, 11 Sauerstoffatomen und 22 Wasserstoffatomen gebildet. Man ersieht daraus, daß der zusammengesetzte Stoff seinem Aussehen und den Eigenschaften nach den Elementen, als deren chemische Verbindung er dasteht, gänzlich unähnlich ist. Man beachte bloß, daß Wasser aus zwei Gasen, Kochsalz aus einem weichen Metall und einem grünlichen Gas besteht usw. Das Molekül des zusammengesetzten Stoffes kann wohl zerkleinert werden, man erhält aber dabei Atome jener einfachen Stoffe, aus denen der gegebene zusammengesetzte aufgebaut ist. So läßt sich Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff, Kochsalz in Natrium und Chlor zerlegen usw. Es ist einleuchtend, daß die zusammengesetzten Stoffe im Gegensatz zu den Elementen sowohl einer Analyse als auch einer Synthese unterworfen werden können.

Nachdem wir nun das Molekül des zusammengesetzten Stoffes kennengelernt haben, müssen wir das über die kleinsten Teilchen der Elemente Gesagte etwas abändern. Einige Elemente bestehen nämlich in erster Linie nicht aus Atomen, sondern aus Molekülen, die sich aber von denen der zusammengesetzten Stoffe dadurch wesentlich unterscheiden, daß sie aus vollkommen gleichen Atomen gebildet werden. So besteht das Sauerstoffmolekül aus zwei eng verbundenen Sauerstoffatomen. Desgleichen werden die Stickstoff-, Wasserstoff- und Chlormoleküle aus je zwei gleichen Atomen gebildet. Die genannten vier Elemente sind Gase und werden sie zweiatomige Gase genannt. Es gibt aber auch solche gasförmige Elemente, die aus einzelnen, d. h. miteinander nicht verknüpften Atomen bestehen. Hierher gehören Argon, Neon, Krypton, Xenon, Helium und die Metaldämpfe: Kalium, Natrium, Cadmium und Quecksilber. Offenbar müssen diese Dämpfe, die ihren Eigenschaften nach den Gasen vollkommen gleichen, zu den gasförmigen Elementen gerechnet werden. Das sind wieder einatomige Gase, von denen man allerdings sagen kann, daß ihr Molekül mit dem Atom identisch ist. In der Folge wird von ein-, zwei- und vielatomigen Gasen viel die Rede sein, wobei diese Termini (außer dem ersten) nicht nur auf Elemente, sondern auch auf gasförmige Verbindungen bezogen werden sollen. Offenbar kann einatomig nur ein einfacher Stoff, d. h. ein Element sein. Unter die Bezeichnung „zweiatomig“ kann jeder Stoff fallen, dessen Molekül aus zwei Atomen besteht; besitzt es drei Atome, so heißt der Stoff „dreiatomig“ usw. Zu den zweiatomigen Gasen, Nichtelementen, gehören Kohlenstoffoxyd (das Molekül wird aus einem Kohlenstoffatom und einem Sauerstoffatom gebildet), Stickstoffoxyd (ein Stickstoff- und ein Sauerstoffatom), Chlorwasserstoffgas (ein Chlor- und ein Wasserstoffatom; eine wässrige Lösung davon heißt Salzsäure), Kochsalzdämpfe usw. Wasserdämpfe stellen ein dreiatomiges Gas dar, denn das Molekül ist das gleiche wie bei Wasser. Ammoniak ist ein vieratomiges Gas (ein Stickstoffatom und drei Wasserstoffatome; seine Lösung in Wasser ist unter dem Namen Salmiakgeist bekannt). Bezüglich der festen Elemente sei lediglich darauf hingewiesen, daß die Metalle aller Wahrscheinlichkeit nach einatomige Stoffe sind, d. h. nicht aus Molekülen bestehen, die aus

zwei oder einer größeren Zahl von miteinander verbundenen Atomen gebildet sind.

### § 3. Gewicht und Dimensionen der Atome und Moleküle.

Es ist mit großer Genauigkeit festgestellt worden, wie sich die Atomgewichte der einzelnen Elemente zueinander verhalten. Das leichteste ist das Wasserstoffatom: Nimmt man das Gewicht von einem Wasserstoffatom als Vergleichseinheit an, so sind die Atomgewichte des Heliums gleich 4, des Kohlenstoffs 12, des Stickstoffs 14, des Sauerstoffs 16, des Neons 20,2, des Natriums 23, des Aluminiums 27,1, des Phosphors 31, des Chlors 35,5, des Argons 39,9, des Kaliums 39,1, des Eisens 55,8, des Kobalts 58,97, des Nickels 57,7, des Kupfers 63,6, des Zinks 65,4, des Kryptons 82,9, des Silbers 107,9, des Zinns 118,7, des Jods 126,9, des Xenons 130,2, des Platins 195,2, des Goldes 197,2, des Quecksilbers 200,6, des Bleies 207,2, des Radiums 226 und des Urans gleich 238,2 zu setzen. Diese Zahlen zeigen an, um das Wievielfache das Atomgewicht des genannten Elementes das des Wasserstoffatoms übertrifft. So sieht man, daß ein Kohlenstoffatom 12mal, ein Phosphoratom 32mal, ein Eisenatom 55,8mal, ein Quecksilberatom 200,6mal und ein Uranatom, das schwerste von allen, 238,2mal so schwer sind als ein Wasserstoffatom. Die hier angeführten Zahlen sind zwar nicht ganz genau, genügen aber für unsere Zwecke vollkommen. D. J. Mendelejew (1834 bis 1907), einer der größten Forscher aller Zeiten, hat alle Elemente in das sogenannte periodische System eingereiht, auf das wir jedoch nicht näher eingehen wollen. Von größter Wichtigkeit ist es aber, die Atomzahl oder Ordnungsnummer des Elementes kennenzulernen. Es ist das nichts anderes als die Nummer, die das Element trägt, wenn alle Elemente in der von Mendelejew aufgestellten Reihenfolge mit Nummern versehen werden. Diese Reihenfolge stimmt fast durchweg mit derjenigen überein, die man erhält, wenn die Elemente einfach nach anwachsendem Atomgewicht geordnet werden. Die Atomzahlen der Elemente stehen heute fest, und es hat sich gezeigt, daß es 92 Nummern gibt. Es seien hier einige Atomzahlen genannt. Sie stehen vor dem Namen des Elementes, während die eingeklammerten Zahlen

nochmals die Atomgewichte angeben: 1 Wasserstoff (1), 2 Helium (4), 6 Kohlenstoff (12), 7 Stickstoff (14), 8 Sauerstoff (16), 10 Neon (20,2), 11 Natrium (23), 13 Aluminium (27,1), 15 Phosphor (31), 16 Schwefel (32), 17 Chlor (35,5), 19 Kalium (39,1), 26 Eisen (55,8), 29 Kupfer (63,6), 47 Silber (107,9), 50 Zinn (118,7), 53 Jod (126,9), 78 Platin (195,2), 79 Gold (197,2), 80 Quecksilber (200,6), 82 Blei (207,2), 88 Radium (226), 92 Uran (238,2). Einige Ordnungszahlen (43, 61 und 75) sind vorläufig leer ausgegangen, da die ihnen entsprechenden Elemente noch nicht entdeckt sind. An drei Stellen haben je zwei Elemente scheinbar ihre Plätze vertauscht: einer kleineren Nummer entspricht ein größeres Atomgewicht. So hat 18 Argon als Atomgewicht 39,9, während 19 Kalium nur 39,1 besitzt. Bei näherer Betrachtung der angeführten Zahlen bemerkt man, daß am Anfang der Reihe, wo sie noch klein sind, die Nummer gleich oder annähernd gleich der Hälfte des Atomgewichts ist, während bei größeren Zahlen diese Beziehung nicht mehr besteht, denn die Atomgewichte übertreffen bei weitem die verdoppelten Ordnungszahlen (so beim Uran 238,2, anstatt  $92 \times 2 = 184$ ). Es ist von größtem Interesse, daß bis zur Ordnungszahl 80 (Quecksilber) jeder Nummer nur ein einziges Element entspricht, während die letzten 12 (81 bis 92) mehrere umfassen, die fast alle zu den kürzlich entdeckten radioaktiven Elementen gehören. So entsprechen der Nummer 82 außer dem Blei noch sechs radioaktive Stoffe. Elemente, die eine gemeinsame Ordnungsnummer haben, heißen Isotope; ihre Atomgewichte sind nicht gleich.

Unter Molekulargewicht irgend eines Stoffes versteht man das Gewicht eines Moleküls desselben, wobei als Vergleichseinheit wiederum das Atomgewicht des Wasserstoffs genommen wird. Das Molekulargewicht ist mithin die Summe der Gewichte aller Atome, aus denen das Molekül aufgebaut ist. Benutzt man die bereits höher angeführte Zusammensetzung einiger Stoffe, so findet man als Molekulargewicht des Wassers 18 (ein Sauerstoffatom 16 und zwei Wasserstoffatome  $1 + 1$ ), des kohlen-sauren Gases 44 ( $12 + 16 + 16$ ), des Kochsalzes 58,5 ( $23 + 35,5$ ), des Zuckers 342 ( $12 \times 12 + 16 \times 11 + 22$ ). Zweiatomige Elemente besitzen außer dem Atomgewicht auch ein Molekulargewicht. So ist das Molekulargewicht des Wasserstoffs 2, des Stickstoffs 28,

des Sauerstoffs 32, des Chlors 71. Wie die Atome innerhalb des Moleküls verteilt sind, ist eine Frage der Chemie und soll sie hier nicht weiter berührt werden.

Man wird in der Folge der Bezeichnung „Gramm-Molekül“ begegnen, die von großer Wichtigkeit ist. Unter einem Gramm-Molekül irgend eines Stoffes versteht man die Grammanzahl des Stoffes, die sein Molekulargewicht angibt. So bedeutet 1 g-Mol. Wasser nichts anderes als 18 g Wasser. 44 g kohlen-sauren Gases, 58,5 g Kochsalz, 342 g Zucker bilden je 1 g-Mol. dieser Stoffe. Weiterhin sind 1 g-Mol. Wasserstoff 2 g, Stickstoff 28 g, Sauerstoff 32 g. Bei Elementen kann man auch von Gramm-Atomen sprechen, die so viel Gramm enthalten, wieviel das betreffende Atomgewicht angibt. So enthalten 1 g-Atom Wasserstoff 1 g, Sauerstoff 16 g, Schwefel 32 g usw. Bei einatomigen Gasen ist das Gramm-Molekül offenbar mit dem Gramm-Atom identisch und beträgt beispielsweise für Helium 4 g, für Argon 39,9 g, für Natriumdämpfe 23 g, für Quecksilberdämpfe 200,6 g.

Wir haben die relativen Gewichte der Atome und Moleküle kennengelernt, indem wir sie mit dem Gewicht eines Wasserstoffatoms vergleichen. Es wäre jedoch von Interesse, das wahre Gewicht der Atome und Moleküle festzustellen, d. h. zu erfahren, wieviel Atome oder Moleküle in 1 g Stoff enthalten sind. Auch diese Frage kann die Wissenschaft heute ganz genau beantworten. Es ist leicht einzusehen, daß ein Gramm-Molekül stets eine und dieselbe Anzahl von Molekülen enthält, welchen Stoff man auch betrachten möge. Mit anderen Worten enthalten 2 g Wasserstoff, 32 g Sauerstoff, 71 g Chlor, 18 g Wasser, 44 g kohlen-sauren Gases, 58,5 g Kochsalz, 342 g Zucker die gleiche Anzahl von Molekülen. Die gleiche Anzahl von Atomen enthalten 4 g Helium, 23 g Natriumdämpfe, 200,6 g Quecksilberdämpfe usw. In der Tat verhalten sich die Gewichte der einzelnen Moleküle zweier Stoffe zueinander wie die entsprechenden Molekulargewichte. Nimmt man daher zwei solche Mengen zweier Stoffe, die eine gleiche Anzahl von Molekülen enthalten, so werden sich die Gewichte der beiden Mengen zueinander verhalten wie die Molekulargewichte der betrachteten Stoffe. Daraus folgt unmittelbar, daß in zwei Stoffmengen die Anzahl der Moleküle die gleiche sein muß, wenn die Gewichte

der Mengen sich zueinander verhalten wie die Molekulargewichte der Stoffe. Ein solcher Fall tritt ein, wenn von jedem Stoffe so viel Gramm genommen werden, wieviel das Molekulargewicht angibt, d. h. je 1 g-Mol.

Die für die Physik äußerst wichtige Anzahl der Moleküle in 1 g-Mol. Stoff heißt die Avogadrozahl und wird gewöhnlich mit dem Buchstaben  $N$  bezeichnet. Nach Ermittlungen des amerikanischen Forschers Millikan (1917) ist

$$N = 6,06 \cdot 10^{23}.$$

Wie man sieht, ist es eine 24stellige Zahl: 606 und 21 Nullen. Da nun 2 g Wasserstoff so viel Moleküle enthalten, so entfallen auf 1 g  $\frac{1}{2} N$  Moleküle. Ein Molekül besteht aber aus zwei Atomen. Folglich sind in 1 g Wasserstoff  $N$  Atome enthalten, d. h. die soeben angeführte ungeheure Zahl. Bezeichnet man eine Million Millionen mit Billion, eine Million Billionen mit Trillion und eine Million Trillionen mit Quadrillion, so beträgt die Zahl  $N$  606 000 Trillionen, d. h. über sechs Zehntel eines Quadrillions. Denkt man sich 1 g in eine Quadrillion gleicher Teile zerlegt, so ist das Atomgewicht des Wasserstoffs gleich 1,67 solcher Teile. Ist aber das Atomgewicht des Wasserstoffs bekannt, mit dem wir ja die Atomgewichte aller übrigen Elemente und die Molekulargewichte der verschiedensten Verbindungen vergleichen, so sind die wahren Atom- und Molekulargewichte leicht festzustellen. Es braucht nur das wahre Atomgewicht des Wasserstoffs mit den entsprechenden Atom- und Molekulargewichten der betreffenden Stoffe multipliziert zu werden.

Die Zahl  $N$  ist viel zu groß, als daß man sich eine klare Vorstellung von ihr machen kann. Man verkleinert sie daher und betrachtet nur einen bestimmten Teil des Gramm-Moleküls. Der Italiener Avogadro (1776 bis 1856) hat folgendes wichtige Gesetz für Gase aufgestellt: Gleiche Volumina verschiedener Gase von gleicher Temperatur und gleichem Druck enthalten eine gleiche Anzahl von Molekülen. Die Worte „von gleichem Druck“ bedeuten, daß alle Gase in gleichem Maße komprimiert sein müssen, es darf also nicht etwa das eine Gas stark komprimiert und das andere vielleicht mittels einer Pumpe verdünnt sein. So können sich z. B. alle Gase unter gewöhnlichem

Atmosphärendruck befinden, d. h. unter einem Druck, den eine Quecksilbersäule von 760 mm hervorbringt. Das soeben erwähnte Gesetz heißt das Gesetz von Avogadro. Es läßt noch folgende Schlußfolgerung zu: Die Gramm-Moleküle der verschiedenen Gase nehmen bei gleicher Temperatur und Druck gleiche Volumina ein. Nehmen wir z. B. an, alle Gase hätten die Temperatur  $0^{\circ}$  und befänden sich unter normalem Atmosphärendruck (760 mm Quecksilbersäule). Dann nimmt das Gramm-Molekül eines beliebigen Gases ein Volumen von 22,42 Litern, d. h. von 22420 ccm ein (ein Liter faßt 1000 ccm) und dieses Volumen enthält  $N$  Moleküle. Dividiert man diese Zahl durch 22420, d. h. nimmt man 1 ccm, so enthält dieses winzige Volumen bei  $0^{\circ}$  und Atmosphärendruck eine Zahl von Molekülen, die gleich ist

$$n = 2,7 \cdot 10^{19}.$$

So viel Moleküle enthält unter den angegebenen Bedingungen ( $0^{\circ}$  und 760 mm Quecksilbersäule) z. B. 1 ccm Luft. Wir wollen versuchen, uns eine klare Vorstellung von der Ungeheuerlichkeit dieser Zahl zu machen. Nehmen wir an, wir hätten unser Kubikzentimeter Luft (oder eines anderen Gases) in einem geschlossenen Gefäß untergebracht und lassen nun sekundlich eine Million Moleküle entweichen. Um sämtliche Moleküle ins Freie gelangen zu lassen, müßten wir unsere Arbeit eine Million Jahre ununterbrochen fortsetzen. In 1 g-Mol. Gas, z. B. in 2 g Wasserstoff, sind sogar  $N$  Moleküle enthalten, d. h. 22420mal soviel. Auf andere Weise kann man sich die ungeheure Zahl  $n$  vorstellen, wenn man sich  $n$  kleine Wassertröpfchen denkt. Ein jedes habe die Gestalt einer Kugel von etwas über 2 mm im Durchmesser (d. h. ein Volumen von 5 cmm).  $n$  solcher Tröpfchen würden einen See von 15 km Breite, 30 km Länge und 500 m Tiefe ausfüllen.

Es sei bemerkt, daß moderne Luftpumpen imstande sind, ein Gas bis zu einem Zehntausendmillionstel Atmosphäre zu verdünnen. Jedoch auch bei einer so weit getriebenen Evakuierung würde 1 ccm noch 2700 Millionen Teilchen enthalten.

Wir sehen, daß die Wissenschaft es zustande gebracht hat, das Gewicht der Atome und Moleküle und folglich auch ihre Anzahl in einem gegebenen Volumen Stoff anzugeben. Großes Interesse

bietet ferner die Frage nach den Dimensionen, d. h. nach der Größe der Atome und Moleküle. Im Kapitel über den Aufbau der Atome wird es sich zeigen, daß heutzutage der Begriff der Größe des Atoms von seiner früheren Einfachheit und Bestimmtheit viel eingebüßt hat. Bis zum Auftreten der neuen Lehre über den Aufbau der Atome stellte man sich das einzelne Atom als ein Körnchen von ganz bestimmter, meist kugelförmiger Gestalt und ganz bestimmten Dimensionen vor. Diese Dimensionen konnte man auf Grund verschiedener Beobachtungen berechnen, und es zeigte sich, daß der Durchmesser des Moleküls eines Gases, wie z. B. Sauerstoff oder Stickstoff, ungefähr zwei Zehnmillionstel eines Millimeters betrug, so daß fünf Millionen solcher Moleküle, aneinandergereiht, eine Kette von 1 mm Länge ergeben würden. Das gibt uns die Möglichkeit, noch eine Illustration für die Größe der Molekülanzahl in 1 ccm Gas bei 0° und 760 mm Druck zu geben. Denkt man sich alle  $n$  Moleküle in eine ununterbrochene Reihe gelegt, so erhält man einen äußerst dünnen Faden, den man 134mal um den Erdäquator schlingen könnte. Weiterhin denke man sich einen kleinen Gummiball von 50 mm im Durchmesser. Folgender grober Vergleich kann uns einen Begriff (nicht aber eine Vorstellung) von der Größe des Moleküls geben. Dieses ist beispielsweise so vielmal kleiner als der Gummiball, als letzterer kleiner als der Erdball ist. Der französische Forscher Perrin (1909) schlägt folgenden Vergleich vor: ein Atom Wasserstoff verliert sich in der Masse des menschlichen Körpers genau so, wie dieser sich in der Masse der Sonne verlieren würde. Selbstverständlich besitzen die Moleküle von sehr komplizierten Verbindungen, da sie eine größere Anzahl von Atomen enthalten, entsprechend größere Dimensionen.

**§ 4. Die Elektronen.** Eine wichtige und täglich noch wachsende Bedeutung besitzt in der modernen Physik die Hypothese von der Existenz sogenannter Elektronen, eine Hypothese, die übrigens nicht mehr als solche anzusprechen ist, so wahrscheinlich ist ihre Realität. Die auf dieser Hypothese aufgebaute Elektronentheorie, welche die Eigenschaften der Elektronen und die Erscheinungen, die sie hervorrufen können, bestimmt, ist fast

in alle Gebiete der Physik eingedrungen und hat den Elektronen die Rolle einer vorherrschenden Urquelle der physikalischen Erscheinungen zugeteilt.

Es sei in Erinnerung gebracht, daß beim Reiben zweier Körper aneinander, z. B. von Glas an Seide oder von Siegellack an Pelzwerk, die Körper eine ganze Reihe von neuen Eigenschaften gewinnen. Ihre Ursache liegt darin, daß die Körper sich beim Reiben „elektrisieren“, d. h. es entsteht auf ihrer Oberfläche Elektrizität. Eine nähere Betrachtung zeigt, daß es zwei Arten Elektrisierung gibt, die gleichzeitig auf beiden aneinandergeriebenen Körpern entstehen. Sie erhielten die Bezeichnung positive und negative Elektrisierung. Zur Erläuterung der dabei auftretenden Erscheinungen wurde die Annahme gemacht, daß es zwei Arten Elektrizität gibt, die positive und die negative. Sie üben entgegengesetzte Wirkungen aus: was die eine Elektrizität anzieht, wird von der anderen abgestoßen und umgekehrt. Sind in irgend einem Körper beide Elektrizitäten in solchen Mengen vorhanden, daß ihre Wirkungen auf andere Körper sich gerade aufheben, so sagt man, daß diese Mengen einander gleich sind und daß der Körper, der als nichtelektrisch erscheint, sich in neutralem Zustande befindet. Ist im Körper von einer Elektrizität mehr vorhanden als von der anderen, so erhält die erstere das Übergewicht und der Körper erscheint als mit dieser Art Elektrizität geladen. Es leuchtet ein, daß man zum gleichen Ergebnis gelangt, ob man nun einem neutralen Körper eine gewisse Menge, sagen wir positiver Elektrizität zuführt oder ihm eine gleiche Menge negativer entzieht. In beiden Fällen erscheint der Körper als positiv elektrisiert. Die auf einem Körper befindliche Elektrizitätsmenge nennt man „die Ladung“ des Körpers.

Lange Zeit hindurch nahmen die Forscher an, daß beide Elektrizitäten mehr oder weniger analoge Eigenschaften besitzen und sozusagen zwei Formen eines und desselben Stoffes darstellen. Man sprach sogar von zwei elektrischen Flüssigkeiten, die innerhalb der sogenannten elektrischen Leiter, zu denen z. B. alle Metalle, Kohle und Lösungen von Salzen, Säuren und Laugen gehören, fließen. Man nahm an, daß die beiden Elektrizitäten, in Mischung übergehend, sich gegenseitig vernichten und ein

neutrales Gemisch bilden, das keinerlei Wirkung im Außenraum hervorbringt.

Eine derartige Anschauung über den gleichen Charakter der Grundeigenschaften der zwei Elektrizitäten (wenn man von ihren in entgegengesetzten Richtungen verlaufenden Wirkungen absieht) ist heute durch eine ganz andere, der Wahrheit viel näher stehende ersetzt. Den zwei Elektrizitäten, deren Vorhandensein auch die moderne Wissenschaft bejaht, werden ganz verschiedene Eigenschaften und somit auch verschiedene Rollen in den physikalischen Erscheinungen zugeschrieben. Wir wissen jetzt mit Bestimmtheit, daß in den meisten Fällen, in denen wir verschiedenartige elektrische Erscheinungen beobachten, als unmittelbares Agens diejenige Elektrizität auftritt, die man als negative bezeichnet. Ihre Existenz kann nicht dem geringsten Zweifel unterliegen. Ihre Eigenschaften sowie die Rolle, die sie in vielen Erscheinungen spielt, sind vielseitig geklärt. Wir wissen mit Bestimmtheit, daß die negative Elektrizität „atomistischen“ Aufbau besitzt. Sie besteht also aus einzelnen Teilchen, die unmittelbar miteinander nicht verbunden sind. Diese „Atome“ der negativen Elektrizität nennt man eben Elektronen. Die Elektronen stoßen sich gegenseitig ab, versuchen also, sich möglichst weit voneinander zu entfernen. Sie verfügen über eine außerordentliche Beweglichkeit und die Geschwindigkeit ihrer Bewegungen kann, wie man sehen wird, eine ungeheure Größe erreichen. Die bekannte Erscheinung des elektrischen Stromes ist nichts weiter als ein Strom von Elektronen, die sich im Leiter (dem Draht) in bestimmter Richtung bewegen. Alle Elektronen sind gleich und unterscheiden sich durch nichts voneinander. Die Ladung des Elektrons, d. h. die negative Elektrizitätsmenge, aus der es besteht, ist mit der größten Genauigkeit festgestellt worden, und ihre Größe kann folgendermaßen angegeben werden. Man denke sich zwei völlig gleiche kleine Kugeln, sagen wir aus Siegellack. Der Kugeldurchmesser soll einige Millimeter nicht überschreiten. Beide Kugeln sollen so an Pelzwerk gerieben worden sein, daß ihre Oberflächen gleichmäßig mit negativer Elektrizität bedeckt sind. Sie mögen so aufgestellt sein, daß die Entfernung zwischen ihren Mittelpunkten 1 cm beträgt. Die Ladungen sollen so bemessen sein, daß beide Kugeln sich mit einer geringen

Kraft, gleich dem Gewicht von 1,02 mg, abstoßen, was einer sehr schwachen Elektrisierung der Kugeln entspricht. Man kann mit Bestimmtheit aussagen, daß auf jeder Kugel etwa 2100000000, d. h. zweitausendeinhundert Millionen Elektronen vorhanden sind. Es ist leicht zu verstehen, daß die Kraft, mit welcher sich zwei Elektronen gegenseitig abstoßen, ungeheuer klein sein muß. Sie ist um so größer, je kleiner die Entfernung zwischen den Elektronen. Sie ändert sich umgekehrt proportional dem Quadrat dieser Entfernung. Bei Verkürzung der Entfernung um das 2-, 3- und 10fache vergrößert sich die abstoßende Kraft um das 4-, 9- und 100fache. Beträgt die Entfernung zwischen zwei Elektronen nur ein Millionstel von einem Millimeter, so ist die Kraft ihrer gegenseitigen Abstoßung ungefähr 40000mal so klein als das Gewicht eines Milligramms. Sind die Elektronen sogar nur ein Hundertmillionstel Millimeter voneinander entfernt, so beträgt ihre gegenseitige Abstoßung immer noch bloß  $\frac{1}{4}$  mg. Diese Daten beweisen zur Genüge, wie genau die Größe der Elektronenladung festgestellt ist. Gleichfalls genau bekannt ist ferner eine Größe, die man als Masse des Elektrons bezeichnet und an deren Stelle man das Gewicht des Elektrons setzen kann (über die Masse s. 4. Kap.). Es hat sich gezeigt, daß die Masse des Elektrons 1850 mal so klein ist als die Masse des leichtesten aller Atome, des Wasserstoffatoms. Wir haben bereits gesehen, wieviel Atome in 1 g Wasserstoff enthalten sind. Es läßt sich nun leicht berechnen, daß in 1 g Elektronen ungefähr  $10^{27}$ , d. h. tausend Quadrillionen dieser Elektronen vorhanden sind. Ein solches „Grammelektron“ stellt eine Ladung von fabelhafter Kraft dar. Befinden sich zwei Grammelektronen auf einer Entfernung von einer Million Kilometer voneinander, so ist ihre gegenseitige Abstoßungskraft gleich dem Gewicht von 25 Millionen Kilogramm. Würde sich das eine auf der Erde und das andere auf der Sonne befinden (Entfernung gleich 140 Millionen Kilometer), so wäre die Abstoßungskraft gleich dem Gewicht von 1200 kg. Befände sich sogar das eine Gramm auf der Sonne und das andere auf dem am weitesten entfernten aller uns bekannten Planeten, dem Neptun (4500 Millionen Kilometer von der Sonne), so würde die abstoßende Kraft immerhin das Gewicht eines Kilogramms übersteigen.

Auch die Größe des Elektrons ist heute mit ausreichender Genauigkeit ermittelt worden. Angenommen, das Elektron habe die Gestalt einer Kugel, so läßt es sich sagen, daß sein Durchmesser etwa 50000mal so klein ist als der Durchmesser eines Atoms. Man müßte 250 000 Millionen Elektronen aneinanderreihen, um einen Faden von 1 mm Länge zu erhalten. Verfährt man aber gleichermaßen mit den Elektronen, die das bereits erwähnte „Grammelektron“ bilden, so gewinnt man einen Faden, den man 14mal von der Erde bis zur Sonne und zurück, oder 28mal von der Erde bis zur Sonne, oder von der Sonne fast bis zum Planeten Uranus ziehen könnte. Die Länge dieses Fadens würde 4000 Millionen Kilometer betragen.

Die Wissenschaft hat bis jetzt keinerlei Erscheinungen entdeckt, die irgend einen Hinweis auf den „Aufbau des Elektrons“ enthalten hätten. Die Frage, ob das Elektron unter Einwirkung irgendwelcher Kräfte seine Gestalt verändern kann, ist viel umstritten worden. Einige Forscher halten das Elektron für einen absolut festen Körper, der also unter keiner Bedingung seine wahrscheinlich kugelförmige Gestalt ändern kann. Heutzutage jedoch neigen scheinbar die meisten Forscher der Lehre über das „sich deformierende“ Elektron zu, d. h. eines mit veränderlicher Form. So kann ein Elektron plattgedrückt werden wie ein Gummiball, welcher von zwei Seiten zusammengedrückt wird. Unter bestimmten Bedingungen kann das Elektron so platt werden, daß es fast die Gestalt einer runden Scheibe annimmt, die in der Mitte etwas dicker ist als an den Rändern.

Alles das bezieht sich auf die negative Elektrizität, die eben aus Elektronen besteht. Die moderne Wissenschaft nimmt auch die Existenz einer positiven Elektrizität an, deren Wirkungen denen der negativen entgegengesetzt sind. Es sind jedoch keinerlei Erscheinungen bekannt, die mit Sicherheit das Vorhandensein von freien positiven Teilchen voraussetzen lassen, während doch die Ströme der frei beweglichen negativen Elektronen in einer ganzen Reihe von physikalischen Erscheinungen zweifellos die Hauptrolle spielen. Hierher gehören z. B. der elektrische Strom, die Kathodenstrahlen, die  $\beta$ -Strahlen der radioaktiven Stoffe und andere Erscheinungen, die noch später betrachtet werden sollen. Es ist nicht bekannt, ob auch positive

Elektronen existieren und ob die positive Elektrizität überhaupt Atomstruktur besitzt. Nichtsdestoweniger spricht man von einem „Elementarquantum“ der positiven Elektrizität und versteht darunter eine solche Menge, deren Wirkung gleich der eines Elektrons ist, aber natürlich in entgegengesetzter Richtung ausgeübt wird. Hat man z. B. an einer Stelle zehn Elektronen und eine solche Ladung positiver Elektrizität angesammelt, die das Zehnfache eines Elementarquantums beträgt, so stellt das Ganze etwas „Neutrales“ dar, das also im umgebenden Raume keinerlei elektrische Kräfte offenbart. Daraus folgt aber nicht etwa, daß diese positive Ladung aus zehn selbständigen Teilen besteht, analog den zehn negativen Elektronen. Im Kapitel, das der modernen Lehre vom Atombau gewidmet ist, wird auf die Rolle, welche die Wissenschaft heute der positiven Elektrizität zuschreibt, näher eingegangen werden. Es wird sich dabei der große prinzipielle Unterschied zwischen den Grundeigenschaften der zwei Elektrizitätsarten offenbaren.

Es muß noch auf eine weitere Eigenschaft der Elektronen hingewiesen werden. Die Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel (S. 17) zeigt, daß die bewegten Elektronen im umgebenden Raume magnetische Kräfte hervorrufen. Man kann sagen, daß ruhende Elektronen im umgebenden Raume elektrische, bewegte aber außerdem noch magnetische Kräfte erzeugen. Auf diese Frage werden wir noch zurückkommen.

**§ 5. Schlußbetrachtung.** Es ist auf S. 46 gesagt worden, die Betrachtung der Atome, Moleküle und Elektronen würde das erste Beispiel dafür abgeben, wie tief die Strahlen der Wissenschaft in die Welt der verborgenen Erscheinungen gedrungen sind. Sie werfen ein Licht auf etwas, was für uns in ewiger Finsternis bliebe, wollten wir uns damit begnügen, was die Sinnesorgane uns offenbaren. Der Leser wird wohl zugeben, daß die vorhergehenden Betrachtungen solchen Worten recht geben. Wir haben die Welt der unbeschreiblich kleinen Atome kennengelernt, von denen 5000000 aneinandergereiht erst 1 mm ergeben. Wir kennen die Elektronen, die noch 50000mal so klein sind. Und wir sehen, daß die Wissenschaft nicht nur die Existenz der Atome,

Moleküle und Elektronen bewiesen und ihre Dimensionen festgestellt hat, sondern auch ihre Masse, d. h. ihre Anzahl in 1 g bestimmte, und für die Elektronen die Größe der zwischen ihnen wirkenden Kräfte berechnete. Das letzte Kapitel wird uns zeigen, daß die Wissenschaft noch viel tiefer in diese verborgene Welt gedrungen ist und das Geheimnis des Atomaufbaues gelüftet hat. Es ist klar, daß in dieser Hinsicht die Physik ihrer Aufgabe — den Wissensdurst der denkenden Menschheit zu stillen — in glänzender Weise gerecht geworden ist.

#### 4. Kapitel.

### Erhaltung der Masse und der Energie.

**§ 1. Einleitung.** Im vorhergehenden Kapitel haben wir das erste Beispiel für solche physikalische Entdeckungen kennengelernt, die sich der Annahme nach auf etwas wirklich Vorhandenes beziehen. Atome, Moleküle und Elektronen sind Körper besonderer Art, und wir können sie uns mehr oder weniger klar vorstellen, obwohl sie ihrer Winzigkeit wegen einer unmittelbaren Beobachtung nicht unterzogen werden können. Die Wissenschaft hat so viel verschiedene und unumstößliche Beweise für ihre Existenz erbracht, daß auch die geringsten Zweifel aufgegeben werden müssen. In der Folge werden wir noch auf andere Fälle stoßen, in denen die der Menschheit von der Physik geschenkten Kenntnisse sich mit wirklich vorhandenen bestimmten Körpern und ihren Eigenschaften oder mit verschiedenen Erscheinungen, die unter ganz bestimmten Bedingungen auftreten, befassen. Solche Kenntnisse sind entschieden von großem Interesse und für eine richtige Weltanschauung zuweilen von ausschlaggebender Bedeutung. Die Wissenschaft vermittelt uns aber auch Kenntnisse ganz anderer Art, deren Charakter viel abstrakter ist, da sie sich nicht etwa auf irgendwelche spezielle Eigenschaften des Stoffes oder auf bestimmte Erscheinungen beziehen, sondern die Gesamtheit aller physikalischen Erscheinungen, d. h. alle Vorgänge in dem der Beobachtung zugänglichen Teil des Weltalls umfassen. Es sind hier die Weltgesetze gemeint, denen

alle Erscheinungen unterworfen sind; die tiefsten und erstaunlichsten Wahrheiten, die unserem Streben nach Erkenntnis am meisten entsprechen. Die Wissenschaft hat drei solcher grundlegender Weltgesetze oder, wie man auch zu sagen pflegt, Prinzipie aufgedeckt, und zwar das Prinzip von der Erhaltung der Masse, das Prinzip von der Erhaltung der Energie und das Prinzip der Weltevolution. Die beiden letzteren, die auch unter dem Namen erster und zweiter Hauptsatz bekannt sind, gehören vollkommen der Physik an. Dieses Kapitel soll die beiden ersten Prinzipie behandeln. Dem dritten soll ein besonderes Kapitel gewidmet werden. Wir werden sehen, daß seine Entdeckung und Erklärung eine der größten Taten des menschlichen Genies darstellt, und daß die in ihm offenbarte Wahrheit mehr als jede andere imstande ist, unsere Kenntnisse zu erweitern, da sie alle Tiefen des Raumes und der Zeit umfaßt.

**§ 2. Das Gesetz oder Prinzip von der Erhaltung der Masse.** Jeder Körper besitzt eine bestimmte eigene Masse, die bei Ortsveränderung sich gleichbleibt. Einen streng wissenschaftlichen Begriff von der Masse kann man sich auf folgende Weise bilden. Die Mechanik lehrt das Grundgesetz des Beharrungsvermögens, nach dem ein Körper, vollständig sich selbst überlassen, d. h. von keinerlei äußeren Kräften beeinflusst, entweder in Ruhe verharrt, oder sich gleichmäßig, d. h. mit unveränderter Geschwindigkeit auf einer geraden Linie bewegt. Unter Einwirkung von äußeren Kräften kann der Körper vom Ruhezustand in Bewegungszustand übergehen oder die Geschwindigkeit seiner Bewegung ändern. Wirkt die gleiche Kraft nacheinander auf verschiedene Körper, so erweist es sich, daß zu einer gegebenen Zeit sich ihre Geschwindigkeit nicht in gleichem Maße ändert. Sollen aber die Geschwindigkeitsänderungen der verschiedenen Körper gleich sein, so müssen die wirkenden Kräfte der Größe nach verschieden sein. Je größer diese Kraft, desto größer ist die Masse des Körpers. Will man z. B. die Bewegungsgeschwindigkeiten zweier Körper im Laufe einer Minute in gleichem Maße vergrößern und muß dazu auf den ersten Körper eine bestimmte Kraft, auf den zweiten

aber eine zehnmal so große einwirken, so sagt man, daß die Masse des zweiten Körpers zehnmal so groß ist als die des ersten. Als Einheit wird die Masse eines Kubikzentimeters reinen Wassers bei 4<sup>o</sup> genommen: man nennt sie „Gramm“. Das Gewicht dieser Wassermenge heißt auch „Gramm“, und das ist bedauerlich, da es zu Mißverständnissen führen kann und man zuweilen gezwungen ist, bei genauen Bestimmungen Bezeichnungen wie „Gramm-Masse“ und „Gramm-Gewicht“ zu verwenden. Werden verschiedene Körper an einem und demselben Orte gewogen, so zeigt es sich, daß ihr Gewicht der Masse proportional ist. Ein Körper, dessen Masse z. B. 10 g oder 15 kg (Masseneinheiten) beträgt, besitzt auch ein Gewicht von 10 g bzw. 15 kg (Gewichtseinheiten). Dennoch besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Masse und Gewicht eines Körpers. Wie gesagt, besitzt jeder Körper seine eigene Masse, die weder vom Orte noch von anderen äußeren Umständen abhängig ist. Im Gegenteil, das Gewicht ist eher etwas Zufälliges, durch äußere Umstände Bedingtes. Die Erde zieht die Körper an, und infolgedessen üben sie auf andere, auf denen sie gerade liegen und die sie daran hindern der Erde näherzukommen, einen Druck aus, der eben das Gewicht des betreffenden Körpers bestimmt. Das Gewicht hängt aber in hohem Maße von dem Orte ab, an dem sich der Körper befindet. Auf der Erdoberfläche ist es von der geographischen Breite des Ortes abhängig. Je weiter vom Äquator, desto größer ist das Gewicht, was wieder mit der nicht vollkommen kugelförmigen Gestalt der Erde zusammenhängt. An einem gegebenen Orte hängt das Gewicht des Körpers von der Höhe seiner Lage über der Erdoberfläche ab. Man braucht bloß den Körper aus einem Stockwerk in ein höher gelegenes zu bringen, und schon ändert sich sein Gewicht um eine Größe, die sich durch genaue Messungen feststellen läßt. Auf der Spitze eines hohen Berges ist das Gewicht kleiner als nahe dem Meeresspiegel. Auf dem Monde ist es viel geringer als auf der Erde, auf dem Jupiter und besonders auf der Sonne dagegen viel bedeutender. Ein Körper im Weltraum kann sein Gewicht ganz oder fast ganz verlieren. Die Masse dagegen ist in allen Breiten und Höhen, überhaupt im ganzen Weltraume stets dieselbe. Man ist übereingekommen festzusetzen, daß eine Gramm-

Masse Gramm-Gewicht besitzt, wenn sie sich auf dem Niveau der Ozeanoberfläche am 45. Grad nördlicher Breite befindet. Es sei bemerkt, daß die sogenannten „Gewichte“ (Gewichtssätze), die man beim Wägen benutzt, die Masse der verschiedenen Körper, nicht aber ihr Gewicht messen. Bei Federwagen liegen die Verhältnisse allerdings anders.

Das Prinzip von der Erhaltung der Masse besagt, daß die Gesamtmasse einer beliebigen Anzahl von Körpern sich nicht ändert, gleichviel, ob physikalische oder chemische Erscheinungen zwischen ihnen auftreten. Vorausgesetzt wird natürlich, daß die Körper dabei weder an andere Körper Stoff abgeben noch von ihnen empfangen. Mit anderen Worten: es wird keine Materie geschaffen und keine Materie verschwindet, sondern erhält sich beständig. Bei allen Erscheinungen hat man es mit einer Veränderung in der Verteilung der Atome, deren Gruppierung unbeständig ist, zu tun. Die bereits erwähnten, sorgfältig ausgeführten Forschungen von Landolt haben bestätigt, daß bei chemischen Reaktionen die Masse der Körper sich nicht ändert.

**§ 3. Arbeit und Energie.** Vor allem muß man den Begriff der Arbeit, wie er in der Mechanik gebraucht wird, kennenlernen. Die Definition ist ziemlich einfach. Arbeit wird geleistet, wenn irgend ein Widerstand überwunden wird. Wir wollen einige Beispiele für solche Erscheinungen oder, wie man noch zu sagen pflegt, Prozesse anführen, bei denen irgendwelche Kräfte Arbeit leisten. Das einfachste Beispiel ist das Heben einer Last. Je schwerer die Last und je höher sie gehoben werden muß, desto größer ist die dabei zu leistende Arbeit. Nach diesem Beispiel ist auch die Einheit der Arbeit, das Meterkilogramm, festgesetzt worden. Es ist das die Arbeit, welche geleistet werden muß, um ein Kilogramm einen Meter hoch zu heben. Um also 10 kg auf eine Höhe von 6 m zu bringen, muß man eine Arbeit von 60 mkg aufwenden. Arbeit wird geleistet, wenn ein Körper sich bewegt und dabei den Widerstand der Luft oder des Wassers überwindet oder den Reibungswiderstand in den Radachsen, oder wenn ein Körper auf der Oberfläche eines

anderen gleitet oder rollt. Beim Verbiegen, Zusammenpressen, Dehnen oder Verdrehen eines Stabes oder einer Feder überwindet die Arbeit innere Kräfte, die zwischen den einzelnen Teilchen des festen Stoffes wirken und sich einer Veränderung in der Lage der Teilchen widersetzen. Besonders groß kann die Arbeit beim Zerreißen oder Brechen eines Körpers werden. Beim Schmelzen eines festen Körpers und besonders bei Verdampfung von Flüssigkeiten wird auch eine Arbeit zur Überwindung von inneren Kräften geleistet. Diese Kräfte widersetzen sich der Trennung der Teilchen, die ja beim Schmelzen und Verdampfen vollzogen wird. Bei einer chemischen Zerlegung eines Stoffes muß meistens (jedoch nicht immer) Arbeit aufgewandt werden, um die Atome voneinander zu trennen, die das Molekül des zusammengesetzten Körpers bilden und durch Kräfte der sogenannten chemischen Verwandtschaft aneinander gekettet sind. Die Wissenschaft liefert ganz genaue Angaben über die Größe dieser inneren Arbeit. Um 1 g Wasser zu zerlegen, d. h. in allen Molekülen die Sauerstoffatome von den Wasserstoffatomen zu trennen, muß man eine Arbeit von 1600 mkg leisten, eine Arbeit also, wie sie beim Heben von 16 kg auf eine Höhe von 100 m aufgewandt wird. Um alle Moleküle von 1 g kohlen-sauren Gases zu zerstören, d. h. in jedem einzelnen ein Kohlenstoffatom von den beiden Sauerstoffatomen zu trennen, muß man eine Arbeit von 935 mkg leisten. Die Wissenschaft geht noch weiter. Es zeigt sich, daß eine Arbeit von 655 mkg benötigt wird, um zuerst allen Molekülen ein Sauerstoffatom zu entziehen, während die Lostrennung des zweiten nur 280 mkg beansprucht. Die Zerlegung von 1 g Kochsalz in Natrium und Chlor bedarf eines Arbeitsaufwandes von 710 mkg.

Vergrößert sich die Bewegungsgeschwindigkeit eines Körpers unter Einwirkung irgendwelcher Kräfte, so wird von diesen eine Arbeit geleistet, denn es wird der „Beharrungswiderstand“ überwunden, d. h. das Bestreben des Körpers, seine Geschwindigkeit beizubehalten. Arbeit wird geleistet, wenn zwei Körper voneinander entfernt werden, die sich gegenseitig anziehen, z. B. zwei ungleichnamige Magnetpole (Süd- und Nordpol), oder zwei ungleichnamig (positiv und negativ) elektrisierte Körper, oder wenn zwei Körper einander genähert werden, die

sich gegenseitig abstoßen, wie z. B. zwei gleichnamige Magnetpole oder zwei gleichnamig elektrisierte Körper. Es sei bemerkt, daß das Heben einer Last nur einen Spezialfall der Trennung zweier sich gegenseitig anziehender Körper darstellt (Erdball und Last).

Wir gehen nun zur Betrachtung der Energie über. Die Gesamtheit zweier oder einer größeren Anzahl von Körpern werden wir als ein System von Körpern bezeichnen. Schon die oberflächlichste Beobachtung lehrt uns, daß die uns umgebenden Körper oder Systeme von Körpern in vielen und dabei ganz verschiedenen Fällen das Vermögen besitzen, Arbeit zu leisten. In der Tat werden die Körper oder die Systeme Arbeit leisten, wenn eine Möglichkeit oder Notwendigkeit vorhanden ist, irgendwelchen Widerstand zu überwinden. Es ist einleuchtend, daß das Vermögen Arbeit zu leisten und die tatsächliche Arbeitsleistung bei weitem nicht identisch sind. Der Körper oder das System können ihre Arbeitsfähigkeit, ohne daß irgend eine Arbeit geleistet wird, unbegrenzt lange erhalten. Das Vermögen Arbeit zu leisten nennt man Energie. Wird also von einem Körper oder einem System gesagt, daß sie Energie besitzen, so heißt das mit anderen Worten, daß sie imstande sind, Arbeit zu leisten.

Wird von einem Körper oder System tatsächlich Arbeit geleistet, so wird ihre Energie, d. h. ihre Arbeitsfähigkeit, kleiner und kann sich gänzlich erschöpfen. Dieser Umstand gibt uns das Recht, von einem Energievorrat zu sprechen, den der Körper (oder System) besitzt und der unverändert bleibt, wenn keine Arbeit geleistet wird, dagegen bei Arbeitsleistung allmählich verbraucht wird und schließlich gänzlich verschwinden kann. Den Beweis dafür soll die Betrachtung der verschiedenen Energiearten erbringen. Die Größe des Energievorrats wird durch die ganze Arbeit bestimmt, die auf seine Kosten verrichtet werden kann.

Die Beobachtung lehrt, daß die Energie, d. h. das Arbeitsvermögen, sich in ganz verschiedenen Formen offenbaren kann, und es ist gut möglich, daß noch nicht alle existierenden Energiearten entdeckt sind. Weiterhin zeigt es sich, daß alle Energiearten in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Zur ersteren gehören alle Formen der kinetischen Energie, zur zweiten die

der potentiellen. Wir wollen nun jede Gruppe für sich betrachten.

I. Die kinetische Energie oder, wie man noch zu sagen pflegt, Bewegungsenergie. Bei allen Arten der kinetischen Energie hat man es mit etwas zu tun, das sich in Bewegung befindet. Diese Bewegung ist eine Bedingung für das Vorhandensein von Energie, d. h. für die Fähigkeit, Arbeit zu leisten und irgendwelche Widerstände zu überwinden. Hierher gehören folgende Energiearten:

1. Die Energie des bewegten Körpers. Es ist ohne weiteres klar, daß jeder bewegte Körper dank seiner Bewegung die ihm begegnenden Widerstände überwinden kann und folglich über einen Energievorrat verfügt. Eine Kanonenkugel durchschlägt den Schiffspanzer, aber auch ein leichter, langsam bewegter Körper kann eine, wenn auch noch so kleine Arbeit leisten, z. B. ein Spinnweben zerreißen. Fließendes Wasser, Wind, rotierende Schwung- und Mühlenräder, fahrende Züge sind weitere Beispiele. Leistet ein bewegter Körper Arbeit, so nimmt seine Geschwindigkeit und folglich auch sein Energievorrat unbedingt ab. Kommt der Körper zum Stillstand, so ist der ganze Energievorrat verbraucht. Es kann bewiesen werden, daß der Energievorrat eines bewegten Körpers der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist. Bei gleicher Geschwindigkeit besitzt eine verdoppelte Masse doppelte Energie, und bei einer gegebenen Masse nimmt die Energie um das 4-, 9- oder 100fache zu, wenn die Geschwindigkeit verdoppelt, verdreifacht oder verzehnfacht wird.

2. Wärmeenergie. Im nächsten Kapitel werden wir die moderne Anschauung über das Wesen der Wärme näher betrachten. Hier muß man sich mit dem Hinweis begnügen, daß die in einem gegebenen Körper enthaltene Wärme kinetische Energie der Bewegung von Atomen, Molekülen und vielleicht auch freien Elektronen darstellt, die den Bestand des Körpers ausmachen. Je rascher diese Bewegungen ausgeführt werden, desto höher ist die Temperatur des Körpers. Daß die Wärme tatsächlich eine Energie darstellt, ersieht man z. B. daraus, daß alle Dampfmaschinen ihre kolossale Arbeit auf Kosten der Wärme leisten, die von der Heizung dem Dampf im

Kessel übermittelt wird. Wenn Arbeit geleistet wird, nimmt der Wärmeenergievorrat ab, d. h. ein Teil der Wärme verschwindet: sie ist in Arbeit verwandelt worden. Genaue Versuche haben ergeben, daß der heiße Dampf, der den Kolben im Zylinder einer Dampfmaschine bewegt, sich abkühlt.

Versuche (1842) des englischen Forschers Joule (1818 bis 1889) und vieler anderer haben gezeigt, welche Menge an Wärmeenergie zur Verrichtung einer bestimmten Arbeit benötigt wird. Die Wärmemenge, die verbraucht werden muß, um ein Gramm Wasser um einen Grad zu erwärmen, nennt man kleine Kalorie. Um aber ein Kilogramm Wasser um einen Grad zu erwärmen, benötigt man offenbar 1000mal soviel: diese Wärmemenge wird als große Kalorie bezeichnet. Es hat sich erwiesen, daß eine große Kalorie einer Arbeit von 426 mkg entspricht. Das will sagen, daß die Wärmemenge, die 1 kg Wasser um 1° erwärmt, imstande wäre, dasselbe Wasser auf eine Höhe von 426 m zu heben. Man sagt, 426 mkg seien äquivalent einer großen Kalorie und nennt die Zahl 426 mkg das mechanische Wärmeäquivalent.

3. Strahlungsenergie. Ihr wird das ganze sechste Kapitel gewidmet sein. Hier sei nur bemerkt, daß zu den verschiedenen Arten der Strahlungsenergie z. B. das sichtbare Licht, die Röntgenstrahlen und die von Hertz entdeckten elektrischen Strahlen, die in der drahtlosen Telegraphie Verwendung finden, gehören. Außerdem gibt es noch zwei Arten der Strahlungsenergie, die infraroten und die ultravioletten Strahlen, die wir später kennenlernen werden.

4. Die Energie des elektrischen Stromes. Daß der elektrische Strom Arbeit leisten kann, beweisen die elektrische Straßenbahn und andere Erfindungen, die von Elektromotoren bewegt werden. Daraus folgt, daß der elektrische Strom Energie besitzt, die auf der Bewegung von Elektronen innerhalb des Leiters (Drahtes) beruht. Leistet der Strom Arbeit, so nimmt seine Stärke ab: ein Teil verschwindet, wird in Arbeit verwandelt.

II. Die potentielle Energie, die auch latente Energie oder Energie der Lage genannt wird. Bei allen Arten der potentiellen Energie hat man es mit der Gesamtheit zweier Körper zu tun, die sich gegenseitig anziehen, d. h. sich

einander zu nähern bestrebt sind oder sich abstoßen, d. h. sich voneinander zu entfernen suchen. Anstatt mit zwei Körpern im gewöhnlichen Sinne kann man hier auch mit zwei Molekülen, Atomen oder Elektronen zu tun haben. Indem die zwei Körper sich anziehen oder abstoßen, geraten sie in Bewegung und können dadurch offenbar Arbeit leisten, sei es auch nur durch Ziehen eines Seiles, das, um eine Welle gewickelt, diese in Rotation versetzt und beliebige Maschinen, Hebezeuge usw. antreibt. Man ersieht daraus, daß zwei solche Körper, trotzdem sie sich auf ihren Plätzen in Ruhe befinden, dennoch fähig sind, Arbeit zu leisten, d. h. Energie besitzen, die man eben als potentielle oder latente Energie bezeichnet. Man nennt sie latent zum Unterschied von der kinetischen Energie, bei welcher die Bewegung das Arbeitsvermögen direkt sichtbar macht. Dort gehörte die Energie einem Körper, einem Molekül, Atom oder Elektron an. Hier dagegen sind es zwei Körper. Dort hing die Größe des Energievorrats außer von der Masse des Körpers auch in erster Linie von seiner Geschwindigkeit ab. Hier dagegen ist die Größe der Energie mit der Lage der Körper, z. B. mit der Entfernung zwischen ihnen, verknüpft. Wenn die Körper sich anziehen, so ist offenbar der Vorrat an potentieller Energie um so bedeutender, je weiter sie sich voneinander befinden, d. h. je länger der Weg, auf welchem die gegenseitige Anziehungskraft Widerstände zu überwinden und folglich Arbeit zu leisten vermag. Nähern sich die Körper so weit, daß sie sich berühren, so wird die potentielle Energie gleich Null. Das Maximum an Arbeitsvermögen besitzen die Körper in dem Falle, daß sie so weit voneinander entfernt sind, daß ihre gegenseitige Wirkung aufhört bemerkbar zu sein. Stoßen sich zwei Körper ab, so ist der Vorrat an potentieller Energie um so bedeutender, je näher sie sich sind, d. h. je länger der Weg, auf welchem die abstoßende Kraft Arbeit verrichten kann. Die Energie solcher Körper ist am größten, wenn sie sich berühren und wird gleich Null, wenn sie so weit voneinander entfernt sind, daß die gegenseitige Wirkung nicht mehr zu merken ist.

Auch hier bestätigt es sich in allen Fällen, daß jede Arbeitsleistung mit der Abnahme des Energievorrats untrennbar verknüpft ist. In der Tat können die sich anziehenden Körper Arbeit verrichten nur, indem sie sich einander nähern, und die sich ab-

stoßenden nur, indem sie sich voneinander entfernen. In beiden Fällen nimmt, wie wir sehen, der Energievorrat ab und kann gänzlich erschöpft werden, wenn im ersten Falle die Körper sich berühren und im zweiten zu weit voneinander entfernt sind. Daher ist die Bezeichnung „Energie der Lage“ mit Recht gewählt worden. Wir gehen nun zur Betrachtung der verschiedenen Arten der potentiellen Energie über und wollen dabei die begonnene Numerierung überhaupt aller Energiearten fortsetzen.

5. Die potentielle Energie von Körpern, die von der allgemeinen Gravitationskraft angezogen werden. Newton (1643 bis 1727) hat gezeigt, daß alle Körper sich gegenseitig anziehen. Die Anziehungskraft ist direkt proportional dem Produkt der beiden sich anziehenden Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung zwischen ihnen. Das bedeutet folgendes: wenn man, ohne die Entfernung zwischen den Körpern zu ändern, die Masse des einen verdreifacht und die des anderen verfünffacht, so steigt die Anziehungskraft auf das 15fache. Vergrößert man andererseits, ohne die Masse der beiden Körper zu ändern, die Entfernung zwischen ihnen um das 2,5- oder 10fache, so wird die Anziehungskraft 6,25- bzw. 100mal so klein als sie war. Die Sonne zieht die Erde und alle Planeten und Kometen an. Die Planeten ihrerseits ziehen ihre Trabanten an, darunter die Erde den Mond. Die Erde zieht alle Körper an, die sich auf ihrer Oberfläche befinden. Diese Körper ziehen sich auch gegenseitig an, jedoch ist diese Anziehungskraft so gering, daß es nur mit Hilfe von komplizierten und äußerst „empfindlichen“ Apparaten gelungen ist, sie nachzuweisen. In einigen Sonderfällen konnte sogar ihre Größe festgestellt werden. So hat z. B. Cornu (1841 bis 1902) die Anziehungskraft zwischen Quecksilber in Gestalt einer Kugel von 24 cm im Durchmesser und einer kleinen, 109 g schweren Kupferkugel gemessen.

Es ist klar, daß die Sonne und ein Planet, z. B. die Erde, zusammengenommen einen ungeheuren Vorrat an potentieller Energie besitzen. Die Erde und irgend ein in die Höhe gehobener Körper verfügen zusammen gleichfalls über einen Vorrat an potentieller Energie, und zwar ist dieser um so größer, je größer die Masse des Körpers und je höher er sich über der Erdoberfläche befindet. Man spricht oft von der potentiellen Energie

einer hochgehobenen Last. Das ist nicht ganz genau, denn die Energie besitzt die Last nicht als solche, sondern nur in Gemeinschaft mit der Erde. Eine hochgehobene Last kann Arbeit leisten nur, indem sie sich nach unten bewegt, wobei ihr Energievorrat offenbar abnimmt. Er wird gleich Null, wenn die Last sich wieder auf der Erdoberfläche befindet. Uhrgewichte sind ein gutes Beispiel dafür. Die potentielle Energie zweier Körper, deren Dimensionen nicht sehr groß sind, ist äußerst klein. Ein Beispiel soll das illustrieren.

Man denke sich zwei Kugeln aus einem Material, das zehnmal so schwer ist als Wasser (Kupfer ist 9-, Blei 11,4mal so schwer als Wasser). Der Halbmesser der Kugeln sei mit 2 m angenommen. Das Maximum der potentiellen Energie, die die Kugeln auf sehr weiter Entfernung voneinander besitzen, beträgt bloß etwa  $\frac{1}{3}$  mkg, und das ist die ganze Arbeit, die sie leisten können, indem sie sich von einer großen Entfernung einander nähern und sich schließlich berühren. Dabei wiegt aber jede Kugel etwa 330 000 kg. Das liegt an der Kleinheit der Anziehungskraft: wenn die beiden Kugeln sich berühren, so daß ihre Mittelpunkte 4 m voneinander entfernt sind und ihre gegenseitige Anziehungskraft am größten ist, so entspricht sie nur einem Gewicht von 50 g. Hat man die Entfernung zwischen den Mittelpunkten auf 40 m vergrößert, so ziehen sich die Kugeln mit einer Kraft gleich  $\frac{1}{2}$  g an, trotzdem sie doch riesige Dimensionen besitzen.

6. Die Energie der Lage gleichartiger Teilchen. Zwischen den Teilchen eines festen oder eines flüssigen Körpers wirken besonderer Art Kräfte, die man als Molekularkräfte bezeichnet. Diese Kräfte zwingen die Teilchen, eine bestimmte Entfernung untereinander einzuhalten und widersetzen sich einer Annäherung oder Entfernung. Im ersten Falle sind die Teilchen bestrebt, sich unter Einwirkung dieser Kräfte voneinander zu entfernen, als würden sie sich gegenseitig abstoßen, im zweiten dagegen versuchen sie sich einander zu nähern, als zögen sie sich gegenseitig an. Es folgt daraus, daß jede Veränderung in der Lage der Teilchen, bei der die Entfernung zwischen ihnen anders wird, einen Vorrat an potentieller Energie entstehen läßt, der zur Wiederherstellung des Normalzustandes aufgebraucht wird. Es sind hier verschiedene Fälle möglich, von denen wir drei betrachten wollen:

a) Die potentielle Energie eines elastisch veränderten (deformierten) festen Körpers (Feder). Wenn man einen festen Körper, z. B. eine Feder, je nach der Form zusammendrückt, auseinanderzieht, biegt oder verdreht (spiralförmige Uhrfedern), so erlangt er die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Es bildet sich in ihm als Ergebnis der Deformierung, d. h. der Veränderung in der Lage der Teilchen, ein Vorrat an offenbar potentieller Energie. Die Feder kann Arbeit leisten, nur wenn sie sich wieder ausdehnt oder sich verkürzt oder losdreht, wobei der Vorrat an Energie abnimmt. Er wird gleich Null, wenn die Feder wieder ihre normale Form gewonnen hat.

b) Die potentielle Energie der Flüssigkeiten, die beim Schmelzen eines festen Körpers entsteht. Wird ein Körper geschmolzen und geht in flüssigen Zustand über, so entsteht offenbar eine Veränderung in der Lage der Teilchen oder, wie man zu sagen pflegt, eine Veränderung der Struktur des Stoffes. Die Molekularkräfte nehmen dabei ab. Wird im Gegenteil der Körper in festen Zustand übergeführt, so werden diese Kräfte wieder hergestellt, und unter ihrer Einwirkung nehmen die Teilchen eine Lage an, die dem festen Zustande des Stoffes entspricht. Bei diesem Übergang wird eine gewisse Arbeit geleistet, deren Ergebnis im nächsten Kapitel behandelt werden soll. Es ist klar, daß die Teilchen der Flüssigkeit über einen Vorrat an potentieller Energie verfügen, den derselbe Stoff in festem Zustande nicht besitzt.

c) Die potentielle Energie des Dampfes oder Gases, die beim Verdampfen einer Flüssigkeit entsteht. Man wird sehen, daß alle Gase ohne Ausnahme in flüssigen Zustand übergeführt werden können. Es folgt daraus, daß man die Gase als Dämpfe der entsprechenden Flüssigkeiten betrachten darf. In Gasen sind die einzelnen Teilchen sehr weit voneinander entfernt, und die zwischen ihnen wirkenden Molekularkräfte sind sehr gering, ja in vielen Fällen fast gleich Null. Wenn sich das Gas dem flüssigen Zustande nähert und seine Dichte zunimmt, d. h. die einzelnen Teilchen sich immer näher kommen, beginnen die Molekularkräfte zu wachsen, und unter ihrer Einwirkung nehmen die Teilchen die dem flüssigen Zustande des Stoffes entsprechende Lage an. Auch in diesem Falle wird von den inneren Kräften

eine Arbeit geleistet, was beweist, daß Gas oder Dampf einen Vorrat an potentieller Energie besitzen, über den derselbe Stoff in flüssigem Zustande nicht mehr verfügt. Da ein Gas zuerst in flüssigen und dann in festen Zustand übergehen kann, so muß es beide Arten der potentiellen Energie, die wir eben betrachteten, besitzen.

Wie man aus folgendem Beispiel ersieht, sind diese Energievorräte sehr bedeutend. Es möge 1 kg Eis zuerst in 1 kg Wasser bei 0° und dann in 1 kg Wasserdampf gleichfalls bei 0° übergeführt werden. Es zeigt sich, daß beim Übergang vom festen in flüssigen Zustand dieses Kilogramm Stoff eine potentielle Energie aufspeichert, die imstande wäre, 34 000 mkg Arbeit zu leisten. Noch merkwürdiger ist es aber, daß beim Übergang vom flüssigen in gasförmigen Zustand dasselbe Kilogramm einen gewaltigen Energievorrat gewinnt, der einer Arbeit von 258 000 mkg entspricht. Im ganzen besitzt also 1 kg Wasserdampf bei 0° das Vermögen, 292 000 mkg Arbeit zu verrichten, wenn es zuerst in flüssigen und dann in festen Zustand übergeht, ohne daß die Temperatur geändert wird. Es ist hier die Rede nur von der potentiellen Energie der Lage der Teilchen, und darf sie nicht mit der kinetischen Wärmeenergie des erhitzten Dampfes, der die Arbeitsquelle der Dampfmaschinen bildet, verwechselt werden.

7. Die Lagenenergie der ungleichartigen Teilchen. Chemische Energie. Die Atome der einfachen Körper können untereinander Verbindungen eingehen und so Moleküle zusammengesetzter Körper bilden. Die Moleküle zweier verschiedener Körper können sich gleichfalls verbinden und auf diese Weise kompliziertere Moleküle bilden. Zwei Atomgruppen, zwei verschiedenen Molekülen entzogen, können sich gleichfalls vereinigen. In den meisten Fällen (jedoch nicht immer) sind es die Kräfte der chemischen Verwandtschaft, die die Atome oder die Atomgruppen zwingen, sich zu verbinden, wobei zuweilen eine sehr bedeutende Arbeit geleistet wird. Es folgt daraus, daß die Atome, welche imstande sind untereinander chemische Verbindungen einzugehen, über einen Energievorrat verfügen, der im Augenblick der stattfindenden Verbindung als Arbeitsquelle dienen kann. Es ist das die sogenannte chemische Energie, die offenbar eine potentielle ist, da sie von der Lage der ungleichartigen Atome ab-

hängt. Sie ist vorhanden, solange die Stoffe, die sich chemisch verbinden können, noch getrennt sind. Haben sich die Atome verbunden und Moleküle einer chemischen Verbindung gebildet, so ist die Energie verbraucht. Wir wollen zwei Beispiele anführen.

Nehmen wir an, daß wir zwei Gefäße haben, von denen das eine 2 Gramm Wasserstoff und das andere 16 Gramm Sauerstoff enthält. Diese beiden Gase besitzen einen Vorrat an potentieller chemischer Energie, der einer Arbeit von 29 000 Meterkilogrammen entspricht. Die Arbeit wird geleistet, wenn die Wasserstoff- und Sauerstoffatome ihre Lage ändern und Wasserdampfmoleküle bilden. Jedes Molekül enthält ein Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatome.

Jetzt möge das eine Gefäß 12 g Kohle enthalten und das andere 32 g Sauerstoff. Beide Gefäße zusammengenommen bergen einen Vorrat an potentieller chemischer Energie, der 41 000 mkg Arbeit leisten kann, wenn die Kohle sich mit dem Sauerstoff verbindet (d. h. verbrennt), wobei ein Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatome ein Molekül kohlen-sauren Gases bilden. Die potentielle chemische Energie der Kohle und des Sauerstoffs wird als Triebkraft für Dampf-motore ausgenutzt.

8. Elektrostatische Energie. Gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Elektrisierte Körper besitzen mithin potentielle Energie, die als elektrostatische bezeichnet wird. Die Entladung einer Leidener Flasche kann ein dickes Glas durchschlagen. Es ist allgemein bekannt, welche gewaltige Arbeitsvermögen eine Ladung Luftelektrizität besitzt. Dies Vermögen offenbart sich in der Entladung, d. h. im Blitz, dessen rein mechanische Wirkung zu beobachten man oft Gelegenheit hat.

9. Magnetische Energie. Gleichnamige Pole zweier Magnete stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Es besitzt daher die Gesamtheit zweier Magnete eine besondere Art potentieller Energie, die man magnetische nennt.

Damit ist die Betrachtung der verschiedenen Energiearten, sowohl der kinetischen als auch der potentiellen, beendet. Alle Arten können zu Arbeitsleistungen verwandt werden, wobei der der Leistung entsprechende Teil der Energie verschwindet. Die aufgebrauchte Energie und die entsprechende Arbeit werden als einander

äquivalent bezeichnet. Das bezieht sich auf sämtliche Energiearten und nicht etwa nur auf die Wärmeenergie, für welche diese Bezeichnung bereits eingeführt worden ist (s. S. 69). Zwei Energievorräte verschiedener Art können ebenfalls äquivalent oder einfach gleich sein, wenn sie gleiche Arbeit, z. B. eine gleiche Anzahl Meterkilogramme verrichten können. Die von uns betrachteten neun Energiearten lassen 36 Kombinationen zu je zwei zu, und bei jeder Kombination kann von äquivalenten oder gleichen Energievorräten beider Arten die Rede sein. So können z. B. zwei Energievorräte äquivalent sein, die aus kinetischer Energie eines bewegten und der Energie eines elastisch-veränderten Körpers bestehen. Weiterhin kann die eine Wärmeenergie sein, die andere die des elektrischen Stromes oder Strahlungsenergie und chemische Energie usw. Im ganzen, wie gesagt, gibt es 36 Kombinationen. Man kann sich auch anders ausdrücken: um mit Hilfe einer jeden der neun Energiearten gleiche Arbeit leisten zu können, muß man von allen vorhandenen Vorräten äquivalente Energiemengen aufwenden.

#### § 4. Das Gesetz oder Prinzip von der Erhaltung der Energie.

Wir haben gesehen, daß jede Arbeitsleistung auf Kosten der Energievorräte irgend einer der neun Arten ausgeführt wird, wobei eine der Arbeit äquivalente Energiemenge verbraucht wird, d. h. verschwindet. Diese Ausführungen sind das Ergebnis der sorgfältigen Beobachtung der uns umgebenden Erscheinungen. Nicht minder interessant und wichtig ist aber noch ein anderes Resultat derselben Beobachtung. Es hat sich gezeigt, daß im Ergebnis einer jeden geleisteten Arbeit ein ihr äquivalenter Energievorrat irgend einer Art entsteht. Um dieses Fundamentalgesetz nachzuweisen, braucht man nur die am Anfang des § 3 betrachteten Fälle von Arbeitsleistung nochmals durchzugehen. Diese Fälle zeigen, welcher Art Energie jedesmal entsteht. Beim Heben einer Last erhält man im Resultat die potentielle Energie der gehobenen Last. Bewegt sich ein Körper, indem er den Widerstand des Mediums überwindet, so gewinnt man die Bewegungsenergie dieses Mediums. Wird Reibung überwunden, so entsteht Wärme. Die beim Zusammendrücken, Dehnen, Verbiegen und Verdrehen eines festen Körpers geleistete Arbeit ergibt

die potentielle Energie des elastisch-deformierten Körpers (z. B. einer Feder). Die beim Schmelzen oder Verdampfen aufgewandte Arbeit liefert im Resultat die potentielle Energie der Flüssigkeit oder des Dampfes, die S. 66 erwähnt wurde. Der Arbeitsverbrauch bei der chemischen Zerlegung eines zusammengesetzten Stoffes ergibt die chemische Energie der dabei entstandenen einfacheren Stoffe. Wird Arbeit geleistet, um das Beharrungsvermögen eines Körpers zu überwinden, z. B. seine Geschwindigkeit zu vergrößern, so wird der Vorrat an kinetischer Bewegungsenergie dieses Körpers vermehrt. Sollen zwei Körper, die sich gegenseitig anziehen, voneinander entfernt, oder zwei, die sich abstoßen, einander genähert werden, so wird in beiden Fällen der Vorrat an potentieller Energie dieser Körper vergrößert. Man leistet Arbeit, um Körper zu elektrisieren oder zu magnetisieren, gewinnt aber Vorräte an elektrostatischer oder an magnetischer Energie. Und jedesmal zeigt es sich, daß der neu entstandene Energievorrat der aufgewandten Arbeit vollkommen äquivalent ist.

Fügt man dieses Resultat an das im vorhergehenden Paragraphen gefundene, so erhält man folgendes Bild: die Arbeitsleistung vollzieht sich ausschließlich auf Kosten einer äquivalenten Energiemenge irgendwelcher Art, die dabei verschwindet; als Ergebnis der Arbeit erhält man wieder eine ihr äquivalente Energiemenge, allgemein gesprochen, irgend einer anderen Art. Da nun die verschwundene und die neu entstandene Energie einer und derselben Arbeit äquivalent sind, so müssen sie natürlich auch einander äquivalent, mit anderen Worten, quantitativ gleich sein. Man sieht, daß an Stelle einer verschwundenen Energiemenge unbedingt eine ihr gleiche Menge derselben oder irgend einer anderen Art erscheint. Dieser Umstand läßt die Arbeit als ein Bindeglied erscheinen, das sich oft sogar einer oberflächlichen Beobachtung entzieht, und rückt als wesentlichste Tatsache das Verschwinden einer Energie und das Auftreten einer anderen in gleicher Menge in den Vordergrund. Wir haben ein Recht, vom Übergang oder Verwandlung einer Energieart in eine andere zu sprechen, wobei die Energiemenge unverändert bleibt. Betrachten wir die verschiedenartigsten Erscheinungen

um uns her, so kommen wir zum Schluß, daß sie im Grunde genommen alle auf ununterbrochene verschiedenartige Verwandlungen einer Energieart in eine andere, dieser in eine dritte, vierte usw. hinauslaufen. Bei allen diesen Umwandlungen wird keine Energie neu geschaffen und keine geht spurlos verloren. Wie die Materie ist auch die Energie ewig und unzerstörbar: ihre volle Quantität bleibt unverändert. Darin besteht eben das Gesetz oder das Prinzip von der Erhaltung der Energie: weder verschwindet Energie noch wird sie neu geschaffen. Es kann aber die Energie einer Art sich in eine äquivalente Menge einer anderen wandeln. Wir wollen unter einem geschlossenen System die Gesamtheit solcher Körper verstehen, die weder an andere Körper Energie abgeben noch von ihnen welche empfangen. Dann läßt sich das Prinzip von der Erhaltung der Energie anders ausdrücken: die Energie eines geschlossenen Systems erhält sich unverändert, welcher Art Prozesse im Innern des Systems auch vorkommen mögen. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie unterscheidet sich seinem Charakter nach wesentlich von dem in § 2 betrachteten Gesetz von der Erhaltung der Masse. Dieses letztere lehrt uns, daß die kleinsten Bestandteilchen der Materie unzerstörbar sind und bei jeglichen physikalischen und chemischen Erscheinungen lediglich sich im Raume umgruppieren und ihre Lage ändern. Anders ist es mit der Energie. Hier beobachtet man ununterbrochen ein Verschwinden und Entstehen von Energie, es vollzieht sich aber stets gleichzeitig, so daß das Verschwinden einer Energieart stets das Entstehen von Energie derselben oder einer anderen Art im Gefolge hat. Die Erhaltung der Masse bezieht sich auf jede einzelne Art Materie, die Erhaltung der Energie nur auf einen allgemeineren Begriff, d. h. auf die Gesamtheit aller in einem geschlossenen System vorhandenen Energiearten. Die Analogie der beiden Gesetze wäre vollkommen, wenn z. B. alle Arten der Materie, d. h. die Elemente, sich ununterbrochen ineinander wandeln könnten, wobei die Masse konstant bliebe, oder umgekehrt, wenn jede einzelne Energieart unzerstörbar wäre.

Wie bereits gesagt worden ist, lassen sich alle Erscheinungen der uns umgebenden Welt, die stets Anzeichen irgend einer fort-

schreitenden Veränderung aufweisen, auf Umwandlungen einer Energieart, die dem einen Körpersystem (oder einem Körper) eigen ist, in eine andere, dem zweiten System entsprechende, zurückführen. Das erste System leistet Arbeit und verbraucht seine Energie. Das zweite speichert Energie auf und ist somit ein Objekt, an dem die Außenwelt unter Überwindung des von ihm ausgehenden Widerstandes die Arbeit verrichtet. Man ist übereingekommen, zu sagen, daß in diesem Falle das zweite System negative Arbeit leistet.

Man sieht, daß das Prinzip von der Erhaltung der Energie alle physikalischen Erscheinungen beherrscht und ihnen einen besonderen Stempel strenger Gesetzmäßigkeit aufdrückt: die entstehende Energie muß der aufgebrauchten vollkommen äquivalent sein. Dieses Weltprinzip lehrt also, daß die Welt, d. h. der unserer Beobachtung zugängliche Teil derselben, kein Chaos darstellt, sondern von ganz bestimmter Ordnung und strengster Gesetzmäßigkeit beherrscht wird.

Die Erkenntnis dieser großen Wahrheit verdanken wir der Physik, die es verstanden hat, sie in eine einfache und leicht verständliche Form zu kleiden.

Aus dem Prinzip von der Erhaltung der Energie resultiert die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile, d. h. einer Maschine, die ununterbrochen Arbeit leistet ohne Zufuhr von frischen Energievorräten. Unglücklicherweise gibt es immer noch Menschen, die aus Mangel an Verständnis Zeit, Kräfte und Geldmittel vergeuden, um einen Apparat zu erfinden, der sich ewig bewegen könnte. Sie vergessen die Hauptsache, die ununterbrochene Arbeitsleistung, denn eine Maschine, die ewig läuft ohne Arbeit zu leisten, wäre nur ein nutzloses Spielzeug. Doch auch ein solches Spielzeug herzustellen, ist auf unserer Erde ein Ding der Unmöglichkeit, denn es läßt sich hier keine Bewegung erreichen, die nicht den Widerstand der Luft und Reibung zu überwinden hätte und allmählich ihren Energievorrat verbrauchte. Einen Apparat, der „aus nichts“ Arbeit gewinnen könnte, nennt man ein Perpetuum mobile erster Art, zum Unterschied von einer zweiten Art, die wir später kennenlernen werden.

Wir haben gesehen, daß sich das Prinzip von der Erhaltung der Energie auf jedes geschlossene System bezieht. Die Dimen-

sionen dieses Systems kann man in Gedanken beliebig vergrößern, vorausgesetzt natürlich, daß kein Energieaustausch mit der übrigen Welt stattfindet. Wir können es uns so weit vergrößert denken, daß es die Milchstraße und sogar die entferntesten Nebelflecken umfaßt. Versteht man daher unter „Welt“ unsere astronomische Welt, d. h. den unserer Beobachtung zugänglichen Teil des Weltalls, so läßt sich das Prinzip in die Worte kleiden: „die Energie der Welt ist konstant“. Dagegen ist es vollkommen unzulässig, dieses Prinzip auf das Weltall anzuwenden, d. h. auf die Gesamtheit alles Bestehenden, deren verschwindend kleinen Teil unsere astronomische Welt darstellt. Besonders bezieht sich das auf den Fall, daß das Weltall als „unendlich“ groß angenommen wird, d. h. daß man sich mit diesen Worten begnügt, die im Grunde nichts ausdrücken und keinen klar verständlichen Sinn besitzen. Vom Weltall wissen wir nichts. Seine Eigenschaften sind uns nicht bekannt und lassen sich vielleicht vom menschlichen Verstand überhaupt nicht fassen. Alle Betrachtungen über die Beständigkeit der Gesamtheit der Materie oder Energie im Weltall sind daher müßig und im höchsten Grade unwissenschaftlich. Das Weltall darf in keinem Falle zum Gegenstand naturgeschichtlicher Forschungen gemacht werden, und physikalische Gesetze dürfen hier nicht Anwendung finden. Der Mensch darf stolz sein, das große Weltgesetz, dem sich alle unserer Beobachtung zugänglichen Erscheinungen unterwerfen, gefunden zu haben. Er muß sich aber damit begnügen und nicht ein Gebiet betreten wollen, in dem die strenge Wissenschaft durch leichtsinnige Phantasie ersetzt wird. Diese wird nie imstande sein, dem Menschen neue Kenntnisse und neue, wenn auch bloß wahrscheinliche Annäherung an die Wahrheit zu geben.

Aus dem Prinzip von der Erhaltung der Energie folgt, daß die ununterbrochene Kette von aufeinanderfolgenden physikalischen Erscheinungen als eine gleichfalls ununterbrochene Kette von Umwandlungen der Energievorräte einer Art in eine zweite, dritte usw. dargestellt werden kann. Es ist von großem Interesse, den Verlauf solcher Ketten nach beiden Seiten, d. h. vor- und rückwärts, so weit wie möglich zu verfolgen. Beim Vorschreiten findet man die Energieart, in welche sich die gerade vorliegende verwandelt, in entgegengesetzter Richtung stößt man auf ihre

Vorgängerin. Es drängen sich uns also zwei neue Fragen auf: wo liegt die Urquelle der Energievorräte, die auf der Erde vorhanden sind, und in welche Energieart verwandeln sie sich schließlich? Betrachtet man eine größere Anzahl von solchen Ketten, die aus aufeinanderfolgenden Umwandlungen eines und desselben Energievorrats bestehen, so kommt man zu dem Schluß, daß als Urquelle fast aller Energievorräte der Erde die Strahlungsenergie erscheint, die in ununterbrochenem Strome von der Sonne zur Erde fließt. Daneben spielen die innere Erdwärme, die nur ganz langsam bis zur Oberfläche dringt, und die mit ihr in Verbindung stehenden Eruptionen der Vulkane und die Erdbeben als Energiequellen eine verschwindend kleine Rolle. Die Strahlungsenergie der Sonne entsteht zweifellos auf Kosten ihrer Wärmeenergie, denn die Sonne hat eine hohe Temperatur, die lange Zeit hindurch nicht mit Bestimmtheit festgestellt werden konnte. Kürzlich ist erst ein neues bemerkenswertes Gebiet der Pyrometrie entstanden, die im Gegensatz zur gewöhnlichen Thermometrie sich mit Messungen sehr hoher Temperaturen befaßt. Dies Gebiet, das man als optische Pyrometrie bezeichnet, führt die Temperaturmessungen glühender Körper durch Erforschung des Lichtes aus, welches sie aussenden. Besondere, zu diesem Zwecke konstruierte Apparate geben die Möglichkeit, z. B. die Temperatur im Innern einer Esse, die Temperatur eines glühenden oder geschmolzenen Metalls, die des glühenden Fadens einer elektrischen Birne usw. ziemlich genau zu messen. Indem diese neuen Methoden auf die Sonne angewandt wurden, konnte gezeigt werden, daß die Temperatur der Oberflächenschicht der Sonne bei etwa  $6000^{\circ}$  liegt. Auch konnten die Temperaturen von vielen Fixsternen festgestellt werden. Im Jahre 1908 wurde eine bemerkenswerte Arbeit der Forscher Wilsing (geb. 1856) und Scheiner (1858 bis 1914), ausgeführt im astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam, veröffentlicht. Die genannten Forscher haben in den Jahren 1905 bis 1907 die Temperaturen von 109 Fixsternen gemessen. Sie erwiesen sich als ziemlich verschieden und schwankten zwischen  $3000$  und  $12000^{\circ}$ . Zu den kältesten gehören der Stern  $\beta$  im Andromedagestirn, der Stern  $\alpha$  im Orion, der Stern  $\beta$  im Krebs,  $\alpha$  im Herkules und andere. Unter

den besonders heißen befinden sich der Stern  $\alpha$  im Fisch,  $\lambda$  im Orion,  $\gamma$  im Zwillingsgestirn,  $\alpha$ ,  $\eta$  und  $\rho$  des Löwen,  $\varepsilon$  und  $\nu$  im Herkules,  $\gamma$  der Leier,  $\alpha$  im Delphin,  $\alpha$  im Pegasus und andere. Die Fixsterne sind ungeheuer weit von uns entfernt, nichts erreicht uns, als nur schwache Lichtstrahlen. Und diese Strahlen berichten uns über die Stoffe, die sich auf den leuchtenden Oberflächen der Sterne befinden, über die Temperatur, über die Geschwindigkeit, mit der sich die Sterne uns nähern oder sich von uns entfernen und in vielen Fällen über die Zahl ihrer dunklen und hellen Trabanten. Die Wissenschaft hat die ewige Sprache dieser Strahlen verstanden, hat Kenntnisse über die unermesslich weit entfernten Welten erlangt und sie der Menschheit, die seit Jahrtausenden vergebens bestrebt war die Geheimnisse der Sternenwelt zu lüften, vermittelt.

Kehren wir zur Sonne zurück und versuchen wir, den Lauf der Kette noch weiter zu verfolgen. Wo haben wir die Quelle der Wärmeenergie der Sonne zu suchen? Zum größten Teil, vielleicht auch ganz, entsteht sie aus der potentiellen Energie der Massen, die sich nach dem Gesetz der Weltgravitation anziehen (S. 71). Sehr viele Forscher sind der Ansicht, daß der Stoff, aus dem die Sonne besteht, einst einen immensen Raum erfüllte. In Form eines leichten Nebels schwebten die einzelnen Teilchen in verhältnismäßig großen Entfernungen voneinander. Ein solcher Nebel, bestehend aus getrennten Teilchen, die sich nach dem Gesetz der Weltgravitation gegenseitig anziehen, muß über einen ungeheuren Vorrat an potentieller Energie verfügen. Kommen die Teilchen infolge der Anziehungskraft einander näher und verdichtet sich der Nebel, so beginnt die potentielle Energie zuerst in kinetische Bewegungsenergie der Teilchen und dann in Wärmeenergie, vielleicht auch unmittelbar in diese, überzugehen. Mithin wird als Begleiterscheinung der Verdichtung der Masse Wärme frei, welche die ganze Masse auf eine hohe Temperatur gebracht hat, die früher wahrscheinlich noch viel höher war als die gegenwärtige der Sonne. Im Verlaufe einer ungeheuer langen Zeit hat die allmähliche weitere Verdichtung der Sonne ihr heutiges Volumen verliehen, und die ganze Zeit über bildete sich auf Kosten der abnehmenden potentiellen Energie Wärme. Diese Wärmeenergie

ging in Strahlungsenergie über, die sich nach allen Seiten im Weltraume ausbreitete. Die Wissenschaft hat ein Mittel gefunden, um die ganze aus der potentiellen Energie vom Augenblick der ersten Verdichtung des leichten Nebels bis zum heutigen Tage entstandene Wärme zu berechnen. Es erwies sich, daß jedes Gramm Sonnenstoff 29 Millionen Grammkalorien ausscheidet, deren jede 1 g Wasser um 1° erwärmen könnte (s. oben). Man überzeugt sich leicht, daß jedes Gramm, das sich aus dem Nebel verdichtet, imstande wäre, 290 000 g Wasser von 0 auf 100°, d. h. bis zum Sieden zu erwärmen. Dieser Prozeß ist noch nicht beendet. Die Sonne verdichtet sich weiter, und aus der potentiellen Energie der sich anziehenden Teilchen entsteht ununterbrochen Wärmeenergie. Würde sich der Sonnenradius nur um ein Zehntausendstel seiner Größe verkleinern, so würde die freiwerdende Wärme beim heutigen Stande der Sonnenstrahlung für 1500 Jahre ausreichen. Eine so geringe Veränderung des Radius kann durch astronomische Beobachtungen gar nicht festgestellt werden. Es besteht kein Zweifel, daß diese Quelle der Sonnenwärme tatsächlich vorhanden ist. Möglich, daß sie die einzige ist, doch ist es nicht schwer, auch andere Quellen anzugeben, deren wirkliche Rolle jedoch festzustellen unmöglich ist. So ist z. B. die Ansicht ausgesprochen worden, daß auf die Oberfläche der Sonne von allen Seiten ununterbrochen ein Regen von Meteoriten niedergeht. Solche Meteorite fallen oft in Gestalt von festen Körpern verschiedener Größe und Zusammensetzung auch auf unsere Erde und sind in vielen naturgeschichtlichen Museen usw. zu sehen. Im Augenblick, wo sie die Sonnenoberfläche erreichen, besitzen die Meteorite eine enorme Geschwindigkeit, verfügen also über einen ungeheuren Vorrat an kinetischer Bewegungsenergie, die in Wärmeenergie übergeht. Es ist ferner auf die Möglichkeit hingewiesen worden, daß auf der Sonne radioaktive Erscheinungen auftreten, die, wie man sehen wird, gleichfalls als Quellen von Wärmeenergie zu betrachten sind. Es ist, wie gesagt, unmöglich, die Bedeutung der beiden letzteren Energiequellen zu bewerten.

Wir haben gesagt, daß auf die Erdoberfläche sich ein ununterbrochener Strom der Strahlungsenergie der Sonne ergießt und haben fernerhin die Frage nach der Quelle dieser Energie, die

selbst als Quelle fast aller auf der Erde beobachteten Energiearten erscheint, beleuchtet. Die Strahlungsenergie der Sonne wird von Luft, Wasser und der festen Oberflächenschicht der Erde absorbiert und geht in Wärmeenergie über. Die Pflanzen brauchen diese Strahlungsenergie, um die organischen Stoffe, aus denen sie aufgebaut sind, zu bilden. Es muß dabei eine ungeheure Arbeit, z. B. die der Zerlegung von kohlenstoffhaltigen Gasen der Luft in seine Bestandteile geleistet werden. Hier geht die Strahlungsenergie in chemische über. Vorräte dieser letzteren fanden wir in brennbaren Materialien, mit denen uns die Pflanzenwelt in Gestalt von Holz und Steinkohle versieht. Nicht umsonst bezeichnet man die Steinkohlen als versteinerte Sonnenstrahlen. Vorräte von chemischer Energie enthalten alle Produkte des Pflanzenreiches, die den Tieren als Nahrung dienen. Man spricht kurz von Sonnenwärme und versteht darunter die Wärme, die erst auf der Erde aus der Strahlungsenergie der Sonne entsteht. Das Wasser der Meere, Seen, Flüsse, Sümpfe usw. absorbiert sie, erwärmt sich, verdunstet und bildet Wolken. Man hat hier also ein Übergehen in potentielle Energie des Dampfes (S. 73) und in potentielle Energie eines hochgehobenen Körpers vor sich. Die dabei verschwindende Wärmeenergie heißt latente Verdampfungswärme. Wird die Sonnenwärme zum Schmelzen von Eis oder Schnee verbraucht (latente Schmelzwärme), so wird sie durch die potentielle Flüssigkeitsenergie ersetzt (S. 73). Ein gewisser Teil der Sonnenwärme wird verbraucht, um die Luft in Bewegung zu bringen, geht also in kinetische Windenergie über. Man ersieht aus alledem, in welcher verschiedenen Energiearten, unmittelbar oder durch die Wärme als Bindeglied, sich die zu uns gelangende Strahlungsenergie der Sonne verwandelt. Ihrerseits haben diese Energiearten ungezählte Verwandlungen durchzumachen, und alle Arten der kinetischen und potentiellen Energie können beliebig oft wiederkehren.

Wir haben die Kette der Verwandlungen rückwärts verfolgt und kamen auf die potentielle Energie des Urnebels, aus dem unsere Sonne entstanden ist. Wir wenden uns jetzt der zweiten Frage zu und suchen nach den Energiearten, die das Ende der fortlaufenden Umwandlungskette bilden, deren einzelne Glieder das Wesen aller physikalischen Erscheinungen darstellen. Be-

trachtet man diese Erscheinungen etwas genauer, so kommt man zu der Überzeugung, daß erstens die Kette sehr lang sein kann und die einzelnen Arten der potentiellen Energie unter Umständen lange Zeit unverändert bleiben. Weiterhin merkt man aber, daß alle Energiearten schließlich in Wärmeenergie übergehen, die sich wiederum in Strahlungsenergie wandelt und von den Körpern in den Weltraum ausgesandt wird. Man überzeugt sich leicht davon, wenn man alle existierenden Energiearten durchgeht. Die kinetische Energie eines bewegten Körpers geht bei jedem Stoß, der den Körper zum Stehen bringt oder seine Geschwindigkeit verlangsamt, desgleichen bei jeder Reibung in Wärme über. Die von den Körpern absorbierte Strahlungsenergie wandelt sich fast immer gänzlich in Wärme. Dasselbe bezieht sich auf die Energie des elektrischen Stromes, der die Leiter erwärmt, ein Umstand, der in der elektrischen Beleuchtung ausgenutzt wird. Die potentielle Energie eines hochgehobenen Körpers geht in Wärme über, wenn der Körper fällt und auf die Erde trifft. Die potentielle Energie der Flüssigkeit oder des Dampfes wird als Wärme ausgeschieden, wenn die Flüssigkeit erstarrt oder der Dampf flüssig wird. Desgleichen wird die chemische Energie in erster Linie zu Wärme bei jeder Verbrennung, bei zahlreichen chemischen Reaktionen und unter anderem bei denen, die in den Körpern von Mensch und Tier (animalische Wärme) stattfinden. Endlich wandelt sich die elektrostatische Energie einer elektrischen Ladung am häufigsten unmittelbar in Wärmeenergie, wie das bei Entladungen einer Leidener Flasche oder bei Blitzschlägen beobachtet wird. Daraus folgt natürlich nicht, daß jede Energie immer und unmittelbar in Wärmeenergie übergeht. Die Tendenz aber zu dieser Umwandlung, die schließlich tatsächlich eintritt, ist augenscheinlich.

Vergleicht man nun alles, was über die Quelle fast sämtlicher Energiearten auf Erden, d. h. über den Anfang der Verwandlungskette gesagt worden ist, mit den Angaben, welche die Beobachtung über das Ende der Kette liefert, so erhält man folgendes grandiose Bild. Ein Strom von Strahlungsenergie wird von der Sonne nach allen Richtungen ausgesandt und verliert sich in der Unendlichkeit des Weltraumes. Ein winziger Teil dieses Stromes gelangt auf die Erde, wird teilweise reflektiert und

teilweise absorbiert. Der absorbierte Teil wird zur Quelle fast aller auf der Erde vorkommenden Energiearten und verursacht nicht nur alle physikalischen Erscheinungen in der toten Natur, sondern macht auch die Lebensprozesse in der lebendigen Materie der Pflanzen und Tiere möglich. Nach einer Reihe von Umwandlungen jedoch, die zuweilen sehr kurz, zuweilen aber auch sehr lang sein kann (Steinkohlenlager), entsteht wieder Strahlungswärme, die sich im unermeßlichen Raume ausbreitet. Der Gesamtvorrat an allen Energiearten, die auf der Erde vorhanden sind, ist wohl kaum nennenswerten Schwankungen unterworfen und in einer längeren Zeitperiode, im Mittel während eines Jahres, zweifellos unverändert. Es folgt daraus, daß der Verlust an Energie der Zufuhr gleich sein muß, d. h. daß die Erde ebensoviel Strahlungsenergie nach allen Richtungen aussendet, wie sie von der Sonne empfängt. Die von der Sonne herührenden Vorräte verbleiben aber eine gewisse Zeit auf der Erde, machen unzählige Verwandlungen durch und verursachen unter wenigen Ausnahmen alle Erscheinungen der lebendigen und der toten Natur. Es wäre nicht schwer, eine ganze Reihe von Beispielen für aufeinanderfolgende Umwandlungen einer Energie in andere anzuführen. Wenige Beispiele mögen genügen.

Wir werfen einen Stein vertikal in die Höhe, d. h. verleihen ihm kinetische Bewegungsenergie. Wo kommt sie her und in was geht sie über? Die Strahlungsenergie der Sonne wurde einst irgendwo von irgendwelchen Pflanzen absorbiert, in denen chemische Energie entstand, die dann unmittelbar in unseren Körper oder zuerst in den eines pflanzenfressenden Tieres, das uns als Nahrung diente, überging. Die chemische Energie wandelt sich in Wärme, die teilweise in unseren Muskeln verschwindet, wenn wir Arbeit leisten. Sie wird durch die kinetische Energie des hochgeworfenen Steines ersetzt, die wiederum, je weiter sich der Stein von der Erdoberfläche entfernt, allmählich in potentielle übergeht. Hat der Stein seinen höchsten Punkt erreicht, so hat sich die ganze kinetische Energie in potentielle gewandelt, die beim Falle des Steines wieder zuerst in kinetische, dann, beim Auftreffen auf die Erdoberfläche, in Wärme- und schließlich in Strahlungsenergie übergeht.

Als zweites Beispiel nehmen wir einen Motor, der eine Dynamomaschine antreibt. Als Motor kann z. B. eine Dampfmaschine oder eine Turbine dienen. Im ersten Falle geht die chemische Energie des Brennmaterials in Wärme über, die zur Bildung der kinetischen Bewegungsenergie der Dynamomaschine verbraucht wird. Im zweiten Falle wandelte sich die Strahlungsenergie der Sonne zuerst in Wärme, wovon ein Teil Wasser in Gestalt von Dampf zu den Wolken trug, also in potentielle Energie überging. Als Regen fiel darauf das Wasser auf Bodenerhebungen, sammelte sich zu Bächen und Flüssen und strömte zu Tal. Die potentielle Energie der Wolken verwandelte sich in kinetische Bewegungsenergie des Wassers, darauf der Turbine und schließlich der Dynamomaschine. In dieser entsteht die kinetische Energie des elektrischen Stromes, die je nach Verwendungsart entweder in Wärmeenergie (Erwärmung, Beleuchtung) oder in Bewegungsenergie (Straßenbahnen, Elektromotore) oder in chemische Energie (Galvanoplastik) usw. übergeht.

**§ 5. Schlußbetrachtung.** In diesem Kapitel haben wir das Gesetz von der Erhaltung der Energie kennengelernt, eine der tiefsten Wahrheiten, die der menschliche Verstand je erfaßt hat. Dieses Gesetz regiert alle Erscheinungen der toten und der lebendigen Natur, und nichts ist gefunden worden, das ihm widersprochen hätte. Im scheinbaren Chaos der uns umgebenden Erscheinungen stellt dies Prinzip ein regelndes Gesetz dar. Die Wissenschaft hat sich in diesem Chaos zurechtgefunden und erfaßte die allgegenwärtige Leitidee, die uns beweist, daß die Welt kein Chaos ist, sondern daß allem Geschehen eine Gesetzmäßigkeit zugrunde liegt. Sie hat uns gezeigt, daß die Energie eine Größe ist, die quantitativ sich ewig gleich, in ihren qualitativen Verwandlungen das einigende innere Wesen aller uns umgebenden Erscheinungen darstellt, die ihrer Gestalt und ihrem Charakter nach so verschieden sind.

## 5. Kapitel

### Die Wärme als Bewegung der Moleküle und Atome.

§ 1. **Einleitung.** Im dritten Kapitel haben wir die Moleküle, Atome und Elektronen kennengelernt und mußten schon im vierten Kapitel bei Betrachtung der Energie und ihrer verschiedenen Arten die Annahme machen, daß die Wärme nichts weiter sei als kinetische Bewegungsenergie der Körperteilchen. In vorliegendem Kapitel, das man „kinetische Theorie der Materie“ betiteln könnte, werden wir auf die Wärmeenergie näher eingehen.

Zu dem, was im dritten Kapitel über die Existenz der Moleküle und Atome gesagt worden ist, sei hier hinzugefügt, daß sie sich in ununterbrochener Bewegung befinden, und daß ihr Zustand ein kinetischer (bewegter) ist. Vereint man beides zu einem Ganzen, so erhält man ein Bild, das der modernen molekular-kinetischen Weltauffassung entspricht, wie sie der ganzen Physik zugrunde liegt.

Wir wollen unser Thema etwas erweitern und verschiedene Erscheinungen betrachten, die mit der Bewegung der Stoffteilchen zusammenhängen. Wir werden wieder sehen, mit welchen tiefen Kenntnissen uns die Physik beschenkt.

§ 2. **Was ist Wärme?** Wärme und Kälte nehmen wir aus den Empfindungen wahr, die sie in unserem Gefühlsorgan verursachen. Die Frage nach der Ursache solcher Empfindungen, d. h. nach dem Wesen der Wärme und Kälte, ist bereits von den Forschern des Altertums aufgeworfen worden, jedoch erst das 19. Jahrhundert konnte eine endgültige Antwort geben. Wir übergehen die verschiedenen phantastischen Vorstellungen, die sich im Laufe der Jahrhunderte gebildet hatten und in denen der sonderbare Gedanke eine gewisse Rolle spielte, daß die Wärme und die Kälte das Ergebnis einer Wirkung zweier Ursachen sei, die dem Wesen nach verschieden sind und selbständig, voneinander unabhängig, wirken.

Im 18. Jahrhundert herrschte die mehr oder weniger anerkannte Hypothese, daß alle Wärmeerscheinungen von einem besonderen „gewichtlosen“ Stoff, den man mit dem lateinischen Namen Caloricum, auf deutsch „Wärmestoff“, bezeichnet, hervorgerufen werden. Es haben jedoch einzelne Forscher, übrigens zu verschiedenen Zeiten, richtigere Gedanken ausgesprochen, jedoch in so unklarer Form, daß sie auf ihre Zeitgenossen keinen Eindruck machen konnten. So hat der bekannte Mathematiker Cardanus (1501 bis 1576) behauptet, die Wärme sei kein Stoff, sondern „die Eigenschaft eines Stoffes“, und Kälte erkläre sich durch das Fehlen dieser Eigenschaft. Letzteren Gedanken hat dann Mariotte (1620 bis 1684) wiederholt. Phantastische Ideen trifft man auch noch im 18. Jahrhundert. So hat der Philosoph Christian Wolf (1679 bis 1754) die Behauptung aufgestellt, der Wärmestoff sei an und für sich nicht warm, er rufe nur eine Wärmeempfindung hervor, wenn er in Bewegung wäre.

Die einfachsten Wärmeerscheinungen, wenn man die Volumenvergrößerung der Körper bei Temperaturerhöhung ausnimmt, wurden erst spät, und zwar in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, durch drei Forscher, den Deutschen Wilke (1732 bis 1796), den Schweizer Deluc (1727 bis 1817) und den Engländer Black (1728 bis 1799) entdeckt. Ihren Arbeiten hat man die Begriffe der Wärmekapazität und der latenten Schmelzungs- und Verdampfungswärme zu verdanken. Der erste Begriff mußte eingeführt werden, als man entdeckte, daß zur Erwärmung von zwei gleichen Gewichtsmengen verschiedener Stoffe ungleiche Wärmemengen benötigt werden. So braucht man zur Erwärmung von 1 g Quecksilber um  $1^{\circ}$  30mal so wenig Wärme als für eine gleiche Menge Wasser. Man sagt, daß die Wärmekapazität des Quecksilbers  $\frac{1}{30}$  beträgt. Die Wärmekapazität des Eises ist gleich  $\frac{1}{2}$ , die der Kohle  $\frac{1}{4}$ , die des Aluminiums  $\frac{1}{5}$ , die des Eisens  $\frac{1}{10}$ , die des Silbers  $\frac{1}{20}$  usw. Die Wärmekapazität der Luft beträgt etwa  $\frac{1}{4}$ . Am größten ist die Wärmekapazität des Wasserstoffs, und zwar beträgt sie 3,4. Das bedeutet, daß beim Erwärmen einer bestimmten Gewichtsmenge Wasserstoff um  $1^{\circ}$  fast  $3\frac{1}{2}$ mal soviel Wärme gebraucht wird als für die gleiche Menge Wasser, und etwa 100mal soviel als für Quecksilber. Die zweite der beiden wichtigsten Größen der Wärmelehre, die latente Wärme, ist

bereits S. 84 erwähnt worden. Wir sahen, daß Arbeit geleistet werden muß, wenn ein Stoff aus festem Zustande in flüssigen übergeführt werden soll. Diese Arbeit besteht in Überwindung der Kohäsionskräfte, die zwischen den Stoffteilchen wirken. Noch größer ist die Arbeit beim Übergang des Stoffes aus flüssigem Zustande in gasförmigen, d. h. beim Verdampfen und Sieden. Auf diese Arbeit wird die dem Stoffe zuströmende kinetische Wärmemenge verbraucht, und im Resultat erhält man die potentielle Energie der Flüssigkeit oder des Dampfes. Die Wärme als solche verschwindet, sie verbirgt sich sozusagen, und ihre ununterbrochene Zufuhr zum schmelzenden oder siedenden Stoffe hat keine Temperaturerhöhung desselben zur Folge. Das ist eben die latente Schmelzungs- oder Verdampfungswärme.

Die Entdeckungen der drei Forscher wurden erst nach der Erfindung des Thermometers möglich, mit dem quantitative Messungen im Bereich der Wärmeerscheinungen ausgeführt werden konnten. Die Erfindung des ersten Thermometers, das, wie man sehen wird, diesen Namen gar nicht verdient, wird dem großen italienischen Forscher Galilei (1564 bis 1642) zugeschrieben. Im Jahre 1597 konstruierte er einen Apparat, der aus einer Kugel und Röhre mit Luft bestand. Von der Außenluft war diese Luft durch einen Wassertropfen abgeschlossen. Bei Temperaturänderungen bewegte sich der Wassertropfen nach der einen oder anderen Richtung. Aus zwei Gründen kann dieser Apparat nicht als Thermometer bezeichnet werden. Es sei vor allen Dingen bemerkt, daß es unter den physikalischen Apparaten eine Menge solcher gibt, deren Namen die Endung „meter“ besitzen, wie z. B. Thermometer, Barometer, Hygrometer (zur Messung der Luftfeuchtigkeit), Galvanometer usw. Andere wieder enden auf „skop“, z. B. Thermoskop, Baroskop, Hygroskop, Galvanoskop usw. Die ersteren gestatten eine physikalische Größe mehr oder weniger genau zu messen, während die anderen lediglich eine Veränderung der Größe nach der einen oder anderen Seite anzeigen. Ja, sie lassen erkennen, welche von zwei Veränderungen die größere ist, aber von einem genauen Vergleich, von einer Messung, kann keine Rede sein. Es leuchtet ein, daß der Apparat von Galilei im äußersten Falle als Thermoskop bezeichnet werden könnte. Es muß auch hinzugefügt werden, daß auch bei

unveränderter Temperatur der Wassertropfen in der Röhre seine Lage in Abhängigkeit vom Atmosphärendruck (der erst 1643 entdeckt wurde) ändern mußte. Der Apparat könnte also auch als Baroskop dienen. Natürlich konnten seine Angaben, die von zwei Ursachen, der Temperatur und dem Barometerdruck, abhängen, nicht einmal immer die Richtung der Veränderung genau angeben. Es ist merkwürdig, daß Guericke (1602 bis 1686), der Erfinder der Luftpumpe, gegen 1660 einen ähnlichen Apparat konstruiert hat, obwohl die Veränderungen des Atmosphärendruckes ihm bekannt waren und er ihren Einfluß auf die Angaben des Apparates verstehen mußte.

Es ist schwer zu sagen, wer als erster ein Thermometer mit Flüssigkeit, und zwar mit Wasser, konstruiert hat. Der Belgier van Helmont (1577 bis 1644) benutzte wohl ein Wasserthermometer, aber ohne Skala. Im Jahre 1641 wurde das Wasser zum erstenmal durch Spiritus ersetzt, wie behauptet wird, auf Anregung des Herzogs Ferdinand II. (1621 bis 1670) in Florenz. Eines solchen Thermometers bedienten sich die Mitglieder der berühmten Florentiner Akademie, die nur zehn Jahre lang bestanden hat (1657 bis 1667). Das Ende der Röhre war verschlossen und die Luft evakuiert. Die Röhre trug eine richtige Skala, die einzelnen Grade wurden aber nicht durch Striche, wie es heute üblich ist, bezeichnet, sondern durch kleine Glasknöpfe, die mit großer Kunstfertigkeit an die Röhre angelötet waren. Die Anzahl der Grade schwankte zwischen 50 und 400. Die einzelnen Skalas konnten fast gar nicht miteinander verglichen werden. Als konstante Punkte dienten die größte Winterkälte und die größte Sommerhitze in Florenz. Im Jahre 1829 fand man in Florenz zufällig eine Kiste mit solchen 50gradigen Thermometern, wie sie die Akademiker benutzten. Es zeigte sich, daß  $50^{\circ}$  Flor.  $44^{\circ}$  R entsprechen,  $0^{\circ}$  Flor. =  $15^{\circ}$  R und  $0^{\circ}$  R =  $13,5^{\circ}$  Flor. sind. Zweifellos haben die Florentiner Akademiker den Spiritus durch Quecksilber ersetzt, aber scheinbar nicht, um die Apparate zu Temperaturmessungen zu verwenden, sondern zur Ausführung von Versuchen. Sie wollten zeigen, daß Quecksilber im warmen Wasser sich schneller erwärmt und im kalten rascher abkühlt als Wasser, was, wie wir jetzt wissen, mit der geringen Wärmekapazität des Quecksilbers zusammenhängt. Noch im Jahre

1701 benutzte Newton ein Thermometer mit Leinöl. Einigen Angaben nach ist im Jahre 1684 in Paris von irgendwem ein Apparat mit Quecksilber konstruiert worden, der die Gestalt eines Thermometers hatte. Es ist aber kaum anzunehmen, daß er eine richtige Skala besaß und zu Temperaturmessungen verwandt werden konnte.

Der französische Forscher Amontons (1663 bis 1705) konstruierte ein Luftthermometer (1703), in dem aber die Temperatur nicht nach dem Volumen, sondern nach dem Druck der Luft gemessen wurde. Als einer der konstanten Punkte diente die Siedetemperatur des Wassers.

Die wirkliche Thermometrie fußt auf den Arbeiten des französischen Forschers Réaumur (1683 bis 1757), des Deutschen Fahrenheit (1686 bis 1737) und des Schweden Celsius (1701 bis 1744).

Fahrenheit hat als erster Spiritusthermometer eingeführt, die gleiche Angaben machten, was einen großen Fortschritt bedeutete und bei den Zeitgenossen große Bewunderung hervorrief. Um 1715 ersetzte er den Spiritus durch Quecksilber und nahm als konstante Punkte die Schmelztemperatur des Eises (32° F) und die Körpertemperatur eines gesunden Menschen (96° F). Seine ersten Thermometer erreichen nicht die Siedetemperatur des Wassers, von der er jedoch 1724 sagt, daß sie bei 212° liegt. Es ist nicht bekannt, ob er diese Temperatur benutzt hat, um den konstanten Punkt auf den Thermometern festzulegen.

Réaumur gab im Jahre 1730 eine Beschreibung seines Thermometers, das mit Spiritus gefüllt war und eine Skala besaß, die zum erstenmal auf der Schmelztemperatur des Eises und der Siedetemperatur des Wassers aufgebaut war. Die beiden Temperaturen dienten als konstante Punkte, und die Entfernung zwischen ihnen war in 80 Grade eingeteilt. Deluc ersetzte den Spiritus durch Quecksilber. Celsius hat sein Quecksilberthermometer um 1742 konstruiert. Die Entfernung zwischen den konstanten Punkten teilte er in 100 Grade ein, wobei er die Siedetemperatur des Wassers mit 0° und die Schmelztemperatur des Eises mit 100° bezeichnete. Auf Anregung von Märten Strömer (1707 bis 1770) wurden dann die beiden Bezeichnungen vertauscht.

Aus dieser kurzen Übersicht ersieht man, daß Apparate, mit denen Temperaturmessungen tatsächlich ausgeführt werden konnten, erst um die Mitte des 18. Jahrhunderts eingeführt worden sind. Ihnen hat man es zu danken, daß die Wärmeerscheinungen wissenschaftlich erforscht werden konnten. Wir wollen die weitere Entwicklung dieser Wissenschaft nicht verfolgen, denn etwa 100 Jahre lang hatte sie keinen Einfluß auf die Lösung der Frage nach dem Wesen der Wärme. Die Forscher hielten es für möglich, alle Wärmeerscheinungen zu erklären, die nach und nach entdeckt und allseitig erforscht wurden. Ihnen sollten besondere Eigenschaften des bereits erwähnten Wärmestoffs zugrunde liegen, eine Idee, die etwa bis zu den vierziger Jahren des 19. Jahrhunderts die Wissenschaft beherrschte und dann durch die neue Lehre vom kinetischen Charakter der Wärme allmählich verdrängt wurde. In ihren Anfängen stellte diese Lehre lediglich die Behauptung auf, daß die in einem Körper enthaltene Wärme durch die Bewegung seiner Teilchen bedingt und die Temperatur um so höher sei, je rascher diese Bewegung ausgeführt werde. Ungeklärt blieb die Frage nach dem Gesetz, das die Abhängigkeit der Temperatur von der Größe der Geschwindigkeiten genau angeben könnte. Übrigens haben sich einige Forscher schon früher, wenn auch in sehr wenig klarer Form, für den kinetischen Charakter der Wärme ausgesprochen.

Der berühmte englische Forscher Francis Bacon (1561 bis 1626) behauptete, die Wärme sei „verbreiternde Bewegung, die gebremst werde und in kleineren Teilen eines Stoffes stattfinde“. René Descartes (1596 bis 1650) hielt die Wärme gleichfalls für „ein Zittern der einzelnen Stoffteilchen“, hervorgerufen durch Stöße seitens eines besonderen himmlischen Stoffes, der in der Descartesschen Lehre über die verschiedenen astronomischen und physikalischen Erscheinungen eine große Rolle spielte.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts traten drei Forscher als Verfechter des Gedankens auf, die Wärme sei eine Bewegung der Stoffteilchen. Es waren das die Engländer Graf Rumford (1753 bis 1814), Humphry Davy (1778 bis 1829) und Thomas Young (1773 bis 1829).

Um die Arbeiten dieser Forscher richtig verstehen zu können, muß man vorausschicken, daß die Entstehung von Wärme durch Reibung damit erklärt wurde, daß der Wärmestoff aus den Körpern, die aneinandergerieben werden, herausgepreßt wird, oder auch, was jedenfalls scharfsinniger ist, daß beim Reiben stets Späne abfallen, die den Überfluß an Wärme ausscheiden, da ihre Wärmekapazität geringer ist als die der kompakten Körper. Auch wurde behauptet, daß die Reibungswärme von der Luft herrühre.

Rumford bemerkte (1798 in München), daß beim Bohren von Geschützrohren eine große Menge Wärme ausgeschieden wird. Angestellte Messungen ergaben, daß Späne genau dieselbe Wärmekapazität besitzen wie kompakte Metallstücke. Bohrversuche, die darauf in einem Kübel mit Wasser, das sich bis zum Sieden erwärmte, ausgeführt wurden, lieferten den Beweis, daß die Wärme nicht der Luft entnommen wurde, sondern beim Reiben ununterbrochen in unbegrenzten Mengen entstand. Rumford schloß daraus, daß die Wärme kein Stoff sein könne, sondern, da sie aus Bewegung unbegrenzt geboren wird, selbst eine Bewegung darstellen müsse.

Davy (1799) rieb zwei Eisstücke aneinander, wobei sich Wasser bildete. Da die Wärmekapazität des letzteren zweimal so groß ist als die des Eises, so war damit ein noch krasserer Beweis für die Unrichtigkeit der alten Hypothese erbracht. Denselben Versuch wiederholte Davy unter der Glocke einer von Eis umgebenen Luftpumpe und erhielt dasselbe Resultat. Damit hielt er die Lehre vom Wärmestoff für abgetan und sprach im Jahre 1812 klar und bestimmt seine Ansicht dahin aus, daß die Wärme eine Schwingungsbewegung der Teilchen der festen Stoffe darstelle. In Flüssigkeiten und Gasen konnten seiner Meinung nach die Bewegungen rotierend, in einigen Fällen sogar geradlinig sein. Für die Hypothese der Wärmebewegung sprachen sich ferner Young (1802 und besonders 1807) und Ampère (1812) aus. Die meisten Physiker jedoch betrachteten auch weiterhin die Wärme als einen besonderen Stoff. So hat sich z. B. Biot (1774 bis 1862) noch im Jahre 1825 für den Wärmestoff und gegen die Bewegungstheorie ausgesprochen.

Erst in den vierziger und fünfziger Jahren trat ein Umschwung ein. Er wurde zustande gebracht durch die schöpferische Tätigkeit

der Forscher, die sich in zwei eng miteinander verknüpften Richtungen entwickelte. Die erstere brachte die Klärung des Prinzips von der Erhaltung der Energie. Die Geschichte dieses Prinzips wollen wir übergehen, und es sei nur bemerkt, daß die Versuche (1843 bis 1850) des englischen Forschers James Prescott Joule (1818 bis 1889) die Äquivalenz zwischen Wärme und Arbeit bewiesen haben und den Zahlenwert des mechanischen Wärmeäquivalents festlegten. Darauf übertrug Helmholtz in seinem berühmten Werke „Über die Erhaltung der Kraft“ (1847) das neue Weltprinzip auf alle physikalischen Erscheinungen. Die in diesem Falle unklare Bezeichnung „Erhaltung der Kraft“ wurde später durch die zutreffenderen Worte „Erhaltung der Energie“ ersetzt. Selbstverständlich konnte eine Wissenschaft, die das genannte Prinzip zu klären verstand, die Wärme nicht als einen besonderen gewichtslosen Stoff betrachten. Sie konnte nur eine Art der Energie darstellen, und zwar die kinetische Bewegungsenergie der Teilchen, aus denen der Stoff besteht.

Die zweite Richtung betrachtete in engster Anknüpfung an die erste den inneren Aufbau der Gase. Sie führte zum Entstehen eines der interessantesten Kapitel der Physik, das unter dem Namen kinetische Theorie der Gase bekannt ist. Ihre unmittelbare Aufgabe bestand darin, ein solches Bild des inneren Aufbaues der Gase zu entwerfen, das imstande wäre, alle bekannten Eigenschaften der Gase qualitativ und quantitativ zu erklären. Es mußte aber zunächst die Frage nach dem Wesen des Wärmeenergievorrats im Gase beantwortet werden. Es ergab sich, daß die Wärmeenergie durch die kinetische Bewegungsenergie der Gasteilchen bestimmt wird. Die Begründung der kinetischen Gastheorie, wie wir sie heute kennen, fällt in die fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts. Diese Theorie und das Prinzip von der Erhaltung der Energie haben die Lehre vom besonderen gewichtslosen Wärmestoff zu Fall gebracht und an ihre Stelle eine neue Lehre gesetzt. Die Frage „was ist Wärme?“, konnte jetzt nicht nur bezüglich der gasförmigen, sondern auch der flüssigen und festen Stoffe mit Bestimmtheit beantwortet werden: Wärme ist die kinetische Bewegungsenergie der Moleküle und Atome.

**§ 3. Die Grundeigenschaften der Gase.** Da wir es in diesem Kapitel in erster Linie mit Stoffen in gasförmigem Zustande zu tun haben, so muß zunächst einiges über die Grundeigenschaften der Gase gesagt werden. Feste Körper besitzen ein bestimmtes Volumen, d. h. sie nehmen einen Raum von ganz bestimmter Größe ein. Außerdem besitzen sie eine ihnen eigene Form. Um diese Form zu verändern, muß eine mehr oder weniger bedeutende Arbeit geleistet werden, wobei die äußeren Kräfte die inneren zu überwinden haben, die die Teilchen zwingen, eine ganz bestimmte Lage gegeneinander einzuhalten. Flüssigkeiten haben keine bestimmte Form. Eine Ausnahme bilden nur ganz geringe Mengen, die Kugelgestalt annehmen (Quecksilber- oder Wassertröpfchen auf fettiger oder staubiger Oberfläche). Übrigens können auch größere Mengen Kugelgestalt besitzen, wenn die Flüssigkeit von äußeren Kräften nicht beeinflußt wird. So haben die Erde und andere Planeten Kugelgestalt angenommen, als sie sich noch nicht in festem Zustande befanden. Wird Öl (z. B. Olivenöl) in einer Mischung von Spiritus und Wasser von gleicher Dichte untergebracht, so nimmt es gleichfalls Kugelgestalt an. Ohne eine eigene Form zu besitzen, nehmen die Flüssigkeiten unter Einwirkung ihres Eigengewichtes die Form des Gefäßes an, in dem sie sich befinden. Dagegen besitzt jede Flüssigkeit, unabhängig von ihrer zufälligen Gestalt, ein ganz bestimmtes Volumen.

Ein bestimmtes Gewichtsquantum Gas besitzt dagegen weder ein bestimmtes Volumen, noch eine charakteristische Form. Nicht nur, daß es die Gestalt des Gefäßes annimmt, in dem es sich befindet, sondern es füllt es auch vollkommen aus. Letzterer Umstand beweist, daß jedes Gas stets bestrebt ist, sich auszubreiten, d. h. ein möglichst großes Volumen einzunehmen. Verbindet man ein Gasgefäß durch eine Röhre mit einem anderen evakuierten, so geht ein Teil des Gases sofort in das Vakuum und beide Gefäße sind gleichmäßig ausgefüllt. Das Bestreben des Gases, sich auszubreiten, hat zur Folge, daß ein Gas auf alle Körper, mit denen es in Berührung kommt, einen Druck ausübt. Nur der Anziehungskraft der Erde hat man es zu verdanken, daß die Luft sich nicht im Weltraum ausbreitet. Die untere Luftschicht erfährt durch das Gewicht der oberen

einen Druck und übt ihn ihrerseits in gleicher Stärke von unten nach oben und auf alle Körper aus, mit denen sie in Berührung kommt. Das ist der sogenannte Atmosphärendruck, der mit Hilfe eines Barometers gemessen und gewöhnlich in Millimetern einer Quecksilbersäule, die den gleichen Druck ausübt, ausgedrückt wird. Als Normaldruck wird der einer Quecksilbersäule von 760 mm angenommen und als „Atmosphäre“ bezeichnet. Befindet sich ein Gas im Ruhezustand, d. h. findet weder eine Zu- noch Abnahme des Volumens statt, so muß der Druck des Gases ganz genau dem Außendruck, unter dem es sich selbst befindet, gleich sein. Die erstere Größe bezeichnet man zuweilen als Elastizität des Gases. Wird z. B. ein Gas einem Druck von 50 Atmosphären unterworfen, so wird auch sein Gegendruck, d. h. seine Elastizität, 50 Atmosphären betragen. Das von einer bestimmten Gasmenge eingenommene Volumen kann sich in außerordentlich weiten Grenzen ändern. Geht man von einem Volumen aus, welches das Gas unter dem Druck von einer Atmosphäre beansprucht, so kann es 700mal und noch kleiner werden. Andererseits kann es unbegrenzt erweitert werden, wobei der Druck entsprechend geringer wird. Mit Hilfe von modernen Luftpumpen, die man eher Gaspumpen nennen müßte, ist man imstande, die Elastizität des Gases bis auf ein Tausendmillionstel einer Atmosphäre und noch weiter zu verkleinern (siehe § 4). Doch sogar bei einer so weit getriebenen Verdünnung ist das Gas noch weiter bestrebt, sich auszubreiten und übt den eben erwähnten schwachen Druck aus.

Ändert man bei konstanter Temperatur den Druck, unter dem sich eine bestimmte Menge Gas befindet, mithin auch seine Elastizität, so verändert sich sein Volumen nach einem ganz einfachen Gesetz. Es wurde zuerst (1661) vom englischen Forscher Boyle entdeckt und darauf vom Franzosen Mariotte (1676) genau geprüft. Es lautet folgendermaßen: Bei unveränderlicher Temperatur ist das Volumen einer gegebenen Menge Gas umgekehrt proportional dem Druck, unter dem es sich befindet, oder, mit anderen Worten, die Elastizität eines solchen Gases ist umgekehrt proportional seinem Volumen. Erstere Fassung bedeutet, daß bei einer Änderung des Außendruckes, z. B. von

einer Atmosphäre auf fünf, das Volumen fünfmal so klein wird. Die zweite zeigt, daß bei einer Verkleinerung des Volumens, z. B. um zehnmal, die Elastizität des Gases, d. h. der von ihm ausgeübte Druck, um das Zehnfache zunimmt. Es ist leicht zu verstehen, daß beide Fassungen im Grunde identisch sind, denn die Elastizität des Gases und der auf demselben lastende Druck sind im Ruhezustande einander gleich. Dieses Gesetz trägt den Namen Boyle-Mariottesches Gesetz.

In der Folge wird man einer Temperaturzählung begegnen, die von der gewöhnlichen etwas abweicht. Sie besteht in folgendem: Man nimmt die Celsiusskala, auf der mit  $0^{\circ}$  die Schmelztemperatur des Eises und mit  $100^{\circ}$  die Siedetemperatur des Wassers bezeichnet sind, setzt den Anfang der Skala auf  $-273^{\circ}$  (unter Null) und bezeichnet ihn mit  $0^{\circ}$ . Auf diese Weise sind die Temperaturen nach der neuen Skala im Vergleich zur gewöhnlichen um 273 vergrößert. Dem großen englischen Physiker William Thomson, Lord Kelvin (1824 bis 1907) zu Ehren, der sich mit dieser Frage viel beschäftigt hat, ist es üblich geworden, die Grade nach dieser Skala mit dem Buchstaben K zu kennzeichnen. So ist z. B.  $0^{\circ} \text{ K} = -273^{\circ} \text{ C}$ . Das Eis schmilzt bei  $273^{\circ} \text{ K} = 0^{\circ} \text{ C}$ ; das Wasser kocht bei  $100^{\circ} \text{ C} = 373^{\circ} \text{ K}$ . Die Temperatur  $0^{\circ} \text{ K}$  nennt man die absolute Nulltemperatur: sie liegt bei  $273^{\circ}$  Kälte. Die Kelvintemperaturen werden auch absolute genannt und öfters statt mit K mit abs. gekennzeichnet, so daß z. B.  $0^{\circ} \text{ abs.} = -273^{\circ} \text{ C}$  ist usw. Somit ist die absolute Temperatur gleich der Temperatur nach der Celsiusskala, vermehrt um die Zahl 273. Bezeichnet man die Temperatur nach Celsius mit  $t^{\circ}$  und die absolute mit  $T^{\circ}$ , so hat man die einfache Beziehung:  $T^{\circ} = t^{\circ} + 273$ . Blei schmilzt z. B. bei  $t = 325^{\circ} \text{ C}$ , d. h. bei  $T = 325 + 273 = 598^{\circ} \text{ abs.}$  (oder  $598^{\circ} \text{ K}$ ). Quecksilber geht in festen Zustand über bei  $t = -39^{\circ} \text{ C}$ , d. h. bei  $T = -39 + 273 = 234^{\circ} \text{ abs.}$  (oder  $234^{\circ} \text{ K}$ ). Flüssiger Sauerstoff siedet bei  $t = -183^{\circ} \text{ C}$ , d. h. bei  $T = -183 + 273 = 90^{\circ} \text{ abs.}$  Wasserstoff wird fest bei  $t = -259^{\circ} \text{ C}$ , d. h. bei  $T = -259 + 273 = 14^{\circ} \text{ abs.}$  Flüssiges Helium siedet bei  $t = -268,8^{\circ} \text{ C}$ , d. h. bei  $T = -268,8 + 273 = 4,2^{\circ} \text{ abs.} = 4,2^{\circ} \text{ K}$ .

Nun können wir uns der Betrachtung einer anderen Haupteigenschaft der Gase zuwenden, und zwar dem im Jahre 1802

vom französischen Forscher Gay-Lussac (1778 bis 1850) entdeckten Gesetz. Es handelt vom Einfluß der Temperaturänderung auf die Gase, die unter zwei verschiedenen Bedingungen eintreten kann. Man kann erstens die Temperatur eines Gases in einem vollkommen geschlossenen Gefäß ändern, wobei das Gasvolumen das gleiche bleiben muß. Es zeigt sich, daß bei Temperaturerhöhungen die Elastizität des Gases zunimmt, wenn die Erwärmung bei konstantem Volumen erfolgt. Zweitens kann ein Gas bei konstantem Außendruck und folglich auch konstanter Elastizität erwärmt werden. Zu diesem Zwecke kann das Gas in einem vertikal gestellten Zylinder mit einem beweglichen Kolben untergebracht werden. Der Kolben befindet sich unter Atmosphärendruck und kann noch mit Gewichten belastet werden, damit der Gesamtdruck auf das Gas genau bestimmt werden kann. Bei Erwärmung vergrößert sich das Gasvolumen und der Kolben geht in die Höhe. Augenscheinlich sind aber in diesem Falle der Druck, unter dem sich das Gas befindet, und seine Elastizität unverändert geblieben. Somit vergrößert sich das Gasvolumen bei Temperaturerhöhung, wenn die Erwärmung bei konstantem Außendruck erfolgt. Gay-Lussac fand das einfache Gesetz, das im ersten Falle die Abhängigkeit des Druckes, und im zweiten die Abhängigkeit des Gasvolumens von der Temperatur bestimmt. Es erwies sich, daß für beide Fälle das gleiche Gesetz gilt. Das Gay-Lussacsche Gesetz lautet folgendermaßen: Das Volumen eines Gases unter konstantem Druck ist der absoluten Temperatur proportional; bei konstantem Volumen ist der Gasdruck der absoluten Temperatur proportional.

Um also im ersten Falle das Volumen und im zweiten den Druck des Gases um das Zwei-, Drei-, Vierfache usw. zu vergrößern, muß die absolute Temperatur gleichfalls um das Zwei-, Drei-, Vierfache usw. erhöht werden. Es sei dies an einem Zahlenbeispiel erläutert. Ein Gas möge die Temperatur von  $40^{\circ}\text{C}$  besitzen. Gesucht wird die Temperatur, bei welcher sein Volumen (erster Fall) oder sein Druck (zweiter Fall) den doppelten Betrag erreicht haben werden. Nach dem Gay-Lussacschen Gesetz muß die absolute Temperatur auf das Doppelte erhöht werden. Wir haben aber bei  $t = 40^{\circ}\text{C}$   $T = 40 + 273 = 313^{\circ}\text{abs.}$  Volumen oder

Druck erreichen also den doppelten Betrag bei  $T = 313 \times 2 = 626^\circ$  abs., und das ist gleich  $t = 626 - 273 = 353^\circ$  C. Es muß somit das Gas von  $40^\circ$  C auf  $353^\circ$  C erwärmt werden.

**§ 4. Die Grundlagen der kinetischen Gastheorie.** Die kinetische Gastheorie muß uns ein klares Bild des inneren Aufbaues der Gase liefern und alle Eigenschaften derselben erklären. Die dieser Theorie zugrunde liegenden Gedanken sind erst im Jahre 1857 streng wissenschaftlich behandelt worden. Anspielungen auf dieselben findet man jedoch bereits bei Daniel Bernoulli (1700 bis 1782) in seiner 1738 veröffentlichten Hydrodynamik (Lehre von der Bewegung der Flüssigkeiten) und beim englischen Forscher John Herapath (1796 bis 1867) im Jahre 1821. Weiterhin hat Joule 1851 dieselben Gedanken entwickelt und Krönig (1822 bis 1879) ist 1856 ihnen noch näher gekommen. Die Arbeit von Krönig hat Clausius (1822 bis 1888) bewogen, im Jahre 1857 seine klassische Abhandlung „Über die Art der Bewegung, die wir Wärme nennen“ zu veröffentlichen. Mit der Ausarbeitung der Grundlagen dieses Werkes hatte er bereits 1850 begonnen.

Es ist leicht zu verstehen, daß die kinetische Theorie, d. h. die Lehre von der Bewegung der Stoffteilchen, zuerst für Gase, nicht aber für feste und flüssige Körper, entstehen mußte. Im Gas sind die Entfernungen zwischen den einzelnen Teilchen bedeutend größer als in festen und flüssigen Körpern, in denen eine Bewegung mithin nicht so einfach erfolgen kann. In festen Körpern können die Teilchen fast nur Schwingungen um gewisse Mittelagen ausführen. Eine Umgruppierung vollzieht sich jedenfalls sehr langsam. In Flüssigkeiten geht sie natürlich rascher vor sich, wofür die allmähliche Vermischung von zwei Flüssigkeiten, von denen die eine vorsichtig auf die andere gegossen wird (z. B. Spiritus auf Wasser), einen Beweis liefert. Aber auch hier erfolgt die Umgruppierung immerhin sehr langsam, da die Teilchen dicht beieinander liegen und in ihren Bewegungen, die sich in der Hauptsache auf Schwingungen zurückführen lassen, behindert sind. Ganz anders ist es mit den Gasen, wo die einzelnen Teilchen voneinander weit entfernt sind. Bewegt sich zu einer gegebenen Zeit ein einzelnes Teilchen in irgend einer Richtung, so muß es diese Bewegung in derselben Richtung mit unverminderter Ge-

schwindigkeit fortsetzen, denn es liegt ja keine Veranlassung vor, statt dessen Schwingungen auszuführen, d. h. an irgend einem Punkte im Raume sich hin und her zu bewegen. Die einzige Ursache, die das Gasteilchen zwingen könnte, die Bewegungsrichtung zu ändern, wäre das Aufprallen auf die Wandung des Gefäßes, in dem sich das Gas befindet, überhaupt auf die Oberfläche eines festen oder flüssigen Körpers, oder auch ein Zusammenstoß mit einem anderen zufällig begegnenden Teilchen. Das gibt uns die Möglichkeit, uns einen ersten Begriff vom Charakter dieser Bewegung zu bilden. Die Gasteilchen bewegen sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit, bis sie auf eine Schranke oder auf andere Teilchen stoßen. Diese Bewegung wollen wir im Gegensatz zu schwingenden oder rotierenden als fortschreitende bezeichnen und können mithin sagen, daß die Bewegung der Gasteilchen eine fortschreitende ist. Dadurch unterscheidet sich das Gas wesentlich von festen und flüssigen Körpern. Die Gasteilchen bewegen sich in allen möglichen Richtungen, und die ersten Umriss des gesuchten Bildes zeigen uns eine vollkommen ordnungslose Bewegung der Gasmoleküle, die, sogar in einem ganz kleinen Raume in ungeheurer Menge vorhanden, sich chaotisch nach allen möglichen Richtungen bewegen. Bevor wir nun auf die Einzelheiten unseres Bildes übergehen, wollen wir zeigen, daß schon dies Wenige genügt, um einige der Grundeigenschaften des gasförmigen Zustandes der Stoffe zu erklären, d. h. sie vollkommen verständlich erscheinen zu lassen. Die erste Eigenschaft, die darin besteht, daß ein Gas den ganzen ihm zur Verfügung stehenden Raum ausfüllt, bedarf wohl keiner besonderen Erklärung. Das Gas kann nicht an Leere grenzen, es kann nicht z. B. nur die untere Hälfte eines Gefäßes ausfüllen, denn die nach allen Richtungen fliegenden Teilchen würden offenbar in die angrenzende Leere gelangen, bis der ganze zur Verfügung stehende Raum in gleichmäßiger Dichte von den Gasmolekülen ausgefüllt ist.

Die zweite Grundeigenschaft der Gase besteht in der Elastizität, d. h. im Druck, den sie auf alle Körper ausüben. Auch diesen Druck kann man als Ergebnis der unzähligen Stöße deuten, denen feste und flüssige Körper seitens der Gasteilchen ausgesetzt

sind. Von allen Seiten fliegen sie heran und prallen wie Gummibälle oder Elfenbeinkugeln von den Oberflächen der Körper ab. Man kann sagen, daß die Körper einem Molekularbombardement seitens der Gase ausgesetzt sind, das den Druck hervorbringt.

Es muß nur noch das Boyle-Mariottesche Gesetz erklärt werden, nach dem der Druck, den ein Gas ausübt, umgekehrt proportional ist seinem Volumen bei konstanter Temperatur. Clausius hat dieses Gesetz streng mathematisch abgeleitet. Aber auch ohne Mathematik läßt sich seine Notwendigkeit leicht einsehen. In der Tat, verdoppelt man das Volumen einer Gasmenge, so nimmt die Dichte der Teilchen um die Hälfte ab, so daß in einem gegebenen Raume, z. B. in einem Kubikzentimeter oder in einem gegebenen Gefäß, nur die Hälfte der früheren Anzahl übrigbleibt. Natürlich hat in diesem Falle die Anzahl der Teilchen, die z. B. in einer Sekunde auf einen bestimmten Teil der Oberfläche eines Körpers auftreffen, auf die Hälfte abgenommen. Es ist also das Molekularbombardement zweimal so schwach geworden und in demselben Maße ist auch der Druck, den das Gas auf einen Körper ausübt, geringer geworden. Wird das Volumen einer gegebenen Gasmenge um das Drei-, Vierfache usw. vergrößert, so nimmt das Molekularbombardement und folglich auch der Druck in gleichem Maße ab.

Wir sehen, daß das einfache unvollkommene Bild der fortschreitenden Bewegung der Gasteilchen genügt, um die Grundeigenschaften der Gase zu erklären, und zwar erstens ihr Bestreben, sich unbegrenzt auszubreiten, zweitens den Druck, den sie ausüben und der stets vorhanden ist, sie mögen noch so weit verdünnt sein, und drittens das Gesetz, welches die Abhängigkeit der Druckhöhe vom Grade der Verdünnung, d. h. vom Volumen des Gases, bestimmt. Es sei jedoch daran erinnert, daß dieses Gesetz nur dann Geltung hat, wenn bei Veränderung des Volumens die Temperatur des Gases konstant bleibt.

Beiläufig sei bemerkt, daß jede Erscheinung, deren Auftreten bei unveränderter Temperatur erfolgt, als isothermisch bezeichnet wird. Mithin bestimmt das Boyle-Mariottesche Gesetz die isothermische Volumenveränderung des Gases.

Alles Gesagte läßt sich in mehr oder weniger bestimmter Form in den Arbeiten von Bernoulli, Herapath, Joule und Krönig

finden. Clausius ist in seiner Abhandlung (1857) viel weiter gegangen. Als erster hat er das Molekularbombardement mathematisch erforscht und nicht nur eine Reihe von neuen wichtigen Gesetzen für Gase abgeleitet, sondern auch einen Weg gewiesen, auf dem die verschiedenen Größen der kinetischen Gastheorie berechnet werden können. Wir müssen uns auf eine einfache Aufzählung der Resultate beschränken, zu denen Clausius auf mathematischem Wege gelangt ist. Sie beruhen auf Gesetzen der Mechanik, die eine Berechnung des vom Molekularbombardement hervorgerufenen Druckes ermöglichen. Die Hauptrolle spielt in allen Ableitungen die kinetische Bewegungsenergie der Gasmoleküle. Man hat hier drei verschiedene Bewegungsarten zu unterscheiden: die fortschreitende Bewegung des Moleküls, seine Rotation und die intramolekularen Schwingungen der Atome, aus denen das Molekül besteht. Bei einatomigen Gasen kommt nur die erste Bewegungsart in Frage. Wir wollen uns daran erinnern, daß die kinetische Bewegungsenergie eines Körpers seiner Masse und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit proportional ist. Das bezieht sich auf jedes Gasmolekül. Entsprechend den drei Bewegungsarten zerfällt auch die kinetische Energie in drei Teile, von denen wir nur den ersten, d. h. die Energie der fortschreitenden Bewegung, die der Masse des Moleküls und dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, betrachten wollen. Setzt man voraus, daß alle Moleküle sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, so kann man sagen, daß der ganze Energievorrat der fortschreitenden Molekülbewegung in einer gegebenen Gasmenge der Masse dieses Gases und dem Quadrat der Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung seiner Moleküle proportional ist.

Wir wollen uns nun den bemerkenswerten Ergebnissen zuwenden, zu denen Clausius auf Grund seiner Berechnungen (1857) gelangte. Zunächst mögen folgende zwei hervorgehoben werden:

1. Der Druck, den ein Gas von konstantem Volumen ausübt, ändert sich proportional zur kinetischen Energie der fortschreitenden Molekülbewegung.

2. Nehmen zwei Gase gleiche Volumina ein und üben sie gleiche Drucke aus, so sind ihre Energievorräte der fortschreitenden Molekülbewegung einander gleich.

Suchen wir nach den Schlußfolgerungen, die aus den beiden Gesetzen gezogen werden können. Stellt man das erste dem Gay-Lussacschen Gesetz (S. 99) gegenüber, nach dem der Gasdruck bei konstantem Volumen sich proportional zur absoluten Temperatur ändert, so erhält man das fundamentale Gesetz der kinetischen Gastheorie:

3. Die kinetische Energie der fortschreitenden Bewegung der Gasmoleküle wächst proportional zur absoluten Temperatur. Dieses Gesetz zeigt uns die wahre Bedeutung der Größe, die wir Temperatur nennen und kann als Definition der Bezeichnung „absolute Temperatur“ dienen, als einer Größe, die der Energie der fortschreitenden Molekülbewegung proportional ist. Wir wissen, daß für ein gegebenes Gas diese Energie von der Bewegungsgeschwindigkeit der Moleküle abhängt (sie ist ihrem Quadrat proportional). Es zeigt sich also, daß die Temperatur eines Gases durch die Bewegungsgeschwindigkeit seiner Moleküle bestimmt wird. Umgekehrt: die Bewegungsgeschwindigkeit der Moleküle hängt von der Temperatur des Gases ab. Da nun die absolute Temperatur der Bewegungsenergie und diese letztere dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, so erhält man das zweite Grundgesetz:

4. Das Quadrat der Geschwindigkeit der Moleküle eines gegebenen Gases wächst proportional zur absoluten Temperatur. Das bedeutet also, daß die absolute Temperatur auf das Vierfache erhöht werden muß, wenn die Geschwindigkeit der Moleküle den doppelten Betrag erreichen soll. Übrigens wäre es logischer, umgekehrt zu sagen: Hat sich die Geschwindigkeit der Gasmoleküle verdoppelt, so ist die absolute Temperatur auf das Vierfache gestiegen. Ein Zahlenbeispiel soll das erläutern. Gesucht wird die Temperatur, bei welcher die Geschwindigkeit der Gasteilchen zweimal so groß ist als bei  $0^{\circ}\text{C}$ . Wir wissen, daß  $0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{abs.}$  ist. Diese Tempe-

ratur muß vervierfacht werden, so daß man  $T = 273 \times 4 = 1092^\circ$  abs. oder  $t = 1092 - 273 = 819^\circ$  C erhält. Bei  $819^\circ$  C bewegen sich also die Gasmoleküle zweimal so schnell als bei  $0^\circ$  C. Für Leser, die einige mathematische Kenntnisse besitzen, läßt sich Gesetz 4 noch folgendermaßen formulieren: Die Geschwindigkeit der Gasmoleküle ist proportional der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur. Es sei noch bemerkt, daß diese Geschwindigkeit nur von der Temperatur abhängt, nicht aber auch vom Grade der Verdichtung oder Verdünnung des betreffenden Gases. Das ist auch ohne weiteres verständlich, denn wird ein Gas komprimiert, so wird seine Dichte größer, die Entfernungen zwischen den einzelnen Teilchen nehmen ab. Das beeinflußt wohl ihre Bewegungsfreiheit, Zusammenstöße erfolgen häufiger, die Geschwindigkeit aber bleibt dieselbe.

Wir wollen nun die Geschwindigkeiten der Moleküle verschiedener Gase bei gleicher Temperatur miteinander vergleichen. Denken wir uns wieder zwei Gase, die gleiche Volumina einnehmen, gleiche Drucke ausüben und gleiche Temperatur besitzen. Laut Gesetz 2 verfügen sie über gleiche Energievorräte der fortschreitenden Molekülbewegung. Weiterhin besagt das Gesetz von Avogadro (S. 54), daß in beiden Gasen die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten ist. Es entfällt mithin bei gleicher Temperatur in verschiedenen Gasen auf eine gleiche Anzahl von Molekülen dieselbe Energiemenge der fortschreitenden Bewegung. Daraus folgt, daß alle Moleküle der beiden Gase bei gleicher Temperatur gleiche Energiemengen der fortschreitenden Bewegung besitzen. Diese Schlußfolgerung ergibt uns eines der wichtigsten Gesetze der ganzen Physik. Es bezieht sich nicht nur auf Gase, sondern auf alle Körper überhaupt, und nicht nur auf Moleküle, sondern auch auf einzeln bewegte Atome und, was besonders wichtig ist, auch auf bewegte Gruppen von miteinander verbundenen Molekülen. Solche Gruppen können aus Millionen von Molekülen bestehen, so daß sie in Gestalt eines Körnchens unter dem Mikroskop leicht erblickt werden können. So ein Körnchen kann auch aus verschiedenartigen Molekülen bestehen, wie das z. B. bei Staubkörnchen in Luft und Flüssigkeiten der Fall ist.

**§ 5. Die Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Die Brownsche Erscheinung.** Im vorhergehenden Paragraphen haben wir den allgemeinen Charakter der Gasmolekülbewegung kennengelernt, deren Energie nichts weiter ist als die im Gase enthaltene Wärme. Entsprechend den drei Bewegungsarten, der fortschreitenden, der rotierenden der Moleküle und der schwingenden der Atome (intramolekulare Bewegung), zerfällt auch die Wärmeenergie in drei Teile. Wir hatten die erste Bewegungsart betrachtet und auf ein Fundamentalgesetz hingewiesen, welches uns lehrt, daß das Quadrat der Geschwindigkeit der Teilchen der absoluten Temperatur proportional ist. Es folgte daraus, daß bei einer gegebenen Temperatur alle einzeln bewegten Atome, Moleküle und Molekülgruppen über gleiche (mittlere) Energiemengen fortschreitender Bewegung verfügen, woraus sich wiederum der Schluß ziehen läßt, daß das Quadrat der Geschwindigkeit der Teilchen umgekehrt proportional zu ihrer Masse ist. Die rotierende Bewegung der Moleküle und die schwingende der in diesen enthaltenen Atome wollen wir übergehen.

Alles Dargelegte gibt jedoch noch kein klares Bild der Wärmebewegung in Gasen. Vorderhand wissen wir nur, daß die Gasmoleküle sich so lange geradlinig bewegen, bis sie auf die Oberfläche irgend eines Körpers, z. B. auf die Gefäßwandung oder auf andere Moleküle stoßen. Wir wissen auch, daß die Geschwindigkeit dieser Bewegung mit der Temperatur zusammenhängt. Jetzt wollen wir die Wärmebewegung der Gasteilchen etwas näher betrachten.

Das von Clausius bewiesene Gesetz 1 gibt die Möglichkeit, die Bewegungsenergie der Moleküle bei einer gegebenen Temperatur und daraus auch die Geschwindigkeit dieser Bewegung zu berechnen. Man gelangte unerwartet zu dem Resultat, daß die Geschwindigkeit der Gasmoleküle ungeheuer groß ist. Kennt man die Geschwindigkeit für irgend ein Gas bei einer gegebenen Temperatur, so kann man für dieselbe Temperatur die Geschwindigkeiten für beliebige Gase, Dämpfe, Molekülgruppen bis zu den Stäubchen berechnen. Nach Gesetz 4 lassen sich dann die Geschwindigkeiten für beliebige Temperaturen feststellen. Als Grundeinheit nehmen wir die von Clausius berechnete Geschwindigkeit der Sauerstoffmoleküle bei 0° C. Dieselbe beträgt  
461 m in der Sekunde.

Ein Sauerstoffmolekül legt mithin bei 0° C in einer Sekunde einen Weg von 461 m zurück. Das leichtere Wasserstoffmolekül oder das gleichfalls leichtere einzelne Heliumatom bewegen sich noch rascher, schwerere Moleküle dagegen oder Gruppen von solchen langsamer. Die größte Geschwindigkeit besitzen die Wasserstoffmoleküle (wenn man die noch größere Geschwindigkeit der einzelnen Wasserstoffatome ausnimmt). Sie ist viermal so groß wie die der Sauerstoffmoleküle, beträgt mithin bei 0° C

1844 m in einer Sekunde.

Diese Tatsache läßt den inneren Aufbau der Gase noch chaotischer erscheinen: Trillionen von Teilchen bewegen sich in allen Richtungen mit ungeheurer Geschwindigkeit, die sogar bei 0° nach Hunderten von Metern gezählt wird.

Folgende lehrreiche Tabelle gibt die Bewegungsgeschwindigkeiten von verschiedenen Atomen, Molekülen und Molekülgruppen bei verschiedenen Temperaturen von —270° C, d. h. 3° abs. bis zu 1000° C.

Die erste Zeile enthält die Temperaturen *t* nach der gewöhnlichen Skala von Celsius, während die zweite die entsprechenden Temperaturen *T* nach der absoluten Skala angibt. Die erste Rubrik bringt die Bezeichnungen der Stoffe, vor allem Wasserstoff, Sauerstoff, kohlen-saures Gas und Quecksilberdämpfe. Eingeklammert sind die Molekulargewichte, wobei wie gewöhnlich das Gewicht eines Wasserstoffatoms als Einheit zugrunde liegt. Die vorletzte Zeile bezieht sich auf eine Molekülgruppe, deren Gewicht 20 000mal so groß ist wie das eines Wasserstoffatoms. Endlich zeigt die letzte Zeile die Geschwindigkeiten der Wärmebewegung eines Körnchens, dessen Gewicht 2 Mill. mal so groß ist wie das des Wasserstoffatoms. Sämtliche Zahlen geben die Bewegungsgeschwindigkeiten in Metern, bezogen auf 1 Sek., an.

	$T = t + 273$						
	— 270° 3°	240° — 33°	— 150° 123°	0° 273°	100° 373°	500° 773°	1000° 1273°
Wasserstoff (2) . . . . .	193,2	614	1237	1843	1843	3101	3980
Sauerstoff (32) . . . . .	48,3	154	309	461	539	775	995
Kohlensaures Gas (44) . .	41,1	131	263,1	392	458	660	846,5
Quecksilberdämpfe (200,6)	19,8	61,4	123,7	184,3	215,3	310,1	398
Gruppe (20 000) . . . . .	1,93	6,14	12,4	18,43	21,5	31,0	39,8
Körnchen (2 000 000) . .	0,19	0,61	1,24	1,84	2,15	3,1	4,0

Diese Tabelle müßte mit größter Aufmerksamkeit betrachtet werden. Jede horizontale Zeile zeigt, wie die fortschreitende Bewegungsgeschwindigkeit des Atoms (Quecksilberdämpfe), der Moleküle und Gruppen mit zunehmender Temperatur wächst. Bei  $1000^{\circ}\text{C}$  sind die Geschwindigkeiten etwa 20mal so groß wie bei  $-270^{\circ}\text{C}$ . Letztere Temperatur übersteigt die absolute Nulltemperatur nur um  $3^{\circ}$ . Man sieht, daß ein Wasserstoffmolekül bei  $1000^{\circ}\text{C}$  in einer Sekunde 3980 m, d. h. fast 4 km zurücklegt. Sogar bei  $-270^{\circ}$  beträgt seine Geschwindigkeit immerhin noch 193,2 m. Andererseits zeigen die vertikalen Rubriken, wie bei einer gegebenen Temperatur die Geschwindigkeit mit zunehmender Masse des bewegten Teilchens geringer wird. So ist die Geschwindigkeit eines Sauerstoffmoleküls viermal und die eines Körnchens 1000mal so klein wie die eines Wasserstoffmoleküls. Die Atomgeschwindigkeiten der Quecksilberdämpfe schwanken zwischen 19,3 m bei  $-270^{\circ}\text{C}$  und 398 m bei  $1000^{\circ}\text{C}$ . Das Körnchen, welches 1 Mill. mal so schwer ist wie das Wasserstoffmolekül, besitzt bei  $-270^{\circ}\text{C}$  eine Geschwindigkeit von 0,19 m und auch bei  $1000^{\circ}\text{C}$  erreicht diese nur den Betrag von 4 m in der Sekunde. Ein Körnchen, welches noch 100mal so schwer wäre, würde bei  $-270^{\circ}\text{C}$  bloß eine Geschwindigkeit von 0,019 m, d. h. 1,9 cm besitzen.

Bei einer Temperatur von  $4000^{\circ}\text{C}$  sind die Geschwindigkeiten etwa zweimal so groß wie bei  $1000^{\circ}\text{C}$ , so daß ein Wasserstoffmolekül in einer Sekunde etwa 7,9 km zurücklegen würde. Auf der Sonne, deren Temperatur noch höher ist (S. 81), müssen die Geschwindigkeiten noch größer sein. Sie sind annähernd viermal so groß wie die in der vorletzten Rubrik für  $500^{\circ}\text{C}$  angegebenen.

Wir haben hier die Geschwindigkeit betrachtet, deren Quadrat die mittlere Bewegungsenergie bestimmt. Von ihr unterscheidet sich die einfache mittlere Geschwindigkeit der Teilchen, die um 8 Proz. geringer ist, und z. B. für Sauerstoff bei  $0^{\circ}$  425 m in der Sekunde beträgt.

Wir wenden uns nun den Zusammenstößen zwischen den Gasteilchen zu, die mit großen Geschwindigkeiten sich in allen Richtungen bewegen. Diese Frage hat folgende Geschichte.

Als Clausius im Jahre 1857 seine Arbeit veröffentlichte, in der er erstmals Zahlenwerte für die Geschwindigkeiten der Gas-

teilchen angab, wurde er auf einen Umstand aufmerksam gemacht, der scheinbar allen seinen Resultaten widersprach. Wenn, so wurde behauptet, die Geschwindigkeiten der Gasteilchen wirklich so groß sind, wie Clausius sie angibt, so müßte doch jedes Gas in einem Bruchteil einer Sekunde das ganze Volumen eines noch so geräumigen Zimmers ausfüllen. Statt dessen breiten sich Gase, die man mit dem Geruchsinn wahrnehmen kann, wie Ammoniak, Chlor, Schwefelwasserstoff, schwefliges Gas (das beim Verbrennen von Schwefel entsteht), nur sehr langsam aus, und es vergeht nicht etwa ein Bruchteil einer Sekunde, sondern viele Sekunden, ja Minuten, bis der Geruch eines Gases, das man an einem Ende eines großen Saales einem Gefäß entströmen läßt, am anderen Ende wahrgenommen werden kann. Um die Haltlosigkeit solcher Entgegnungen zu beweisen, veröffentlichte Clausius bereits im Jahre 1858 eine Abhandlung über „Die mittlere Weglänge der Gasmoleküle“. Dieser Begriff wird ohne weiteres klar, wenn man die Worte „zwischen den Zusammenstößen“ hinzufügt. Verfolgt man in Gedanken die Bewegung irgend eines Moleküls, und zieht man in Betracht, daß bei jedem Zusammenstoß die Bewegungsrichtung geändert werden muß, so gelangt man zu dem Schluß, daß diese Bewegung zickzackförmig verläuft. Die geraden Abschnitte dieser gebrochenen Linie, d. h. die Strecken zwischen den einzelnen Zusammenstößen, haben offenbar ungleiche Längen, da der *Zufall* hier eine sehr große Rolle spielen muß. Zuweilen erfolgt nach einem Zusammenstoß zufällig gleich noch einer, so daß die geradlinige Bahn nur sehr gering ausfällt. Unter Umständen stößt aber das Molekül zufällig nicht so bald wieder mit einem anderen zusammen und hat damit Gelegenheit, eine verhältnismäßig lange, geradlinige Bahn zu durchlaufen. Nimmt man jedoch die ungeheuer große Zahl solcher Strecken, die von Trillionen von Teilchen durchlaufen werden, und berechnet ihren Mittelwert, der ja die „mittlere Weglänge“ bestimmen muß, so erhält man eine ganz bestimmte Größe, die nur vom Grade der Gaskompression und von den Dimensionen der Moleküle, d. h. von der Art des Gases, abhängt. Es ist nicht schwer einzusehen, daß die mittlere Weglänge um so geringer ist, je größer die Dimensionen der Moleküle sind, denn mit diesen wächst die Wahrscheinlichkeit der Zusammenstöße. Auch muß sie um so kleiner sein, je höher das

Gas komprimiert, d. h. je dichter die Verteilung der Teilchen ist. In der Tat zeigt die Berechnung, daß die mittlere Weglänge dem Drucke, dem das Gas ausgesetzt ist, oder, was dasselbe ist, seiner Elastizität umgekehrt proportional ist. Dieses Gesetz läßt sich anders in die Worte kleiden: Die mittlere Weglänge ist dem von einer gegebenen Gasmenge eingenommenen Volumen proportional. Wird dieses vergrößert, d. h. wird beispielsweise die Dichte zehnmal so klein, wie sie war, so vergrößert sich die mittlere Weglänge um das Zehnfache. Von der Temperatur, d. h. von der Bewegungsgeschwindigkeit der Teilchen, darf die mittlere Weglänge nicht abhängen. Dagegen muß die mittlere Zahl der Zusammenstöße, die ein Teilchen während einer bestimmten Zeit, z. B. während einer Sekunde, zu erdulden hat, mit der Vergrößerung der Geschwindigkeit, d. h. mit der Temperaturerhöhung wachsen. Man ersieht es daraus, daß die Zahl der Zusammenstöße der Zahl gleich sein muß, die anzeigt, wievielmals die mittlere Weglänge in der vom Teilchen zurückgelegten sekundlichen Strecke enthalten ist. Diese letztere ist aber von der Geschwindigkeit des Teilchens abhängig. Denken wir uns z. B. ein Gas, dessen mittlere Weglänge 1 m beträgt und dessen Teilchen bei einer gewissen Temperatur eine Geschwindigkeit von 500 m pro Sekunde besitzen. Da nun im Mittel nach je 1 m ein Zusammenstoß erfolgt und das Teilchen in einer Sekunde 500 m zurücklegt, so erleidet es in einer Sekunde offenbar 500 Zusammenstöße. Beträgt die Geschwindigkeit bei einer höheren Temperatur 600 m pro Sekunde, so erhöht sich auch die Zahl der Zusammenstöße auf 600. Komprimiert man nun das Gas im Verhältnis von 1 : 10, so wird die mittlere Weglänge zehnmal so klein, beträgt also nur noch 0,1 m, dagegen steigt die Zahl der Zusammenstöße auf das Zehnfache, und das Teilchen hat ihrer 6000 zu erdulden. Verdünnt man dagegen das Gas im gleichen Verhältnis, d. h. vergrößert man sein Volumen auf das Zehnfache (wobei sein Druck zehnmal so klein wird), so erreicht die mittlere Weglänge den Betrag von 10 m, und in einer Sekunde erfolgen nur 60 Zusammenstöße.

Es läßt sich berechnen, wieviel Teilchen einen bestimmten Teil oder ein bestimmtes Vielfaches der mittleren Weglänge tatsächlich durchlaufen. Der Bequemlichkeit halber wollen wir die

mittlere Weglänge mit dem Buchstaben  $L$  bezeichnen. Nehmen wir an, daß es uns möglich ist, die Bewegungen einer ungeheuren Zahl von Gasteilchen zu verfolgen und die Strecken, die sie zwischen zwei Zusammenstößen tatsächlich zurücklegen, festzustellen. Es würde sich zeigen, daß 1 Proz. aller Strecken kleiner als  $0,01 L$ , 39 Proz. kleiner als  $0,5 L$  und 63 Proz. kleiner als  $L$  sind. Die übrigen 37 Proz. sind größer als  $L$ , wobei 14 Proz.  $2 L$  übersteigen und nur 1 Proz. größer ist als  $5 L$ .

Clausius hat die mittlere Weglänge der Gasmoleküle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zusammenstößen berechnet und kam zu einem überraschenden Ergebnis. In Gasen, wie etwa Sauerstoff, Stickstoff oder einfach Luft, beträgt bei gewöhnlichem Atmosphärendruck die mittlere Weglänge  $L$  ungefähr

$$L = 0,0001 \text{ Millimeter,}$$

d. h. den zehntausendsten Teil eines Millimeters.

Eine so erstaunlich kleine Strecke legt also das Teilchen zwischen zwei Zusammenstößen zurück. Eine Größe, die sogar unter dem besten Mikroskop nicht erblickt werden könnte. Die Zahl der Zusammenstöße, die ein Teilchen während einer Sekunde zu erleiden hat, läßt sich leicht berechnen, wenn die Bewegungsgeschwindigkeit, d. h. der ganze Weg, den das Teilchen in einer Sekunde zurücklegt und der, wie wir wissen, von der Art des Gases und von der Temperatur abhängt, bekannt sind. Wir wollen eine Temperatur von  $0^{\circ}$  annehmen. Die Tabelle auf S. 107 zeigt uns, daß die Sauerstoffteilchen in einer Sekunde 461 m durchfliegen. Aus naheliegenden Gründen müssen wir diese Zahl auf 425 heruntersetzen, d. h. wir nehmen die auf S. 108 erwähnte mittlere Geschwindigkeit. Es ist klar, daß das Teilchen auf dieser Strecke so viel Zusammenstöße durchmachen muß, wievielmals ein Zehntausendstel Millimeter in 425 m enthalten ist. Das ergibt aber bei  $0^{\circ}$

4250 Millionen Zusammenstöße in einer Sekunde.

Dieses Resultat bereichert das von uns früher gewonnene Bild des inneren Aufbaues der Gase um eine sehr wesentliche Einzelheit. Es stellt sich nun folgendermaßen dar. Denken wir uns 1 cm Luft bei gewöhnlichem Barometerdruck und Zimmertemperatur. Das Kubikzentimeter enthält 27 Trillionen

Teilchen (S. 55), die sich in allen möglichen Richtungen mit einer ungeheuren Geschwindigkeit von fast 500 m in der Sekunde bewegen, wobei jedes Teilchen in jeder Sekunde mehr als 4000 Millionen Zusammenstöße mit anderen Teilchen zu erleiden hat. Die lebhafteste Phantasie ist nicht imstande, sich dieses chaotische Bild vorzustellen. Komprimiert man das Gas so, daß sein Volumen 500mal so klein wird wie bei gewöhnlichem Atmosphärendruck, so wird die Zahl der Zusammenstöße noch 500mal so groß, und erhöht man weiterhin die Temperatur auf  $1000^{\circ}$ , so verdoppelt sich diese Zahl und wird 4 Billionen (eine Billion gleich einer Million Millionen) in einer Sekunde betragen. Für Wasserstoff ist die mittlere Weglänge fast zweimal so groß wie für Sauerstoff, dagegen bewegen sich die Wasserstoffmoleküle fast viermal so schnell wie die vom Sauerstoff, so daß unter gleichen Bedingungen man immerhin eine zweimal so große Zahl von Zusammenstößen erhält wie beim Sauerstoff, und zwar 9480 Millionen in der Sekunde (bei  $0^{\circ}$  und Atmosphärendruck). Diese ungeheuren Zahlen verändern sich, und zwar wird die mittlere Weglänge größer und die Zahl der Zusammenstöße kleiner, wenn wir erstens das Gas sehr stark verdünnen und zweitens niedrigere Temperaturen nehmen. Beginnen wir mit dem ersteren und nehmen Sauerstoff bei  $0^{\circ}$ . Bei einem Druck von einem Tausendstel Atmosphäre erreicht die mittlere Weglänge das Tausendfache ihres früheren Betrages, ist also gleich 0,1 mm, und bei einem Druck von einem Millionstel Atmosphäre, einer Verdünnung, die mit modernen Luftpumpen leicht zu erreichen ist, wird sie sogar 100 mm betragen, während die Zahl der Zusammenstöße auf 4250 sinkt. Bei einer Temperatur von  $-270^{\circ}$  C gibt es rund 400 Zusammenstöße in einer Sekunde, wenn man den letzten Verdünnungsgrad des Sauerstoffs beibehält. Übrigens läßt sich das Gas mit neuzeitlichen Luftpumpen bis auf ein Tausendmillionstel Atmosphäre und bei entsprechender Handhabung der Pumpe sogar noch 100mal so stark verdünnen. Bei ersterem Druck haben wir bei  $0^{\circ}$  etwa vier Zusammenstöße in der Sekunde, und bei  $-270^{\circ}$  C einen Zusammenstoß in  $2\frac{1}{2}$  Sekunden. Bei letzterem Druck wird der Zusammenstoß bereits zu einer seltenen Erscheinung, und bei  $-270^{\circ}$  wird das Teilchen etwa einmal in vier Minuten mit einem anderen zusammenstoßen,

während die mittlere Weglänge nach Kilometern gezählt werden muß. Die Teilchen fliegen fast nur von einer Wandung des Gefäßes, in dem sich das so stark verdünnte Gas befindet, zur anderen. Die angeführten Zahlen beziehen sich fast in demselben Maße auf Sauerstoff wie auf Stickstoff. Gase, deren Molekulargewicht größer ist, haben, wie wir sahen, geringere Geschwindigkeit, dafür ist aber auch die mittlere Weglänge kleiner, denn Zusammenstöße müssen um so öfter erfolgen, je größer die Dimensionen der Moleküle sind.

Wir haben nun den Inhalt der zweiten Arbeit (1858) von Clausius kennengelernt und sehen, daß sie die Einwendungen gegen seine erste Arbeit vollkommen entkräften. Es ist jetzt verständlich, warum die Ausbreitung eines Gases in einem anderen so überaus langsam vor sich geht. Jedes Gasteilchen ändert in einer Sekunde seine Bewegungsrichtung Tausende von Millionen mal. Es wird bald nach einer, bald nach einer anderen Seite geschleudert und kommt so kaum vom Fleck. Allmählich gehen aber die Teilchen nach allen Seiten auseinander und dringen so nach und nach in das andere Gas durch. Man nennt diese Erscheinung, die, wie eben bewiesen worden ist, nur langsam vor sich gehen kann, Diffusion.

Bringt man ein Gefäß mit leichtem Gas, z. B. mit Wasserstoff, über einem anderen an, das schwereres Gas, z. B. Sauerstoff enthält, und verbindet beide Gefäße durch eine Röhre, so wird das leichtere Gas allmählich nach unten und das schwere nach oben dringen. Die Gase vermischen sich, sie diffundieren, so daß man eine gleichartige Mischung erhält. Die merkwürdige Erscheinung, daß ein leichter Stoff sinkt, während ein schwerer steigt, läßt sich mit der kinetischen Theorie, d. h. mit der freien fortschreitenden Bewegung der Gasteilchen vollkommen einwandfrei erklären.

Auf S. 27 ist gesagt worden, daß man das Recht hat, von einer auf einer bestimmten Hypothese aufgebauten Theorie nicht nur die Erklärung der bereits bekannten Erscheinungen auf dem entsprechenden Gebiete zu erwarten, sondern auch die Voraussage neuer noch nicht entdeckter Erscheinungen. Die kinetische Gastheorie hat diese Erwartung nicht getäuscht. Ein Beispiel genügt, um zu zeigen, in welchem Maße eine glücklich aufgestellte

Hypothese und die auf dieser aufgebaute Theorie imstande sind, völlig neue und, wie im vorliegenden Falle, unerwartete Erscheinungen zu entdecken und allseitig zu beleuchten. In unserem Falle widersprach die Voraussage allem, was angenommen werden konnte und als notwendig und einzig möglich erschien. Es ist allgemein bekannt, daß verschiedene Stoffe nicht in gleichem Maße Wärme übertragen oder, bedingt ausgedrückt, daß die Wärme in ihnen nicht mit gleicher Geschwindigkeit fließt. Man sagt in so einem Falle, daß verschiedene Stoffe ungleiche Wärmeleitfähigkeit besitzen. Am besten leiten Wärme die Metalle, dagegen sind Glas, Holz, Flüssigkeiten (mit Ausnahme von Quecksilber) schlechte Wärmeleiter. Die Gase leiten äußerst schlecht, trotzdem ist aber ihre Wärmeleitfähigkeit von Null verschieden. Denken wir uns irgend ein Gas, sagen wir Luft, zuerst in stark komprimiertem Zustand und darauf stark verdünnt. In welchem der beiden Zustände leitet das Gas die Wärme besser? Ein jeder wird wohl glauben, daß ein komprimiertes Gas besser leiten muß als ein verdünntes. Der englische Forscher Maxwell hat im Jahre 1860 theoretisch abgeleitet, daß die Wärmeleitfähigkeit des Gases von seiner Elastizität, d. h. vom Grade der Kompression oder Verdünnung nicht abhängt, wenn beide nicht übermäßig hoch getrieben sind, d. h. das Gas weder dem flüssigen Zustande zu nahe kommt, noch zu stark verdünnt ist. In letzterem Falle muß die Wärmeleitfähigkeit geringer werden. Das auf rechnerischem Wege gewonnene Resultat schien wenig wahrscheinlich, jedoch haben experimentelle Untersuchungen gezeigt, daß die Voraussage der kinetischen Theorie richtig war. In der Tat ist die Wärmeleitfähigkeit der Gase in sehr weiten Grenzen von der Elastizität unabhängig.

Es ist im zweiten Kapitel die Behauptung aufgestellt worden, daß sogar die glänzendsten Voraussagen einer Theorie die Richtigkeit ihrer Grundhypothese noch nicht beweisen. Eine Theorie kann nur dann als unumstößlich betrachtet werden, wenn es gelungen ist, sich unmittelbar von der Richtigkeit ihrer Grundhypothese zu überzeugen. In diesem Falle hört die Hypothese auf, eine solche zu sein, und die Theorie wird zum Ausdruck einer der Wahrheiten, bis zu denen die Wissenschaft vorgedrungen ist und die sie als reife Frucht ihrer schöpferischen Tätigkeit der

Menschheit darbringt. In so einer Lage befindet sich heute die molekular-kinetische Hypothese, die da besagt, daß der Stoff aus Molekülen und Atomen besteht, die in ununterbrochener Bewegung begriffen sind. Dieser Bewegung ist das dritte und vierte Kapitel gewidmet. Die sorgfältige Untersuchung einer längst bekannten Erscheinung, die jedoch lange Zeit hindurch die Aufmerksamkeit der Forscher nicht auf sich gelenkt hatte, machte es möglich, daß man sich heute durch Augenschein von der Molekularbewegung überzeugen kann.

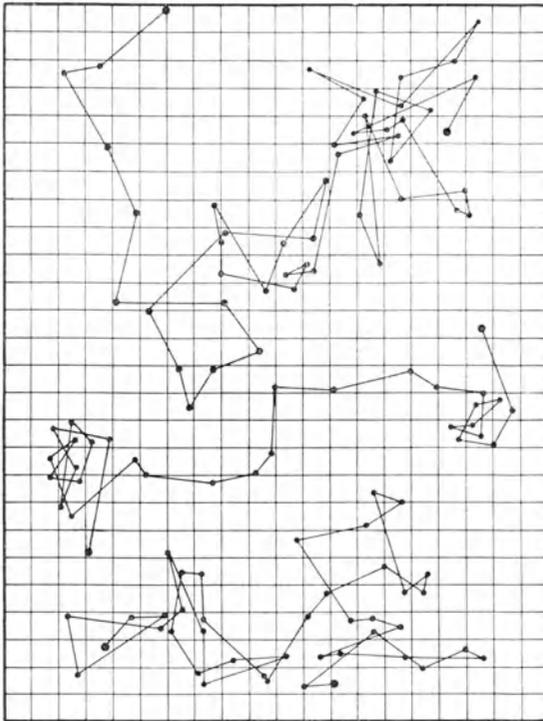
Der englische Botaniker Robert Brown (1773 bis 1858) entdeckte im Jahre 1827, daß kleine Körnchen, die in den flüssigen Bestandteilen der Pflanzen enthalten oder, wie man sagt, in diesen suspendiert sind, sich ununterbrochen bewegen, quasi zittern. Dieses Zittern, dem man später den Namen „Brownsche Bewegung“ gab, hört niemals auf. Es läßt sich bei allen hinreichend kleinen Körperchen feststellen, die sich in einer beliebigen Flüssigkeit oder auch in einem Gase, z. B. in Luft, befinden. Das Körperchen selbst braucht nicht fest zu sein, das Zittern wird auch bei einem flüssigen Tröpfchen, z. B. eines fettigen Stoffes in Wasser oder auch bei einem Gasbläschen, beobachtet. Im Laufe des 19. Jahrhunderts ist diese Erscheinung nur von wenigen Forschern untersucht worden, von denen jedoch einige bereits den Gedanken aussprachen, daß das Zittern von Stößen seitens der Moleküle herrührt, die im umgebenden flüssigen oder gasförmigen Medium ihre ordnungslosen Wärmebewegungen ausführen. Die große theoretische Bedeutung der Brownschen Bewegung offenbarte sich erst im laufenden Jahrhundert nach Veröffentlichung der theoretischen und experimentellen Arbeiten vieler Forscher. Hervorgehoben seien Einstein (jetzt in Berlin) und Smoluchowski (in Krakau, geb. 1872), die eine mathematische Theorie aufstellten und die Gesetze voraussagten, welche die Abhängigkeit der Brownschen Bewegung von der Temperatur, der Größe der Körnchen und von einigen speziellen Eigenschaften der Flüssigkeit, in der die Körnchen suspendiert sind, bestimmen müssen. Mit experimentellen Untersuchungen und Nachprüfungen dieser Theorie befaßten sich insbesondere Perrin, Svedberg u. a. Die Versuche zeigten, daß das Zittern keinesfalls von äußeren Ursachen abhängt, sondern einzig und allein von der Wärme-

bewegung der Teilchen in der umgebenden Flüssigkeit oder dem Gase herrühren kann. Es ist nicht schwer zu verstehen, daß dieses Zittern nur an ganz winzigen, dem bloßen Auge unsichtbaren Körnchen beobachtet werden kann, wenn man daran denkt, wie klein im allgemeinen die Moleküle und wie groß ihre Geschwindigkeiten sind. Ein nicht ganz kleiner Körper, der sich in einer Flüssigkeit oder in einem Gase befindet, ist gleichzeitig von allen Seiten Millionen von Stößen ausgesetzt, die, sich gegenseitig aufhebend, keine merkliche Bewegung des Körpers hervorrufen können. Ist dagegen der Körper ganz winzig, so kann schon ein ganz geringes Übergewicht von Stößen an irgend einer Seite eine Bewegung bedingen. Da nun die Stöße von allen Seiten erfolgen und ein zufälliges Übergewicht seine Richtung ununterbrochen ändert, so erhält man eben im Resultat das merkwürdige, nie aufgehörende Zittern, das die Brownsche Bewegung charakterisiert. Sind die Dimensionen des Körnchens sehr klein, so wird es durch die Stöße gezwungen, nicht nur zu zittern, sondern auch seine Lage auf einer komplizierten gebrochenen Linie zu verändern. Perrin (1909), von dem eine der interessantesten Untersuchungen der Brownschen Bewegung herrührt, gab eine Zeichnung, die hier wiedergegeben sein soll (Fig. 1). Sie zeigt die Bahnen von drei Körnchen, deren Durchmesser etwa ein Tausendstel Millimeter betrug. Die Punkte bezeichnen die Lagen der Körnchen nach je 30 Sekunden. Sie sind zwar durch gerade Linien verbunden, was aber nicht bedeuten soll, daß die Körnchen sich tatsächlich 30 Sekunden lang auf einer Geraden bewegten. Die wahre Bewegung verlief unbeschreiblich komplizierter, und jeden geraden Abschnitt muß man sich ersetzt denken durch eine gebrochene Linie, deren einzelne Teile ihrerseits aus kleinen Zickzacklinien, entsprechend dem Zittern des Körnchens, bestehen. Die ganze auf der unteren Zeichnung dargestellte Bahn ist in 25 Minuten zurückgelegt worden. Die Weglänge läßt sich aus dem Maßstabe der Zeichnung bestimmen, in der 320 Teilstriche einem Millimeter entsprechen, und deren aus 20 Teilstrichen bestehende Breite  $\frac{1}{16}$  mm beträgt.

Auf weitere Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Von der Hypothese der Molekularstöße ausgehend, haben Einstein und Smoluchowski die Gesetze der Brownschen Bewegung

vorausgesagt. Experimente bestätigten, daß sie tatsächlich nach diesen Gesetzen verläuft. Diese Bewegung zeigt unserem Auge die Wärmebewegung der Stoffteilchen, beweist die Richtigkeit der molekular-kinetischen Hypothese, die den Grundstein der modernen Physik bildet, und gibt uns das Recht, diese Hypothese nicht mehr als eine solche, sondern als eine unzweifelhafte reelle Tatsache zu betrachten.

Fig. 1.



Es sei bemerkt, daß diese Hypothese nicht nur die im vorliegenden Kapitel betrachteten Erscheinungen erklärt, sondern auch eine große Anzahl von anderen, die verschiedenen Gebieten der Physik angehören. Wir wollen uns auf ein Beispiel beschränken. Alle Flüssigkeiten verdunsten stets und bei allen Temperaturen. Die Erscheinung läßt sich leicht erklären. Die Teilchen der Flüssig-

keit befinden sich in ununterbrochener Bewegung, wobei ihre Geschwindigkeiten in einem gegebenen Augenblick voneinander sehr verschieden sind. Man versteht ohne weiteres, daß aus der Oberflächenschicht der Flüssigkeit ununterbrochen Teilchen herausfliegen, deren Geschwindigkeit besonders groß ist und deren Bewegung zufällig nach dem Außenraum gerichtet ist. Das ist eben die Verdunstung, die sich so lange fortsetzt, bis die ganze Flüssigkeit sich verflüchtigt hat, sofern sie sich nicht in einem geschlossenen Gefäße befindet. Angenommen, die Flüssigkeit fülle nicht das ganze Gefäß aus, so werden die ausfliegenden Teilchen über ihr einen Dampf bilden. Die Dampfteilchen bewegen sich nach allen Richtungen, stoßen unter anderem auf die Oberfläche der Flüssigkeit, und viele von ihnen dringen in ihr Inneres und bleiben dort stecken. Je mehr Flüssigkeit verdunstet ist, desto dichter wird der Dampf und um so mehr Teilchen geraten wieder zurück. Endlich erreicht der Dampf eine solche Dichte, daß in einem beliebigen Zeitraum ebensoviel Teilchen aus der Flüssigkeit herausfliegen, wieviel aus dem Dampfe wieder zurückkehren. In diesem Falle sagt man, daß der geschlossene Raum über der Flüssigkeit von Dämpfen gesättigt ist. Die Dichte des Dampfes nimmt nicht mehr zu, und es scheint, daß der Verdunstung ein Ende gesetzt ist. Dem ist aber nicht so. Die Verdunstung setzt sich ununterbrochen fort, wird aber durch den ununterbrochenen rückwärtigen Übergang des Stoffes aus dampfförmigem in flüssigen Zustand kompensiert, der mit gleicher Geschwindigkeit erfolgt. Wir sehen, wie klar und einfach die molekular-kinetische Theorie nicht nur die Einzelheiten einer gegebenen Erscheinung erklärt, sondern auch solche Seiten beleuchtet, die einer unmittelbaren Beobachtung entzogen, für immer unbekannt bleiben könnten.

**§ 6. Schlußbetrachtung.** Die kinetisch-molekulare Theorie, mit deren Grundzügen wir uns in diesem Kapitel befaßt haben, stellt eines der bemerkenswertesten Resultate der schöpferischen wissenschaftlichen Tätigkeit der Physiker dar. Sie hat uns so tiefe Kenntnisse von der unsichtbaren Welt der Atome und Moleküle gegeben, daß wir imstande sind, uns in Gedanken ein völlig klares und bis in die kleinsten Einzelheiten ausgearbeitetes Bild

vom inneren Aufbau des Stoffes zu machen, besonders eines solchen in gasförmigem Zustande. Uns ist die Anzahl der Teilchen bekannt, die ein gegebenes Volumen bei gegebenem Druck und Temperatur enthält. Wir kennen die Bewegungsgeschwindigkeiten der Teilchen, die von ihnen zwischen je zwei Zusammenstößen im Mittel durchlaufenen Bahnen und die Anzahl der Zusammenstöße in einem gegebenen Zeitraum. Die Theorie hat uns eine endgültige Antwort auf die Frage nach dem Wesen der Wärme gegeben, und, was von ganz besonderer Wichtigkeit ist, sie hat ein Licht auf eine so grundlegende Größe geworfen, wie sie die Temperatur darstellt. Einfach und übersichtlich hat sie eine Menge von Erscheinungen erklärt, neue vorausgesagt, und schließlich ist die Hypothese, auf der sie fußt, nicht mehr als eine solche anzusprechen. Diese Theorie hat der Menschheit erstaunlich tiefe Kunde von der verborgenen Welt gebracht, in der die Quellen der von uns beobachteten Erscheinungen liegen.

## 6. Kapitel.

### Die Strahlungsenergie.

**§ 1. Einleitung.** Die Strahlungsenergie ist bereits im vierten Kapitel erwähnt worden, wo ihr bei Aufzählung der verschiedenen Arten der kinetischen Energie einige Zeilen (S. 69) gewidmet sind. Es ist damit zum Ausdruck gebracht worden, daß die Strahlungsenergie jedenfalls eine Bewegung darstellt. Eine große Rolle spielte sie weiterhin, als wir im gleichen Kapitel die verschiedenen Verwandlungen einer Energieart in eine andere betrachteten. In diesen auf der Erdoberfläche stattfindenden Umwandlungen stellt die Strahlungsenergie fast die einzige Urquelle und zugleich das letzte Glied in der fortlaufenden Kette der Energieverwandlungen dar, die das Wesen der uns umgebenden physikalischen Erscheinungen bilden.

In diesem Kapitel wollen wir nun die Strahlungsenergie näher kennenlernen. Wir werden sehen, wie gut die Wissenschaft es verstanden hat, die, wie es schien, sehr spärliche Kunde zu erweitern, die uns die Sehorgane vermitteln. Das Auge erzählt uns vom Lichte, der Ursache, dank der wir die uns umgebenden

Gegenstände sehen können. Und es erscheint uns das Licht als etwas Wunderbares, unendlich Wichtiges, in seiner Art einzig Dastehendes, und die Rolle, die es im Leben der Tiere und Pflanzen spielt, scheint diese Denkungsart zu unterstützen. Die Lichtstrahlen sind uns ein Symbol alles dessen, was das Unbekannte bekannt macht, das dunkle Fragen „beleuchtet“ und vor uns längst Vergangenes und Zukünftiges erstehen läßt. Wir vergleichen das Wissen mit dem Lichte und sagen, daß dank den Strahlen, die die Wissenschaft nach allen Richtungen aussendet, wir das zu sehen vermögen, was unserer unmittelbaren Beobachtung entzogen ist. Doch hat das Licht der Wissenschaft dem sichtbaren Lichte gegenüber eine sonderbare Rolle gespielt. Ohne die große Bedeutung der Lichtstrahlen im Leben der Tiere und Pflanzen zu berühren, hat die Physik erwiesen, daß diese Strahlen bei weitem nichts Einzigartiges darstellen. In Wirklichkeit sind sie ein Spezialfall einer weit allgemeineren Erscheinung, unter deren unzähligen Abarten sie, wie wir sehen werden, einen sehr bescheidenen Platz einnehmen. Diese Abarten lassen sich in eine Reihe entwickeln, und wir werden sehen, daß nur der fünfzigste Teil derselben den sogenannten Lichtstrahlen gehört. Die übrigen neunundvierzig Fünfzigstel sind auch verschiedenartige Strahlen, doch sind sie unsichtbar und wirken auf unser Auge nicht. Es wäre jedoch sonderbar und sogar unbequem, von einem sichtbaren und einem unsichtbaren Lichte zu sprechen. Daher wird die allgemeine Erscheinung, deren verschiedene Arten in diesem Kapitel betrachtet werden sollen, Strahlungsenergie genannt, so daß man sagen kann, das Licht stelle einen Spezialfall der Strahlungsenergie dar. Bei Aufzählung der verschiedenen Arten dieser Energie werden wir jedoch der Klarheit wegen zuweilen vom „sichtbaren Lichte“ sprechen, um damit die für uns wichtigste Sonderheit, die Wirkung auf unser Auge, zu betonen.

Wir haben es hier mit einem der Fälle zu tun, in welchen man eine subjektiv empfundene Erscheinung von einer objektiv existierenden zu unterscheiden hat. Mit anderen Worten unterscheiden wir eine physiologische Erscheinung, die von der speziellen Einrichtung unserer Sinnesorgane vollkommen abhängt, und eine physikalische, die in Wirklichkeit außerhalb von uns besteht, ob sie nun von jemandem empfunden wird oder nicht. Etwas

Ähnliches findet man in Schallerscheinungen, wo gleichfalls ein Unterschied zwischen dem vom Hörorgan Empfundene und dem wirklich Vorhandene gemacht werden muß. Das wirklich Vorhandene ist eine allgemeinere Erscheinung und entsteht durch Schwingungen, z. B. einer Saite, die ihrerseits die Luftteilchen zum Schwingen bringen. Beträgt die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde nicht weniger als 16 und nicht mehr als beispielsweise 40 000 (ungleich bei verschiedenen Menschen), so hören wir die entsprechenden Töne. Die Schwingungszahl kann aber kleiner als 16 und bedeutend größer als 40 000 sein. So ist es z. B. Altberg (in Moskau, geb. 1877) im Jahre 1907 gelungen, Töne zu erhalten, die einer Schwingungszahl von 340 000 in der Sekunde entsprachen, und Dieckmann (1908) erreichte sogar 780 000 Schwingungen. Das ist nun eine Erscheinung, die, streng genommen, nicht als Ton bezeichnet werden kann, denn einen Ton hören wir. In der Physik spielt jedoch die Empfindsamkeit unseres Ohres gar keine Rolle. Die Wissenschaft kennt und erforscht nur die wirklich vorhandene Erscheinung. Für sie sind alle dazu gehörenden Fälle gleich wichtig und interessant, von der kleinsten Schwingungszahl in der Sekunde bis zur größten, obwohl für uns, subjektiv betrachtet, der Ton als solcher nicht vorhanden ist, wenn die Schwingungszahl die erwähnten Grenzen überschreitet. Die Abteilung der Physik, die sich mit diesen Erscheinungen befaßt, trägt den Namen Akustik, und daher ist es wohl naheliegend, die erwähnten Schwingungen als akustische zu bezeichnen. Man kann sagen, daß die tönenden, d. h. hörbaren Schwingungen einen Spezialfall der allgemeinen akustischen darstellen. Etwas vollkommen Analoges finden wir auch bei der Strahlungsenergie, jedoch mit folgendem Unterschied. Die Schall-schwingungen umfassen ein ungeheures Gebiet (von 16 bis 40 000 Schwingungen), und zwar (s. weiter unten) mehr als 11 Oktaven in der Reihe der erforschten akustischen Schwingungen, die im ganzen etwas über 16 Oktaven beträgt, wenn man 8 und 780 000 Schwingungen als Grenzen betrachtet. Man kann sagen, daß drei Viertel aller bis jetzt erreichten akustischen Schwingungen auf unser Hörorgan einwirken. In der Reihe der uns bekannten Arten der Strahlungsenergie jedoch, die, wie wir sehen werden, nicht weniger als 50 Oktaven umfaßt, beansprucht das

sichtbare Licht nur ein ganz kleines Gebiet, weniger als eine Oktave, d. h. weniger als ein Fünfzigstel der ganzen Reihe.

Nochmals möge betont werden, daß unser Sehorgan nur einen ganz geringen Teil der vorhandenen Arten der Strahlungsenergie aufnimmt. Alle übrigen empfindet es nicht, gibt uns keine Kunde von ihrer Existenz. Die Wissenschaft hat jedoch den Schleier gelüftet und uns die ganze Verschiedenartigkeit der Strahlungsenergie gezeigt, von den elektrischen Strahlen, die in der drahtlosen Telegraphie verwandt werden, bis zu denjenigen Röntgenstrahlen, die von radioaktiven Stoffen ausgesandt werden. Die lange Reihe, in der das sichtbare Licht eine so geringe Rolle spielt, liegt offen vor uns. Man findet wohl wenig Beispiele, wo die erste und größte Aufgabe der Wissenschaft, unsere Kenntnisse zu erweitern, so glänzend erfüllt wäre, wie gerade in der Strahlungsenergie. Das enge Gebiet des unmittelbar erkennbaren Lichtes hat ungeheure Dimensionen erhalten, und unser Wissen ist durch eine lange Reihe von dem Charakter nach ganz verschiedenen Erscheinungen bereichert worden, von denen uns die Sinnesorgane gar keine Kunde geben, obwohl sie dem Wesen nach sich vom sichtbaren Lichte nicht mehr unterscheiden, als beispielsweise das rote Licht vom grünen.

**§ 2. Die Ausbreitung der Schwingungen.** Wir werden sehen, daß die Strahlungsenergie einen Spezialfall der Schwingungsbewegung darstellt, die sich im Raume ausbreitet, und daher müssen wir einige physikalische Größen kennenlernen, welche diese Bewegung charakterisieren und von denen die Sonderheiten ihrer verschiedenen Abarten abhängen. Den von irgend einem Stoffe ausgefüllten Teil des Raumes können wir als Medium bezeichnen: Luft, Wasser usw. können als Beispiele dienen. Nehmen wir an, das Medium bestehe aus Teilchen, die sich zu bewegen und unter anderem von einer gewissen Mittellage aus nach beiden Seiten Schwingungen auszuführen vermögen. Als Beispiele solcher Schwingungsbewegung kann man die Schwingungen eines Pendels, einer Saite und anderes anführen. Eine solche Bewegung besteht aus einer Reihe von aufeinander folgenden einzelnen Schwingungen, deren jede in vier Abschnitte zerfällt, und zwar, ausgehend von der Mittellage des Teilchens: 1. in die Bewegung nach irgend

einer Seite bis zur größten Entfernung von der Mittellage; 2. Rückkehr zur Mittellage; 3. Bewegung nach der entgegengesetzten Seite bis zur weitesten Entfernung wie im ersten Viertel, und 4. Rückkehr zur Mittellage, worauf sofort das erste Viertel der zweiten Schwingung beginnt usw. Die größte Entfernung, auf die sich das Teilchen nach der einen und der anderen Seite von der Mittellage entfernt, heißt Schwingungsamplitude. Die Entfernung zwischen den beiden äußersten Lagen beträgt mithin zwei Amplituden. Die Zeit, in der das Teilchen eine ganze Schwingung ausführt, heißt Periode oder einfach Schwingungsdauer. Eine sehr wichtige Größe ist die Frequenz oder einfach Schwingungszahl, d. h. die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde. Es ist leicht einzusehen, daß die Periode, multipliziert mit der Schwingungszahl, eine Sekunde ergibt. Ist z. B. die Periode gleich  $\frac{1}{50}$  Sekunde, so beträgt die Frequenz 50, denn in einer Sekunde werden 50 Schwingungen ausgeführt. Multipliziert man die Periode ( $\frac{1}{50}$  Sekunde) mit der Schwingungszahl (50), so erhält man eine Sekunde.

Denken wir uns jetzt eine große Anzahl von Teilchen, die im betrachteten Medium längs einer geraden Linie gelagert sein mögen, und machen wir die Annahme, daß zwischen diesen Teilchen Kräfte wirken, unter deren Einfluß folgendes geschieht. Sobald ein Teilchen seine erste Schwingung beginnt, kann das benachbarte nicht mehr in Ruhe verbleiben. Es fängt auch zu schwingen an und wiederholt alle Bewegungen des ersten Teilchens, wenn auch mit einer gewissen, äußerst kleinen Verspätung. Nach dem zweiten beginnt das dritte Teilchen zu schwingen, dann das vierte usw., wobei jedes einzelne hinter dem vorhergehenden etwas zurückbleibt. So breitet sich die Schwingungsbewegung längs der Geraden aus, und zwar, allgemein genommen, nach beiden Seiten. Eine solche Gerade nennt man einen Strahl. Die Entfernung in der sich die Schwingungsbewegung in einer Sekunde ausbreitet, bestimmt eine Größe, die wir als Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungsbewegung bezeichnen wollen. Nehmen wir an, daß ein Teilchen zu schwingen begonnen hat und daß genau nach einer Sekunde ein von diesem 10 m weit entferntes Teilchen ebenfalls zu schwingen anfängt. In diesem Falle sagen wir, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit

der Schwingungsbewegung 10 m in der Sekunde beträgt. Nach zwei Sekunden umfaßt die Bewegung bereits 20 m, und nach fünf Sekunden beginnt ein vom ersten auf 50 m entferntes Teilchen zu schwingen.

Wir müssen noch die wichtigste Größe kennenlernen. Man nennt die Entfernung, auf die sich die Schwingungsbewegung während einer Periode fortpflanzt, Wellenlänge und bezeichnet sie mit dem griechischen Buchstaben  $\lambda$ .

Um das näher zu erläutern, kehren wir in Gedanken nochmals zu dem Punkte zurück, wo die erste Schwingung beginnt. Es möge das ein Punkt  $A$  sein. Hat  $A$  eine volle Schwingung ausgeführt, ist also seit Beginn derselben die Zeit einer Periode verstrichen, so hat sich die Schwingung bis zu einem Punkte  $B$  fortpflanzt. Die Entfernung zwischen  $A$  und  $B$  ist eben die Wellenlänge. Nun beginnt  $B$  seine erste Schwingung, während  $A$  bereits bei der zweiten angelangt ist, so daß  $B$  stets um eine Schwingung hinter  $A$  zurückbleibt. Beendet  $A$  seine zehnte Schwingung und beginnt die elfte, so hat  $B$  erst neun ausgeführt und setzt mit der zehnten ein. Wir müssen nur noch die Zusammenhänge zwischen den vier erwähnten Größen zu finden suchen. Es handelt sich um die Periode oder Schwingungsdauer, die Frequenz oder Schwingungszahl, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungsbewegung und die Wellenlänge  $\lambda$ . Vor allem ist es klar, daß die Schwingungsdauer (Periode) der Schwingungszahl (Frequenz) umgekehrt proportional ist. Verkürzt man die Dauer einer Schwingung z. B. um fünfmal, so wird die Anzahl der in einer Sekunde ausgeführten Schwingungen offenbar verfünffacht. In der Folge werden wir annehmen, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von der Dauer einer Schwingung oder, was dem Wesen nach dasselbe ist, von der Schwingungsfrequenz nicht abhängt. In diesem Falle überzeugt man sich leicht, daß die Wellenlänge der Schwingungsperiode proportional oder, was dasselbe ist, der Schwingungsfrequenz umgekehrt proportional ist. In der Tat haben wir die Wellenlänge als eine Entfernung definiert, um die sich die Schwingungsbewegung während einer Periode fortpflanzt. Verdreifacht man also die Dauer der Periode, so verdreifacht sich auch die Entfernung der Fortpflanzung, d. h. die Wellenlänge.

Zugleich wird aber die Schwingungszahl (Frequenz) dreimal kleiner. Man überzeugt sich leicht, daß auch noch folgende Beziehung gelten muß: Multipliziert man die Wellenlänge mit der Frequenz, so erhält man die Länge des Weges, der die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungen bestimmt. In der Tat, hat das erste Teilchen *A* eine Schwingung beendet, so hat sich die Bewegung bis zum Teilchen *B* erweitert, d. h. um einen Weg, der der Wellenlänge  $\lambda$  gleich ist. Nach Beendigung der zweiten Schwingung erstreckt sich die Bewegung bis zu einem Punkte, dessen Entfernung von *A*  $2\lambda$  beträgt. Nach Ausführung von drei, vier, fünf usw. Schwingungen hat die Bewegung Wege von  $3\lambda$ ,  $4\lambda$ ,  $5\lambda$  usw. zurückgelegt, die also drei-, vier- fünf- usw. mal größer sind als die Wellenlänge  $\lambda$ . Die Schwingungszahl, die das Teilchen *A* in einer Sekunde ausführt, ist der Frequenz gleich. Zugleich erstreckt sich aber die Bewegung selbst auf einen Weg, dessen Länge die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Bewegung bestimmt. Selbstverständlich muß dieser Weg die Wellenlänge so viel mal enthalten, wieviel Schwingungen das Teilchen *A* in einer Sekunde ausgeführt hat, d. h. die Anzahl der Wellen muß der Schwingungsfrequenz gleich sein.

Wir wollen das an einem Zahlenbeispiel erläutern. In einem gewissen Medium möge sich eine Schwingungsbewegung mit einer Geschwindigkeit von 500 m in der Sekunde ausbreiten, und jedes Teilchen möge in der Sekunde 25 Schwingungen ausführen, so daß die Frequenz gleich 25 ist. Dann beträgt eine Periode, d. h. die Dauer einer Schwingung,  $\frac{1}{25}$  Sekunde. In dieser Zeit breitet sich die Schwingung auf  $500 : 25 = 20$  m aus. Das ist die Wellenlänge  $\lambda$ , die 25mal (Frequenz) in der Länge von 500 m enthalten ist, die ihrerseits die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungen bestimmt. Vervierfacht man die Schwingungsfrequenz, so daß jedes Teilchen nun 100 Schwingungen in der Sekunde ausführt, so wird die Periode im gleichen Verhältnis kleiner, d. h. die Dauer einer Schwingung beträgt nur noch  $\frac{1}{100}$  Sekunde. Die Wellenlänge  $\lambda$  wird viermal kleiner und beträgt nur 5 m. Sie ist nun 100mal in der Länge von 500 m enthalten. Bei einer Frequenz von 5000 ist die Wellenlänge gleich 0,1 m und die Periode hat eine Dauer von  $\frac{1}{5000}$  Sekunde.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungen in irgend einem Medium hängt von den Eigenschaften der Teilchen dieses Mediums und von den Kräften, die zwischen den Teilchen wirken, ab. Wir hatten angenommen, daß sie von der Schwingungsfrequenz oder von der Wellenlänge unabhängig ist. Wir werden sehen, daß es Fälle gibt, in denen eine Abhängigkeit dennoch vorhanden ist. In einem gegebenen Medium sind unendlich viele und verschiedene Schwingungen möglich oder, wie wir kurz sagen wollen, verschiedene Strahlen, die sich voneinander durch ihre Schwingungsfrequenz oder ihre Wellenlänge unterscheiden. Die unbegrenzte Zahl der verschiedenartigen Erscheinungen, die man so erhält, kann man sich in eine ununterbrochene Reihe entwickelt denken, z. B. von links nach rechts, wobei nach rechts die Frequenz anwächst und folglich die Wellenlänge kleiner wird. Es ist allgemein bekannt, daß der Schall eine Schwingungsbewegung ist, die sich vor allem in der Luft ausbreitet, und daß von der Frequenz die sogenannte Höhe des Tones abhängt. Diese Höhe ist ein Begriff, der sich nicht definieren läßt. Die Reihe, von der wir eben sprachen, ist eine Reihe von Tönen, die nach ansteigender Höhe geordnet sind. Als Symbol kann eine Reihe von Saiten oder noch besser die Klaviatur eines Flügels dienen, obwohl die Saiten und Tasten natürlich nicht der unbegrenzten Zahl der möglichen Töne entsprechen, sondern nur den wenigen, die in der Musik gebraucht werden.

Man nennt eine Schwingung die Oktave einer anderen, wenn die Frequenz der ersten zweimal so groß und die Wellenlänge zweimal so klein sind wie die entsprechenden Größen der zweiten. In § 1 ist bereits erwähnt worden, daß Töne, die von unserem Hörorgan empfunden werden, eine Schwingungszahl von 16 bis 40000 in der Sekunde besitzen, und daß diese Reihe etwas über 11 Oktaven umfaßt. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Luft kann man 330 m in der Sekunde gleich setzen. Das gibt uns die Möglichkeit, die Wellenlängen der entsprechenden äußersten Töne zu ermitteln. Bei einer Frequenz von 16 Schwingungen in der Sekunde haben wir eine Wellenlänge  $\lambda = 330 \text{ m} : 16 = 20,6 \text{ m}$ . Bei 40000 Schwingungen ist  $\lambda = 330 \text{ m} : 40000 = 8,25 \text{ mm}$ . In der Musik verwendet man gewöhnlich Töne von 30 bis 4000 Schwin-

gungen, d. h. mit Wellenlängen von 11 m bis zu 8,25 cm. Die Töne der menschlichen Stimme haben 80 bis 1000 Schwingungen, was Wellenlängen von 4,1 m bis zu 33 cm entspricht. Akustische Schwingungen, die Altberg (s. § 1, Frequenz = 340 000) erhielt, haben eine Wellenlänge von etwa 1 mm, und die von Dieckmann (s. § 1, Frequenz = 780 000)  $\lambda = 0,42$  mm. Diese Wellenlänge ist 50 000mal so klein wie die bei 16 Schwingungen in der Sekunde.

**§ 3. Die Grunderscheinungen der Optik und die Geschichte der Frage nach dem Wesen des Lichtes.** Als Licht bezeichnen wir die Ursache, die es uns möglich macht, die uns umgebenden Gegenstände zu sehen. Die Abteilung der Physik, die sich früher mit Lichterscheinungen befaßte, heute jedoch den allgemeineren Erscheinungen der Strahlungsenergie gewidmet ist, heißt Optik.

Es gibt leuchtende und dunkle Körper. Man sagt, daß die ersteren Licht aussenden und daher stets sichtbar sind. Zu ihnen gehören die Sonne, die Fixsterne, die Flamme, stark erhitzte Körper und einige andere, die unter bestimmten Bedingungen leuchten, obwohl ihre Temperatur normal oder sogar sehr niedrig ist. Das sind z. B. die phosphoreszierenden Körper (s. § 5), die in der Dunkelheit leuchten, wenn sie vorher stark belichtet worden waren. Weiterhin Gase, die von elektrischen Strömen durchflossen werden, organische Stoffe, wie z. B. faulendes Holz, einige Tiefseebewohner und die Organismen, welche das Meerleuchten hervorrufen. Die dunklen Körper sind für uns an und für sich unsichtbar. Sie werden erst sichtbar, wenn sie beleuchtet werden, d. h. nur wenn leuchtende Körper anwesend sind. Dazu gehören der Mond, die Planeten und fast alle Körper auf der Erdoberfläche. Das von leuchtenden und beleuchteten Körpern ausgesandte Licht pflanzt sich geradlinig fort, und man nennt diese Geraden Lichtstrahlen.

Die Lichtstrahlen können sich voneinander sowohl quantitativ als auch qualitativ unterscheiden. Der erstere Unterschied besteht darin, daß die Strahlen verschiedene Helligkeitsgrade besitzen können oder, wie man noch zu sagen pflegt, verschiedene Intensitäten oder auch Lichtstärken. Dieselben Bezeichnungen charakterisieren auch die Lichtquellen. Eine besondere Abteilung der Lichtlehre, die man Photometrie nennt,

vergleicht die Lichtstärke der verschiedenen Quellen und die Beleuchtungsgrade der verschiedenen Körper. Qualitativ unterscheiden sich die Strahlen voneinander durch ihre Farbe. Es gibt verschiedenfarbige Strahlen; der Begriff „Farbe“ läßt sich analog der Höhe des Tones nicht definieren. Das Licht, welches von der Sonne und von allen bis auf eine hohe Temperatur (Weißglut) erhitzten Körpern ausgesandt wird, nennt man weißes Licht. Die entsprechenden Strahlen bezeichnet man als weiße.

Alle Stoffe teilt man nach ihrem Verhalten gegenüber jedem der verschiedenfarbigen Strahlen in durchsichtige und undurchsichtige ein. Es gibt Körper, die für alle Lichtstrahlen durchsichtig sind. Dazu gehören die Luft, das Wasser, der Spiritus, gewöhnliches Glas, Glimmer, Quarz, Salpeter, Steinsalz und verschiedene Flüssigkeiten und Kristalle. Die meisten Stoffe sind aber für alle Strahlen undurchsichtig. Hierher gehören z. B. nicht zu dünne Metallschichten, Holz, Ziegelsteine, fast alle Mineralien usw. Es gibt aber auch solche Stoffe, die für einige Strahlen durchsichtig, für andere dagegen undurchsichtig sind: sie besitzen eine innere Färbung. So ist z. B. rotes (Rubin-) Glas für rote Strahlen durchsichtig, für grüne dagegen undurchsichtig. Eine starke Kupfervitriollösung läßt blaue Strahlen durch, nicht aber rote. Wir sehen also, daß die Durchsichtigkeit der Ausdruck einer gewissen Beziehung ist zwischen dem gegebenen Stoff und dem gegebenen Strahl. Treffen die Lichtstrahlen auf die Oberfläche irgend eines Körpers, so wird ein Teil reflektiert, d. h. zurückgeworfen, ein anderer dringt aber in das Innere des Körpers. In undurchsichtigen Körpern wird dieser zweite Teil „absorbiert“, d. h. er hört als Licht zu existieren auf. Auch durchsichtige Körper absorbieren, jedoch sehr schwach, so daß fast das ganze ins Innere eingedrungene Licht durch sie hindurchgeht. Wird aber Licht absorbiert, so entsteht an seiner Stelle eine andere Energieart (3. Kap.), und zwar in den meisten Fällen Wärmeenergie, zuweilen aber auch eine andere, beispielsweise chemische. Da Energie nur auf Kosten irgend eines Energievorrats entstehen kann, so ist offenbar das Licht eine der verschiedenen Energiearten. Die Lichtstrahlen sind Ströme einer besonderen Energieart, die dabei zweifellos kinetisch ist,

denn von einer Energie der Lage (potentiellen) kann hier offenbar keine Rede sein.

Das Licht breitet sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit aus, die vom betreffenden Medium abhängt. Im Vakuum, d. h. im Raume, der keine Materie enthält, z. B. im interstellaren Raume, beträgt die Lichtgeschwindigkeit für Strahlen aller Farben

$$300\,000 \text{ km} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm in der Sekunde.}$$

Nur um ein Weniges geringer ist diese Geschwindigkeit in Luft und überhaupt in Gasen. In Flüssigkeiten und in festen Körpern jedoch ist sie bedeutend kleiner als im Vakuum. So beträgt die Lichtgeschwindigkeit im Wasser drei Viertel, im Glas zwei Drittel, im Diamanten zwei Fünftel der Geschwindigkeit im Vakuum. Dabei zeigt es sich, daß sie von der Farbe der Strahlen abhängt. In den meisten Stoffen ist die Geschwindigkeit der roten Strahlen am größten. Es folgen in abfallender Reihe orange, gelbe, grüne, hellblaue, dunkelblaue und endlich violette Strahlen, die die kleinste Geschwindigkeit besitzen. Diese Reihe kann aber nicht auf alle Stoffe bezogen werden, denn es gibt solche, für welche die Ordnung anders ist. Aber auch in ihnen hängt die Geschwindigkeit von der Farbe der Strahlen ab.

Wir haben nun einige der Grundeigenschaften der Lichtstrahlen aufgezählt. Bevor wir zur Betrachtung der weiteren Eigenschaften übergehen, wollen wir uns eine wichtige Frage stellen: „Was ist das Licht?“ Wie könnte man den Umstand erklären, daß wir die uns umgebenden Gegenstände sehen? Schon im Altertum hat man versucht, diese zweite Frage, die mit der ersten nicht ganz übereinstimmt, zu beantworten. Die sonderbare Lehre von Augenstrahlen besagte, daß die Strahlen nicht von den Gegenständen zum Auge gehen, sondern im Gegenteil vom Auge zu den Gegenständen. Es sind sozusagen Fühler, mit denen das Auge den Gegenstand betastet und ihn so genau zu erkennen vermag. Diese Idee findet man bei vielen Forschern des Altertums, wenn auch mit einigen nicht sehr wesentlichen Variationen. Man begegnet ihr z. B. bei Pythagoras (580 bis 500 v. Chr.), Empedokles (492 bis 432), Plato (429 bis 348), Epikur, Hipparch (zweites Jahrhundert v. Chr.).

Euklides (um 300 v. Chr.), Lucretius, Heron (um 200 v. Chr.), Seneca (12 bis 66 n. Chr.), Ptolomäus (70 bis 147) u. a.

Diese Forscher sprechen alle von Fühlern, die das Auge aussendet, aber z. B. Empedokles gibt die Möglichkeit zu, daß auch von den Gegenständen Strahlen ausgehen, die sich mit den Augenstrahlen vermischen und so eine Abbildung der Gegenstände ergeben. Vielleicht nahm Empedokles auch an, daß die Gegenstände ihre Abbildung aussenden, die auf die Augenstrahlen trifft und so das Sehen ermöglicht. Derselben Anschauung waren auch der Astronom Hipparch und Plato. Aristoteles hat sich ganz entschieden gegen die Augenstrahlen ausgesprochen. Er schreibt folgendermaßen: „Wenn wir nur darum sehen, weil das Auge, wie eine Laterne, Licht aussendet, so ist es nicht zu verstehen, warum wir in der Dunkelheit nicht sehen können. Anzunehmen, daß das Licht erlischt, sobald es in die Dunkelheit gerät, wäre unsinnig.“ Trotz dieser offenbar ganz richtigen Entgegnung findet man die Idee von den Augenstrahlen noch bei Forschern späterer Zeiten, wie z. B. beim großen Astronomen Ptolomäus. Ihren Spuren begegnet man sogar noch im Mittelalter.

Alhazen, ein arabischer Forscher, der im elften Jahrhundert in Spanien lebte, hat, wie es scheint, als erster darauf hingewiesen, daß an Stelle eines Strahles, den das Auge aussendet, angenommen werden muß, daß von jedem Punkte eines Gegenstandes unzählige Strahlen ausgehen. Sie bilden einen Kegel mit dem betreffenden Punkte als Spitze und der Pupille unseres Auges als Grundfläche.

Wir gehen nun zu der Frage über: „Was ist das Licht?“ Um das Wesen des Lichtes zu erklären, sind drei Haupthypothesen aufgestellt worden, auf denen die Theorien der optischen Erscheinungen aufgebaut wurden. Diese drei Theorien sind: 1. die Theorie der Emanation (Aussendung), die ihre Entwicklung besonders Newton (1669, 1676, 1703) zu verdanken hat, 2. die Theorie der Ätherschwingungen, begründet von Huyghens (1678, 1690) und 3. die von Maxwell (1873) aufgestellte elektromagnetische Theorie. An dieser Stelle sollen nur die beiden ersten betrachtet werden.

Die Theorie der Emanation setzt voraus, daß leuchtende Körper einen besonderen Lichtstoff aussenden, der sich mit der bereits erwähnten gewaltigen Geschwindigkeit geradlinig fort-

pflanzt und, auf das Auge treffend, eine Empfindung hervorruft. Diesen Gedanken findet man schon bei Demokrit, der sich in bestimmter Weise gegen die Augenstrahlen ausgesprochen hat, in der Annahme, das Sehen werde durch winzige Atome hervorgerufen, die, von den leuchtenden Körpern ausgehend, auf das Auge treffen. Späterhin behauptete Gassendi, der Verfechter der Atomtheorie (S. 46), auch das Licht bestehe aus Atomen, die von leuchtenden Körpern ausgeschleudert werden. An diese Ansicht hielt sich auch teilweise Descartes, obwohl seine diesbezüglichen Gedanken in äußerst unklare Form gekleidet und daher sehr schwer zu verstehen sind.

Als Schöpfer der Theorie der Emanation muß Newton betrachtet werden, der alle damals bekannten optischen Erscheinungen, von denen viele von ihm selbst entdeckt oder erforscht waren, auf Grund der Hypothese der Emanation zu erklären suchte. Allerdings mußte er verschiedene Zusatzhypothesen einführen, die sich auf die Eigenschaften der Lichtteilchen bezogen. Um z. B. die Verschiedenfarbigkeit der Strahlen zu deuten, mußte Newton annehmen, daß die Lichtteilchen nicht von gleicher Größe sind. Die größten bilden rote und die kleinsten violette Strahlen. Um das Jahr 1675 wurde er scheinbar schwankend und war nahe dran, sich der Theorie der wellenförmigen Bewegung zuzuneigen, später aber gibt er wieder der Theorie der Emanation den Vorzug. Übrigens findet man noch in seiner 1704 erschienenen „Optik“ Spuren jenes Schwankens. Seine Schüler und Nachfolger machten sich jedoch den ganzen Inhalt der Optik zum Dogma. Mehr als 100 Jahre beherrschte die Theorie der Emanation die Wissenschaft, und ein endgültiger Beweis für ihre Haltlosigkeit ist, wie wir sehen werden, erst im Jahre 1850 geliefert worden. Einen wichtigen Umstand wollen wir hervorheben: Die Theorie der Emanation führt zum Ergebnis, daß im Innern der durchsichtigen Körper das Licht sich schneller fortpflanzt als im Vakuum.

Im Laufe des 18. Jahrhunderts haben sich nur zwei Forscher gegen die Theorie der Emanation ausgesprochen. Es waren das der berühmte Mathematiker Leonhard Euler (1707 bis 1783) und der große russische Forscher M. W. Lomonossow (1711 bis 1765).

Wir wenden uns der Theorie der Schwingungsbewegung zu, die auf der Hypothese von der Existenz eines elastischen Äthers aufgebaut ist. Es wird angenommen, daß der ganze Weltraum sowie alle Zwischenräume zwischen den Teilchen der Materie von einem besonderen Stoff ausgefüllt sind, der bei sehr hoher Elastizität nur geringe Dichte besitzt. Diesen Stoff nennt man Äther. Er besteht aus winzigen Teilchen, die man als Ätheratome betrachten kann. In diesem Äther kann sich die in § 2 beschriebene Schwingungsbewegung ausbreiten. Die geraden Linien, längs denen sich die Schwingungen fortpflanzen, sind eben die Lichtstrahlen, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist die auf S. 129 erwähnte Lichtgeschwindigkeit. In leuchtenden Körpern erfolgt eine Erschütterung der Ätherteilchen, die infolge der Elastizität des Äthers mit so hoher Geschwindigkeit nach allen Richtungen von Ort zu Ort übertragen wird. Auf diese Weise ist der Äther Träger der Lichtenergie, wie die Luft ein Träger der Schallenergie ist.

Interessant ist es, daß Aristoteles den Gedanken ausgesprochen hat, zwischen dem Gegenstand und dem Auge müsse ein besonderes Medium vorhanden sein, das uns ermöglicht, den Gegenstand zu sehen, ähnlich, wie wir dank der Luft Töne hören können. Viel später spricht Grimaldi (1618 bis 1663), wenn auch noch in sehr unklarer Form, vom Lichte, als einem leichten Stoff, der sich in einer wellenförmigen Bewegung befindet. Darauf hat Hooke (1635 bis 1722) ganz entschieden die Behauptung aufgestellt, das Licht sei eine in einem besonderen Medium sich ausbreitende wellenförmige Bewegung. Im Jahre 1672 hat er sich sogar dahin ausgesprochen, daß die Schwingung senkrecht zum Strahle verlaufe, was erst zu Anfang des 19. Jahrhunderts endgültig festgestellt worden ist.

Der Schöpfer dieser umfangreichen und bis in die kleinsten Einzelheiten ausgearbeiteten Theorie, die auf der Hypothese der Ätherschwingungen aufgebaut war, ist der große holländische Forscher Huyghens (1629 bis 1695). Sein in dieser Frage wichtigstes Werk erschien im Jahre 1678, neun Jahre nach dem Werke von Newton, der sich an die Theorie der Emanation hielt. Leider war die Autorität von Newton so groß, daß die Theorie von Huyghens auf die Zeitgenossen keinen Eindruck machte, und im

Laufe des 18. Jahrhunderts findet sie fast nur in Euler und Lomonossow Verteidiger. Ein Umschwung zugunsten der Schwingungstheorie erfolgte erst zu Anfang des 19. Jahrhunderts, als die Arbeiten von Young (1801 bis 1803) und besonders die des französischen Forschers Fresnel (1788 bis 1827) veröffentlicht wurden. In einer ganzen Reihe von genialen Arbeiten (begonnen 1815) hat Fresnel gezeigt, wie sogar die kompliziertesten optischen Erscheinungen in der Schwingungstheorie ihre Erklärung finden. Jedoch ergaben sich die Anhänger der Emanationstheorie noch lange nicht. Im Gegenteil versuchten sie die damals neu entdeckten Lichterscheinungen zu erklären, indem sie zahlreiche Zusatzhypothesen bezüglich der Eigenschaften der Lichtteilchen einführten. Die Zahl der Verteidiger dieser alten Theorie schmolz zusammen, doch in den dreißiger Jahren halten sich noch einige hervorragende Forscher an die Emanationstheorie. Die Entscheidung fiel erst im Jahre 1850. Es ist schon gesagt worden, daß nach der Emanationstheorie die Lichtgeschwindigkeit im Innern der durchsichtigen Körper größer sein muß als im Vakuum. Die Schwingungstheorie führte zum entgegengesetzten Resultat: die Lichtgeschwindigkeit ist am größten im Vakuum. Der französische Forscher Foucault (1819 bis 1868) führte im Jahre 1850 einen berühmt gewordenen Versuch aus, der ihm die Möglichkeit gab, die Geschwindigkeiten des Lichtes in Luft und in Wasser miteinander zu vergleichen. Es erwies sich, daß sie im Wasser kleiner ist als in Luft, ein Umstand, der der Newtonschen Theorie den Todesstoß gab.

Auf die weiteren Einzelheiten der Entwicklung der Theorie der Ätherschwingungen wollen wir nicht eingehen und nur einen Umstand hervorheben. Huyghens glaubte, daß die Schwingungen der Ätherteilchen in Richtung des Strahles verlaufen. Diese sogenannten Längsschwingungen finden wir in den akustischen Erscheinungen. Im Jahre 1819 haben jedoch Fresnel und Arago (1786 bis 1853) unumstößlich bewiesen, daß die Lichtschwingungen Querschwingungen sind, d. h. daß die Ätherteilchen längs gerader Linien senkrecht zum Strahle schwingen. Daraus ergibt sich der wichtige Schluß, daß für Längsschwingungen nur eine Schwingungsrichtung in Frage kommt, und zwar die Richtung des Strahles, den die schwingenden Teilchen nicht

verlassen können. Bei Querschwingungen dagegen gibt es in jedem Punkte des Strahles eine unendlich große Menge von Richtungen, in denen die Ätherteilchen ihre Schwingungen ausführen können. Alle diese Richtungen verlaufen senkrecht zum Strahle. Angenommen, wir haben einen horizontalen Strahl, der auf den Beobachter zu gerichtet ist. Es können dann die Schwingungen z. B. von oben nach unten oder von rechts nach links, oder unter einem anderen Winkel erfolgen, jedoch stets in der vertikalen Ebene, senkrecht zum Strahle. Könnten wir diese Schwingungen sehen, so würde uns ihre Gesamtheit als eine sternförmige Figur erscheinen, die sich von einem gegebenen Punkte des Strahles aus nach allen Richtungen ausbreitet.

Die letzte der drei auf S. 130 erwähnten Theorien, die elektromagnetische Lichttheorie, werden wir später betrachten (s. § 12). In der Folge werden wir uns an die Huyghenssche Schwingungstheorie halten. Alles, was wir sagen werden, behält seine Gültigkeit auch in der elektromagnetischen Theorie, die eine besondere Art der Schwingungstheorie darstellt, obwohl sie nicht auf Ätherschwingungen beruht. Selbstverständlich werden wir die Lichterscheinung so erklären, wie es Young, Fresnel und ihre Nachfolger taten. Es ist interessant zu bemerken, daß Huyghens z. B. das Vorhandensein von verschiedenfarbigen Strahlen nicht erklären konnte.

**§ 4. Das Licht als eine sich ausbreitende Wellenbewegung. Die Spektra.** In § 2 haben wir die Erscheinung der Schwingungsbewegung, die sich in irgend einem Medium ausbreitet, betrachtet und lernten die für diese Erscheinung charakteristischen Größen kennen. Es waren dies die Amplitude, die Dauer (Periode) und Frequenz (Anzahl pro Sekunde) der Schwingungen, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Wellenlänge  $\lambda$ . Diese Größen hängen miteinander zusammen, und wir wollen uns erinnern, daß die Wellenlänge  $\lambda$  der Periode proportional und der Schwingungsfrequenz umgekehrt proportional ist, und daß die Wellenlänge mit der Frequenz multipliziert, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungen ergibt. Die Frequenz erhält man, wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die Wellenlänge dividiert.

Nach der Theorie von Huyghens ist das Licht eine sich ausbreitende Schwingungsbewegung, daher kann man alles, was in § 2 ausgeführt worden ist, auf die Lichterscheinungen anwenden. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungen ist eben die Lichtgeschwindigkeit, d. h. sie beträgt 300 000 km oder  $3 \cdot 10^{10}$  cm in einer Sekunde (S. 129). Die Wellenlänge des Lichtstrahles ist sehr gering und wird daher, um kleine Brüche zu vermeiden, in ganz besonderen Längeneinheiten ausgedrückt. Man benutzt dazu den tausendsten Teil eines Millimeters und bezeichnet ihn mit dem griechischen Buchstaben  $\mu$ . Zuweilen wurde auch die Einheit  $\mu\mu$  angewandt, die ein Millionstel Millimeter bedeutet. Heute mißt man die Länge des Lichtstrahles gewöhnlich mit einer Längeneinheit, die zu Ehren des schwedischen Gelehrten Anders Jones Ångström (1814 bis 1874) den Namen Angström erhielt. Sie ist gleich dem zehnmillionsten Teil eines Millimeters und wird mit dem Buchstaben A bezeichnet (richtiger wäre es gewesen, das schwedische Å zu wählen, das wie O ausgesprochen wird und dementsprechend Ongström zu schreiben). Es ist also

$$A = 0,1 \mu\mu = \frac{1}{10\,000} \mu = 10^{-7} \text{ mm.}$$

Die Wellenlänge  $\lambda$  der Lichtstrahlen liegt zwischen  $0,76 \mu$  und  $0,4 \mu$  oder zwischen 7600 A und 4000 A.

Die verschiedenfarbigen Strahlen unterscheiden sich durch ihre Periode oder, was auf dasselbe hinausläuft, durch ihre Frequenz, oder schließlich durch ihre Wellenlänge. Die Farbe des Strahles wird mithin durch seine Wellenlänge oder, was anschaulicher ist, durch die Schwingungszahl bestimmt. Die Farbe spielt also in der Optik genau dieselbe Rolle wie die Höhe des Tones in der Akustik. Wie man die Töne nach anwachsender Schwingungsfrequenz, d. h. nach anwachsender Höhe oder, was dasselbe besagt, nach abnehmender Wellenlänge, in eine ununterbrochene Reihe entwickeln kann, so kann man sich auch alle Lichtstrahlen nach anwachsender Schwingungsfrequenz, d. h. nach abnehmender Wellenlänge in einer Reihe geordnet denken. Es ist das dieselbe Reihe, die auf S. 129 erwähnt wurde, und die alle Lichtstrahlen nach abnehmender Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den meisten durchsichtigen Medien enthält. Wir schrieben sie

in folgender Reihenfolge: rote, orange, gelbe, grüne, blaue, indigo und violette Strahlen. Das sind aber nur die Hauptfarben, zwischen denen sich unzählige Strahlen mit Zwischenfarben befinden, die man bei einem allmählichen Übergang der einen der sieben Farben zur nächsten erhält. Der äußerste, d. h. der letzte Strahl dieser Reihe am roten Ende besitzt die größte Wellenlänge,  $\lambda = 0,76 \mu = 7600 \text{ \AA}$ , während für den äußersten violetten Strahl  $\lambda = 0,4 \mu = 4000 \text{ \AA}$  ist. Man ersieht daraus, daß die Gesamtheit der verschiedenen Lichtstrahlen nicht einmal eine ganze Oktave umfaßt. Dieselbe wäre voll, wenn der äußerste violette Strahl eine Wellenlänge von  $\lambda = 3800 \text{ \AA}$  (die Hälfte von  $7600 \text{ \AA}$ ) besäße, oder wenn der äußerste rote ein  $\lambda = 8000 \text{ \AA}$  hätte (das Doppelte von  $4000 \text{ \AA}$ ). Die Länge eines Millimeters enthält beispielsweise 1300 Wellenlängen des äußersten roten und 2500 des äußersten violetten Strahles. Der Einfachheit wegen merke man sich, daß die Wellenlänge eines Lichtstrahles etwa  $\frac{1}{2000}$  mm beträgt.

Ist die Wellenlänge bekannt, so ist es nicht schwer, die Frequenz, d. h. die Schwingungszahl pro Sekunde zu berechnen. Man braucht nur die Lichtgeschwindigkeit durch die Wellenlänge zu dividieren, d. h. festzustellen, wievielmals die winzige Wellenlänge in der ungeheuer großen Strecke enthalten ist, die das Licht in einer Sekunde zurücklegt. Da nun die Wellenlänge  $\frac{1}{2000}$  mm beträgt, die Lichtgeschwindigkeit dagegen  $300\,000 \text{ km}$ , so erhält man Zahlen, die man sich überhaupt nicht vorstellen kann, und zwar:

Für den äußersten roten Strahl  $4 \cdot 10^{14}$  Schwingungen pro Sekunde.

Für den äußersten violetten Strahl  $7,5 \cdot 10^{14}$  Schwingungen pro Sekunde.

Die Frequenz ist mithin eine Zahl mit 14 Nullen und beträgt 400 bis 750 Billionen in der Sekunde. Man ersieht daraus, daß im Gebiete der optischen Erscheinungen die Schwingungen eine bedeutend höhere Frequenz besitzen als in den akustischen. Die Frequenz der langsamsten Lichtschwingungen, die das Auge empfindet, übertrifft um das Zehntausendmillionenfache die Frequenz der raschesten Tonschwingungen, die vom Ohre aufgenommen werden, und um das Fünfhundertmillionenfache die

raschesten akustischen Schwingungen, die man bis jetzt erreichen konnte (S. 121).

In § 3 haben wir einige Grundeigenschaften der Lichtstrahlen betrachtet. Jetzt wenden wir uns noch einigen besonders wichtigen Lichterscheinungen zu. Wir übergangen die Reflexion der Lichtstrahlen durch glatte Oberflächen, eine Erscheinung, welche die Eigenschaften der Spiegel erklärt. Dagegen wollen wir auf die Brechung der Strahlen etwas näher eingehen. Sie besteht darin, daß der Lichtstrahl die Richtung seiner Ausbreitung ändert, wenn er aus einem Stoff in einen anderen übergeht.

Es möge z. B. ein Strahl aus Luft in irgend ein für ihn durchsichtiges Medium, beispielsweise Wasser, Glas usw. übergehen. In Fig. 2 bezeichnet  $PQ$  die obere glatte und ebene Fläche eines durchsichtigen Stoffes, z. B. einer Glasscheibe, so daß man unterhalb  $PQ$  Glas und oberhalb Luft hat.  $MN$  ist eine zu  $PQ$  senkrechte Gerade, die man Normale nennt. Weiter sei vorausgesetzt, daß der Lichtstrahl in Luft die Richtung  $AB$  besitzt. Im Punkte  $B$  trifft er auf die Oberfläche des Glases, dringt in dasselbe ein und verläuft im Innern in der Richtung  $BC$ , die, wie aus der Figur ersichtlich, nicht als eine gerade Fortsetzung von  $AB$  betrachtet werden kann.

Der Strahl wird scheinbar im Punkte  $B$  gebrochen und nähert sich der Normalen. Allgemein läßt sich sagen, daß beim Übergang aus Luft in ein flüssiges oder festes Medium der Lichtstrahl gebrochen wird und der Normalen näher kommt. Eine Brechung findet nicht statt, wenn der Strahl die Richtung der Normalen  $MB$  besitzt. In diesem Falle verläuft er im Glase nach  $BN$ . Läßt man in Richtung  $AB$  (Fig. 3) nacheinander verschiedenfarbige Strahlen auf das Glas treffen, z. B. zuerst einen roten, dann einen orangefarbenen, darauf einen gelben, grünen, blauen, indigo und schließlich einen violetten, so zeigt es sich, daß sie alle verschieden gebrochen werden.

Fig. 2.

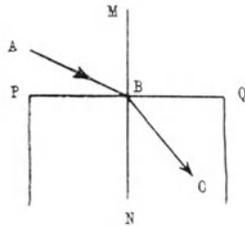
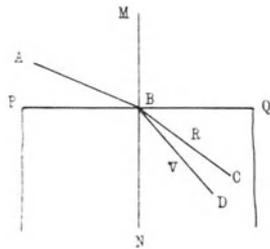


Fig. 3.



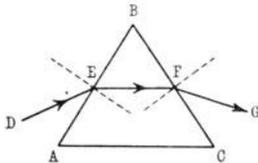
Sie verlaufen im Glase in verschiedenen Richtungen, und zwar wächst die Brechung vom roten zum violetten Strahl. Die geringste Brechung erfährt der rote, die größte der violette Strahl. In Fig. 3 sind nur diese beiden äußeren Strahlen angegeben: der rote ( $R$ )  $BC$  und der violette ( $V$ )  $BD$ . Die übrigen liegen zwischen  $BC$  und  $BD$ . Bereits Huyghens hat bewiesen, daß der Strahl um so stärkere Brechung erfahren muß, je langsamer er sich im zweiten Medium, z. B. im Glase, ausbreitet. Daher ist hier die Reihenfolge der Farben dieselbe wie auf S. 129. Derselben Reihenfolge begegneten wir jedoch auch auf S. 135, wo die Strahlen nach anwachsender Frequenz, d. h. nach abnehmender Wellenlänge, geordnet waren. Das gibt uns ein äußerst wichtiges Resultat: Der Lichtstrahl wird um so stärker gebrochen, je größer seine Frequenz, d. h. je kürzer seine Wellenlänge ist. In einigen Sonderfällen bewahrheitet sich dieses Gesetz nicht, doch haben wir keine Veranlassung, dieselben zu betrachten.

Tritt ein Strahl aus einem flüssigen oder festen Medium in die Luft aus, so entfernt er sich von der Normalen. Hat er z. B. in Fig. 2 im Glase die Richtung von  $C$  nach  $B$ , so geht er in Luft von  $B$  nach  $A$ . Man erhält eine stärkere Ablenkung des

Fig. 4.



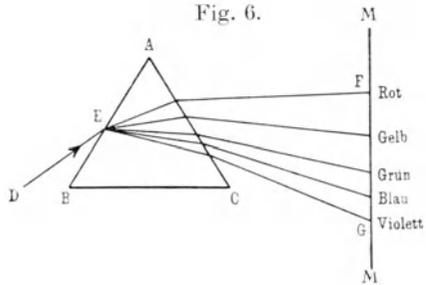
Fig. 5.



Strahles von seiner ursprünglichen Richtung, wenn man ihn z. B. durch ein dreieitiges Glasprisma gehen läßt. Ein solches ist in Fig. 4 abgebildet, während in Fig. 5 das Dreieck  $ABC$  den Querschnitt des Prismas darstellt. Es möge  $DE$  der Strahl sein, der auf die Seite  $AB$  des Prismas trifft. Tritt er in das Glas ein, so nähert er sich der Normalen und verläuft im Innern von  $E$  nach  $F$ . Beim Austritt dagegen entfernt er sich von der Normalen und hat in der Luft die Richtung  $FG$ . Die beiden Brechungen addieren sich sozusagen. Die ganze Richtungsänderung hängt vom Stoffe des Prismas und von der Art, d. h. der Farbe des Strahles ab. Am wenigsten wird der rote abgelenkt, am stärksten der violette.

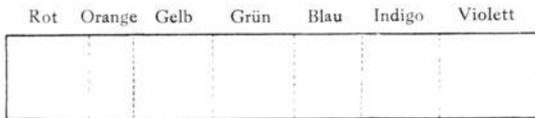
Wir hatten bis jetzt angenommen, daß wir es mit farbigen Strahlen zu tun haben. Machen wir jetzt die Voraussetzung, es

treffe auf ein Prisma, dessen Querschnitt durch das Dreieck  $ABC$  (Fig. 6) dargestellt sein möge, ein weißer Strahl, z. B. von einer Kerzenflamme, einer elektrischen Lampe oder überhaupt von einem glühenden Körper. Es erweist sich, daß dieser Strahl beim Eintritt in das Prisma in eine unendlich große Zahl von verschiedenfarbigen Strahlen zerfällt (in der Figur sind nur fünf angegeben), die nach Austritt noch weiter auseinandergehen. Stellt man in ihre Bahn einen weißen Schirm  $MM$ , so erblickt man auf demselben einen Streifen  $FG$ , der die sieben Farben mit den unzähligen, bereits erwähnten Übergängen enthält. In  $F$  befindet sich das rote, in  $G$  das violette Ende. Fig. 6 zeigt nur drei Zwischenstrahlen. Der ganze Streifen ist in Fig. 7 abgebildet; er ist in sieben Abschnitte eingeteilt, deren Grenzen mehr oder weniger willkürlich angegeben sind, da die Farben allmählich ineinander übergehen. Die hier beschriebene Erscheinung ist erstmals von Newton um das Jahr 1668 genau erforscht worden.



In  $F$  befindet sich das rote, in  $G$  das violette Ende. Fig. 6 zeigt nur drei Zwischenstrahlen. Der ganze Streifen ist in Fig. 7 abgebildet; er ist in sieben Abschnitte eingeteilt, deren Grenzen mehr oder weniger willkürlich angegeben sind, da die Farben allmählich ineinander übergehen. Die hier beschriebene Erscheinung ist erstmals von Newton um das Jahr 1668 genau erforscht worden.

Fig. 7.



Er erklärte sie damit, daß der weiße Strahl eine Mischung von allen farbigen Strahlen darstellt, in die er durch ein Prisma zerlegt wird. Der vorhin erwähnte Streifen wird als Spektrum des weißen Lichtes bezeichnet. Er ist sozusagen eine Verwirklichung der Reihe von verschiedenfarbigen Strahlen, die nach abnehmender Fortpflanzungsgeschwindigkeit im nicht leeren Raume oder, was dasselbe ist, nach abnehmender Wellenlänge und zunehmender Schwingungsfrequenz geordnet sind. Das ganze Spektrum umfaßt weniger als eine Oktave (S. 136). Die Farben der Strahlen, die das Spektrum bilden, heißen Spektralfarben. Es sind reine oder einfache Farben,

d. h. solche, die sich nicht in noch weitere Bestandteile zerlegen lassen. Das ihnen entsprechende Licht wird gleichfalls als einfaches oder monochromatisches (einfarbiges) bezeichnet. Strahlen, die man durch Vermischen von verschiedenen Spektralstrahlen in beliebigen Proportionen erhält, nennt man zusammengesetzte. Die unzähligen verschiedenen Farben der Körper sind in den meisten Fällen zusammengesetzt, und man erhält sie durch Kombination von bestimmten einfachen, d. h. Spektralstrahlen.

Die Analyse eines zusammengesetzten Strahles erfolgt mit Hilfe eines Prismas. Ein Blick auf das so gewonnene Spektrum genügt, um alle Bestandteile des gegebenen Strahles festzustellen. Das Kapitel der Optik, das die Erforschung der Bestandteile des zusammengesetzten Lichtes zum Gegenstand hat, heißt Spektralanalyse. Die Apparate, die man zu diesem Zwecke verwendet, nennt man Spektroskope, Spektrometer und, wenn sie zum Photographieren der Spektre dienen, Spektrographen.

Den Ausdruck „Spektrum“ bezieht man übrigens nicht nur auf das Licht, sondern auch auf die Lichtquelle. So spricht man vom Spektrum der Sonne, der Sterne, der Kometen, vom Spektrum glühender oder überhaupt leuchtender Körper. Weiterhin haben verschiedene Gase ein Spektrum, womit besagt werden soll, daß sie z. B. mit Hilfe des elektrischen Stromes in einen Zustand versetzt sind, in dem sie leuchten. Man spricht endlich vom Spektrum der Metalle und anderer Stoffe, z. B. des Eisens, Quecksilbers usw. Gemeint sind dabei die leuchtenden Dämpfe dieser Stoffe.

Weißer Strahlen liefern ein ununterbrochenes Spektrum, das alle Farben von Rot bis Violett aufweist. Andere dagegen können Spektre ergeben, in denen einige Farben fehlen, d. h. durch dunkle Streifen ersetzt sind, oder auch aus einzelnen hellen parallelen, vielfarbigem Linien bestehende Spektre liefern. In letzterem Falle zeigen die Linien, daß die betreffende Lichtquelle nur einige Strahlen von bestimmter Brechung oder, was dasselbe ist, von bestimmter Wellenlänge aussendet. Das sind die sogenannten Strahlungsspektre. Sie ergeben die Analyse, d. h. stellen die Bestandteile der von verschiedenen Lichtquellen ausgehenden Strahlen fest. Nicht minder wichtig sind die Ab-

sorptionsspektren, die da anzeigen, welche Strahlen von den Stoffen absorbiert werden. Man erhält sie, indem man weiße Strahlen, die ein ununterbrochenes Spektrum liefern, zuerst durch einen zu untersuchenden Stoff und dann durch ein Prisma gehen läßt. Es zeigt sich sofort, welche Strahlen der Stoff absorbiert, denn man bemerkt, daß einige Teile des Spektrums fehlen, andere wieder mehr oder weniger geschwächt erscheinen. Alles in allem gibt uns die Spektralanalyse die Möglichkeit, mit größter Ausführlichkeit und Genauigkeit festzustellen, erstens, welche Lichtschwingungen der gegebene leuchtende Körper aussendet, und zweitens, welche Schwingungen von einem Stoffe absorbiert werden.

**§ 5. Einige Eigenschaften der Lichtstrahlen.** Die Zerlegung des Lichtes in seine Bestandteile gestattet uns, vier Lichtwirkungen kennenzulernen, die für uns bei Betrachtung der verschiedenen Arten der Strahlungsenergie von großer Wichtigkeit sein werden. Mit diesen vier Wirkungen wollen wir uns jetzt befassen.

1. Die Wärmewirkung. Auf S. 68 ist bereits gesagt worden, daß das Licht eine der vielen Energiearten darstellt. Werden die Lichtstrahlen von irgend einem Körper absorbiert, so entsteht eine andere Energieart, und zwar in den meisten Fällen Wärmeenergie. Die betreffenden Körper werden dabei warm. Bemerkte sei, daß Ruß die Strahlen fast vollkommen absorbiert und ihre Energie in Wärme wandelt. Jetzt drängt sich uns eine wichtige Frage auf. Angenommen, wir haben es mit weißen Strahlen zu tun. Wir wissen, daß sie Energie mit sich führen. Wie ist dieselbe unter den Bestandteilen des weißen Lichtes, d. h. unter den verschiedenen Spektralstrahlen verteilt? Wir fragen, mit anderen Worten, nach der Energieverteilung im Spektrum. Man kann z. B. annehmen, daß alle verschiedenfarbigen Strahlen gleiche Energie besitzen, oder daß dieselbe ungleichmäßig verteilt ist und sich auf Strahlen von bestimmter Wellenlänge (bestimmter Farbe) konzentriert. Eins steht zweifellos fest, daß alle Strahlen des Spektrums Energie besitzen, denn wird jeder einzelne von Ruß absorbiert, so entsteht Wärme. Die

von uns gestellte Frage kann mit größter Genauigkeit beantwortet werden. Zu diesem Zwecke zerlegt man weiße Strahlen, so daß z. B. auf einem Schirm das Spektrum erscheint. Man nimmt darauf ein mit Ruß bedecktes empfindliches Thermometer und setzt es nacheinander in verschiedene Teile des Spektrums, so daß es jedesmal nur von einem ganz schmalen Abschnitt desselben getroffen wird. Die Erhöhung der Temperatur zeigt dann, wie groß die Lichtenergie der verschiedenen Strahlen ist, aus denen das weiße Licht besteht. Es bestätigt sich dabei vor allem, daß ausnahmslos alle Strahlen das Thermometer erwärmen, d. h. Lichtenergie besitzen, die durch Absorption in Wärme gewandelt wird. Weiterhin zeigt es sich, daß bei allen Lichtquellen auf unserer Erde die Energie ununterbrochen abnimmt, wenn man das Spektrum vom roten Ende zum violetten durchschreitet. Über den größten Energievorrat verfügen die roten, über den kleinsten die violetten Strahlen. Wiederholt man jedoch denselben Versuch mit Sonnenstrahlen, so erhält man ein anderes Resultat. Hier besitzen die gelblichgrünen Strahlen die größte Energie, und diese nimmt nach beiden Seiten ab, d. h. nicht nur nach dem violetten, sondern auch nach dem roten Ende zu. Überhaupt erweist es sich, daß die Energieverteilung im Spektrum von der Temperatur der Lichtquelle abhängt. Auf diese Frage werden wir noch zurückkommen.

2. Die chemische Wirkung. In einigen Stoffen wird die absorbierte Lichtenergie darauf verwandt, Moleküle in Bestandteile zu zerlegen, so daß in diesem Falle die kinetische Lichtenergie in potentielle chemische übergeht. So werden z. B. Verbindungen des Silbers mit Chlor, Jod oder Brom durch das Licht in die zwei Elemente, aus denen sie bestehen, zerlegt. Darauf beruht bekanntlich die Photographie. Wir stellen jetzt die Frage nach der chemischen Wirkung der verschiedenen Spektralstrahlen. Um dieselbe zu beantworten, zerlegen wir wieder weißes Licht und stellen eine „lichtempfindliche“, d. h. photographische Platte so auf, daß sie das ganze Spektrum aufnehmen kann. Dabei werden die verschiedenen Strahlen auf nebeneinander liegende Stellen der Platte ihren Einfluß ausüben, so daß ihre chemischen Wirkungen leicht verglichen werden

können. Es erweist sich, daß die stärkste chemische Wirkung von den violetten Strahlen ausgeübt wird. Sie ist schwächer bei blauen und noch schwächer bei hellblauen Strahlen. Die übrigen üben fast gar keine chemische Wirkung aus. Übrigens ist es kürzlich gelungen, Platten herzustellen, die auch von den übrigen Strahlen, bis einschließlich den roten, wenn auch schwach, beeinflußt werden.

3. Die Fluoreszenz. Es gibt Stoffe, die eine sehr merkwürdige Eigenschaft besitzen. Werden sie z. B. von weißen Strahlen beleuchtet, so senden sie, und zwar nach allen Seiten, Lichtstrahlen von ganz bestimmter, für sie charakteristischer Farbe aus. Als Beispiel kann ein Stück Uranglas, z. B. ein Würfel, dienen, der an und für sich schwache gelbliche Färbung besitzt, die klar hervortritt, wenn man durch den Würfel hindurch einen weißen Gegenstand betrachtet. Die durch ihn hindurchgetretenen weißen Strahlen ergeben auf einer weißen Oberfläche (einem Schirm) einen gelben Fleck. Beleuchtet man ihn jedoch nur von einer Seite, so sieht er in der dazu senkrechten Richtung grellgrün aus. Dieses grüne Licht wird besonders intensiv ausgesandt, wenn man den Würfel mit violetten Strahlen beleuchtet. Bei Belichtung mit blauen Strahlen ist die Intensität geringer und bei hellblauen noch schwächer. Grüne Strahlen bewirken eine kaum merkliche Aussendung, gelbe, orangefarbene und rote dagegen gehen ungehindert durch den Würfel, ohne daß auch nur eine Spur von grüner Strahlung bemerkt werden kann. Man nennt diese Erscheinung Fluoreszenz und bezeichnet die dabei in Frage kommenden Stoffe als fluoreszierende. Hier wird offenbar die Lichtenergie von Strahlen einer Farbe wieder in Lichtenergie, jedoch von andersfarbigen Strahlen, gewandelt. Das Uranglas absorbiert violette Strahlen und verwandelt sie in grüne, die nach allen Seiten ausgesandt werden. Wir sagen, daß violette Strahlen besonders starke Fluoreszenz bewirken, blaue eine schwächere und hellblaue eine noch schwächere. Es ist klar, daß die Fluoreszenz von Strahlen hervorgerufen wird, deren Brechung stärker als die der erregten ist und die eine kleinere Wellenlänge besitzen als die letzteren. Durch die innere Umwandlung wird die Wellenlänge größer, und es entstehen Strahlen, die dem roten Ende des Spektrums näher sind. Ver-

schiedene Stoffe fluoreszieren in verschiedenen Farben. So fluoresziert z. B. eine Lösung von schwefelsaurem Chinin in hellblauen Strahlen, eine Chlorophylllösung in roten, Flußspat in bläulichvioletten, rosa Magdalfarbe in orange gelben, ein Aufguß von Lackmus in braunen usw. Besonders stark fluoresziert das Cyandoppelsalz des Platins und des Bariums in hellen gelben Strahlen. Mit diesem Salz bedeckt man Platten, die, eingerahmt, für Versuchszwecke sehr geeignete „fluoreszierende Schirme“ ergeben. Die Fluoreszenz verschwindet, sobald die sie bewirkende Bestrahlung unterbrochen wird.

4. Die Phosphoreszenz. Es gibt Stoffe, die in der Dunkelheit leuchten, nachdem sie einer mehr oder weniger langen Belichtung ausgesetzt waren. Diese Erscheinung heißt Phosphoreszenz, und die betreffenden Stoffe werden als phosphoreszierende bezeichnet. Zu diesen gehören Verbindungen des Schwefels mit den Metallen Zink, Calcium, Barium und Strontium, wobei Farbe, Helligkeit und Dauer der Phosphoreszenz von verschiedenen Beimengungen zu den genannten Verbindungen abhängen. Es phosphoreszieren ferner der Diamant, einige Arten Flußspat und andere Stoffe. Auch hier ist die Brechung der Strahlen, die nach der Belichtung ausgesandt werden, geringer als die der erregenden Strahlen. Es lassen sich Stoffe herstellen, deren Leuchten in der Dunkelheit mehrere Stunden anhalten kann. Mit diesen bedeckt man zuweilen Streichholzbehälter und Leuchter, damit sie in der Nacht leicht zu finden sind. Es ist für uns von Wichtigkeit, folgenden merkwürdigen Umstand nicht unbeachtet zu lassen: rote Strahlen löschen die Phosphoreszenz. Das läßt sich durch einen Versuch leicht nachweisen. Man nimmt einen mit phosphoreszierendem Stoffe bedeckten Schirm und beleuchtet ihn mit einer starken Lichtquelle, z. B. einem elektrischen Lichtbogen. Darauf bedeckt man ihn mit einer Pappscheibe, in deren Mittelpunkt eine runde Öffnung angebracht ist. Vor dieser Öffnung befestigt man ein rotes Glas und setzt den Lichtbogen wieder in Tätigkeit. Wird die Belichtung nach einiger Zeit unterbrochen und in der Dunkelheit die Pappe und das Glas entfernt, so erblickt man inmitten der leuchtenden Schirmoberfläche einen dunklen Fleck gerade an der Stelle, wo sich das rote Glas befand. Die roten Strahlen haben

die Phosphoreszenz gelöscht, die vorher durch andere, einer stärkeren Brechung unterworfenen Strahlen hervorgerufen war.

Wir haben nun die vier Wirkungen der Lichtstrahlen betrachtet. Nochmals wollen wir bemerken, daß am roten Ende des Spektrums die Phosphoreszenz gelöscht wird und die Strahlen aller Lichtquellen unserer Erde die größte Energie besitzen, d. h. am meisten befähigt sind, Wärme hervorzurufen. Am violetten Ende dagegen befinden sich Strahlen, welche die stärkste Fluoreszenz bedingen und die größte chemische Wirkung ausüben.

**§ 6. Die Strahlungsenergie. Infrarote und ultraviolette Strahlen.** Bei Zerlegung des weißen Lichtes erhielten wir ein Spektrum, das alle Farben von Rot bis Violett umfaßt. In dieser Richtung wird die Brechung der Strahlen größer und nimmt ihre Wellenlänge von  $\lambda = 0,76 \mu = 7600 \text{ \AA}$  bis zu  $\lambda = 0,4 \mu = 4000 \text{ \AA}$  ab, wobei die Schwingungszahl pro Sekunde anwächst. Die Gesamtheit dieser Strahlen umfaßt nicht einmal eine Oktave. Die Enden dieses Spektrums genau festzustellen, ist ein Ding der Unmöglichkeit. Es gibt keine scharfen Grenzen, denn die roten und violetten Teile werden allmählich schwächer, dunkler und verschwinden auf schwarzem Grunde, so daß keine Färbung mehr festgestellt werden kann. Die Lage der beiden Enden hängt von der Empfindlichkeit der Augen ab und ist für verschiedene Menschen nicht die gleiche. Daher muß man die Wellenlängen der äußeren Strahlen mit  $\lambda = 0,76 \mu$  und  $\lambda = 0,4 \mu$  als mittlere Annäherungswerte betrachten.

Es erweist sich, daß dieses Spektrum sich nach beiden Seiten sehr weit fortsetzen läßt. Auf der einen Seite, d. h. hinter dem roten Ende, befindet sich das Spektrum von Strahlen, deren Wellenlänge größer ist als  $0,76 \mu$  oder  $7600 \text{ \AA}$ , während hinter dem violetten Ende dieselben weniger als  $0,4 \mu$ , d. h.  $4000 \text{ \AA}$  betragen. Die Strahlen dieser beiden Arten beeinflussen unser Auge nicht, es sind unsichtbare Strahlen. Es wäre sonderbar, von einem unsichtbaren Lichte zu sprechen, das uns in Wirklichkeit als Dunkelheit erscheint. Daher hat man für Strahlen aller Wellenlängen eine gemeinsame Bezeichnung ein-

geführt. Man nennt ihre Gesamtheit Strahlungsenergie. Wie wir sehen werden, besitzt das Spektrum der Strahlungsenergie eine sehr große Länge, und nur einen ganz geringen Teil derselben beansprucht das für uns sichtbare Spektrum. Es zeigt sich, daß der Teil hinter dem roten Ende des sichtbaren Spektrums überhaupt keine bestimmte Grenze besitzt, denn man erhält mit Leichtigkeit Strahlen von beliebig großer Wellenlänge. Solche Strahlen bieten jedoch kein Interesse, und man unterbricht daher das Spektrum hinter dem roten Ende bei Strahlen, die noch praktische Bedeutung haben und aus diesem Grunde wichtig und interessant sind.

Der ganze unsichtbare Teil des Spektrums der Strahlungsenergie zerfällt in vier Teile, von denen zwei, die unmittelbar an den Enden des sichtbaren Spektrums liegen, längst bekannt sind, während die beiden anderen weiter gelegenen, erst unlängst entdeckt wurden. Vor allem wollen wir die Frage zu beantworten suchen, wie es den Forschern möglich geworden ist, Kunde von den unsichtbaren Strahlen, d. h. von der Fortsetzung des Spektrums über das rote und das violette Ende hinaus, zu erhalten. Die Antwort ergibt sich von selbst, wenn man an die vier Wirkungen der sichtbaren Strahlen denkt, die im vorhergehenden Paragraphen beschrieben worden sind.

A. Infrarote Strahlen. Es ist in § 5 darauf hingewiesen worden, daß man die Energieverteilung unter den verschiedenfarbigen Strahlen des Spektrums, mithin auch ihre Wärmewirkung, mit Hilfe eines empfindlichen Thermometers feststellen kann. Es zeigt sich dabei, daß für alle Lichtquellen unserer Erde die Energie vom violetten Ende des Spektrums zum roten wächst. Verschiebt man das Thermometer noch weiter, d. h. hinter das rote Ende, so zeigt es eine noch stärkere Erwärmung. Auf einer bedeutenden Strecke nimmt diese noch weiter zu, wird dann geringer und verschwindet allmählich. Allgemein übertrifft diese Strecke um ein Bedeutendes die ganze Länge des sichtbaren Spektrums. Das Spektrum einer Quelle, die weiße Strahlen aussendet, beschränkt sich mithin nicht auf den sichtbaren Teil, sondern setzt sich über das rote Ende hinaus weit fort. Hier befindet sich ein umfangreiches Gebiet von Strahlen, die unser Auge nicht beeinflussen, d. h. unsichtbar sind. In ihnen konzentriert

sich der größere Teil der ganzen Energie, und hier sind die Strahlen mit der größten Energie zu suchen. Wir werden später sehen, daß für die Mehrzahl aller Lichtquellen die Energie der sichtbaren Strahlen nur einen ganz geringen Teil des ganzen Vorrats an Strahlungsenergie, den die weißen Strahlen mit sich führen, bildet. Die hier besprochenen unsichtbaren Strahlen heißen infrarote und nehmen den infraroten Teil des Spektrums ein. Daß ein solcher vorhanden ist, läßt sich noch durch folgenden Versuch nachweisen. Man fängt das Spektrum einer weißen Lichtquelle auf der Oberfläche eines mit phosphoreszierendem Stoffe bedeckten Schirmes auf. Diesen Stoff setzt man vorher einer starken Belichtung aus, so daß der Schirm in der Dunkelheit leuchtet. Hat man dann nach einiger Zeit die Tätigkeit der weißen Lichtquelle unterbrochen, so merkt man, daß der Schirm nicht nur an der Stelle, die vom roten Teil des sichtbaren Spektrums getroffen wurde, dunkler geworden ist, sondern auch darüber hinaus, d. h. dort, wo die infraroten Strahlen auftrafen, einen dunklen Streifen aufweist. Dieser Versuch beweist nicht nur, daß infrarote Strahlen in der Tat vorhanden sind, sondern daß sie auch imstande sind, Phosphoreszenz auszulöschen. Übrigens vermögen das nicht alle infraroten Strahlen, sondern lediglich die dem sichtbaren Spektrum zunächst gelegenen.

Der deutsche Forscher Rubens (Berlin, geb. 1865, gest. 1922) hat sich mit den infraroten Strahlen, deren Vorhandensein er durch ihre Wärmewirkung nachwies, viel und mit großem Erfolg beschäftigt. Indem er immer weiter und weiter vordrang, gelangte er bis zu Strahlen, deren Wellenlänge verhältnismäßig sehr groß ist. Die Länge des von ihm bis zum Jahre 1911 erforschten infraroten Spektrums umfaßt  $8\frac{1}{2}$  Oktaven, ist also etwa neunmal so lang wie das ganze sichtbare Spektrum. Die Wellenlängen der infraroten Strahlen beginnen natürlich mit  $\lambda = 0,76 \mu = 0,0076 \text{ mm}$  und erreichen ein  $\lambda = 313 \mu = 0,313 \text{ mm}$ , also fast ein Drittel Millimeter. Ihre Schwingungsfrequenz beträgt für den ersten Strahl  $4 \cdot 10^{14}$  und für den letzten  $10^{12}$  in einer Sekunde. Die Wellenlänge des am weitesten entfernten infraroten Strahles ist 400mal so groß und die Frequenz 400mal so klein wie dieselben Größen des dem sichtbaren Spektrum zunächst gelegenen.

Einige für sichtbare Strahlen durchlässige Stoffe absorbieren in hohem Maße infrarote Strahlen. Hierher gehören Glas, Alaun, Alaunlösung, Kupfervitriollösung, Eis und andere Stoffe. Steinsalz dagegen, das Mineral Silvin (eine Verbindung von Chlor mit dem Metallkalium), das Mineral Fluorit und Chlorsilber lassen den größten Teil der infraroten Strahlen ungehindert durch. Andererseits ist eine schwarze Lösung von Jod in flüssigem Schwefelkohlenstoff, die für sichtbare Strahlen vollkommen undurchlässig ist, für infrarote gut durchlässig. Dasselbe bezieht sich auch auf dünne Ebonitschichten.

Wir wenden uns jetzt der interessanten Frage nach der Energieverteilung im Spektrum verschiedener Körper zu, die sichtbare und infrarote Strahlen aussenden. Es ist bereits gesagt worden, daß bei allen Lichtquellen unserer Erde das Energiemaximum im infraroten Teil des Spektrums zu suchen ist. Es erweist sich, daß die Energieverteilung von der Temperatur der Lichtquelle abhängt. Wie es auch erwartet werden mußte, wächst mit der Temperatur die Energie aller Strahlen, gleichzeitig aber geht der Sitz der größten Energie an Strahlen von geringerer Wellenlänge über, nähert sich also dem sichtbaren Teil des Spektrums. Folgende Tabelle zeigt, an welcher Stelle des Spektrums, d. h. bei welcher Wellenlänge  $\lambda$  (in Längeneinheiten  $\mu = 0,001$  mm ausgedrückt) sich die größte Energie befindet, wenn die Lichtquelle eine Temperatur von  $t^{\circ}$  C aufweist.

$t^{\circ}$ C	$\lambda$	$t^{\circ}$ C	$\lambda$	$t^{\circ}$ C	$\lambda$
— 240	100 $\mu$	300	5 $\mu$	2000	1,3 $\mu$
— 100	17	500	3,5	3550	0,76
0	10,6	1000	2,3	5000	0,55
100	7,7				

Man ersieht aus der Tabelle, wie mit dem Temperaturanstieg der Lichtquelle die Wellenlänge der die größte Energie führenden Strahlen abnimmt. Bei  $-240^{\circ}$  C (flüssiger Wasserstoff hat eine Temperatur von  $-253^{\circ}$  C) gehört das Energiemaximum den Strahlen, deren Wellenlänge  $100 \mu$  beträgt. Sie liegen mehr als sieben Oktaven weit vom roten Ende des sichtbaren Spektrums

entfernt. Das Spektrum der Strahlen, die von einem dermaßen kalten Körper ausgesandt werden, besitzt nur sehr geringe Energie und ist ganz im entfernten infraroten Teil gelegen, zu beiden Seiten der Wellenlänge  $\lambda = 100 \mu$ . Bei  $0^\circ \text{C}$  hat man ein  $\lambda = 10,6 \mu$  und bei Zimmertemperatur etwa  $\lambda = 10 \mu$ . Temperaturschwankungen auf der Erdoberfläche spielen hier keine große Rolle. Bei  $t = -40^\circ \text{C}$  hat man ein  $\lambda = 12 \mu$ , während bei  $t = +40^\circ \text{C}$   $\lambda = 9,3 \mu$  ist. Man ersieht daraus, daß Körper auf der Erdoberfläche infrarote Strahlen aussenden, deren Spektrum sich zu beiden Seiten einer Wellenlänge von  $\lambda = 10 \mu$  lagert, die der größten Energie entspricht und mehr als  $3\frac{1}{2}$  Oktaven vom roten Ende des sichtbaren Spektrums entfernt ist. Mit diesen unsichtbaren Strahlen ist jeder Raum erfüllt, in dem für uns Dunkelheit herrscht und es keine heißen (im gewöhnlichen Sinne des Wortes) Körper gibt.

Schon bei  $1000^\circ \text{C}$  leuchten die Körper hell, das Maximum der Energie liegt jedoch immer noch im infraroten Teil auf einer Entfernung von  $1\frac{1}{2}$  Oktaven von den roten Strahlen. Es sei bemerkt, daß Gold bei  $1063^\circ$  schmilzt, Kupfer bei  $1083^\circ$ , Platin bei  $1764^\circ$ , Tantal und Wolfram (Metalle, die in elektrischen Glühlampen zur Verwendung kommen) bei  $2900$  und  $3100^\circ$ . Unsere Tabelle zeigt, daß sogar bei diesen nur sehr schwer zu erreichenden Temperaturen, bei denen fast alle Körper schmelzen, das Energiemaximum immerhin noch im infraroten Teil des Spektrums gelegen ist. Erst bei  $3550^\circ \text{C}$  erreicht das Maximum den Punkt, wo schwache dunkelrote Strahlen ihren Sitz haben, und bei noch höheren Temperaturen, beispielsweise bei Sonnentemperatur, liegt es bereits im sichtbaren Teil des Spektrums.

Von großem Interesse ist noch folgende kleine Tabelle, die uns anzeigt, welcher Anteil an Strahlungsenergie, die von verschiedenen Körpern ausgeht, auf sichtbare und welcher auf unsichtbare, infrarote Strahlen entfällt (in Prozenten). (Siehe f. S.)

Man sieht, daß Körper in Weißglut Strahlungsenergie aussenden, von der nur der 20. Teil auf sichtbare Strahlen entfällt, und daß sogar im blendend hellen elektrischen Lichtbogen und in der Acetylenflamme bloß etwas mehr als ein Zehntel der ganzen Energie den sichtbaren Strahlen gehört.

	Energie der sichtbaren Strahlen Proz.	Energie der infraroten Strahlen Proz.
Platin in Rotglut . . . . .	0 (unmerkbar)	100
Ölflamme . . . . .	3	97
Gasflamme . . . . .	4	96
Platin in Weißglut . . . . .	4,6	95,4
Kohlenfaden-Glühlampe . . . . .	6	94
Lichtbogen . . . . .	10,4	89,6
Acetylenflamme . . . . .	10,5	89,5

B. Ultraviolette Strahlen. Wir haben das Spektrum der Strahlungsenergie betrachtet, das eine Fortsetzung des sichtbaren über das rote Ende hinaus darstellt, d. h. in Richtung der anwachsenden Wellenlänge und der abnehmenden Frequenz. Jetzt wenden wir uns dem violetten Ende des sichtbaren Spektrums zu. Auch hinter diesem liegt ein unsichtbarer Teil, in dem die Wellenlängen abnehmen und die Frequenzen wachsen. Strahlen, deren Wellenlänge  $\lambda$  kleiner ist als  $0,4 \mu$ , d. h. kleiner als  $4000 \text{ \AA}$ , nennt man ultraviolette. Das bis jetzt erforschte ultraviolette Spektrum erstreckt sich von  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$  bis zu etwa  $\lambda = 500 \text{ \AA}$ . Seine Länge umfaßt drei Oktaven und ist mithin bedeutend kürzer als die des infraroten Spektrums, übertrifft aber immerhin das sichtbare um das Dreifache. Am Beginn des ultravioletten Spektrums, d. h. bei  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ , beträgt die Frequenz  $7,5 \cdot 10^{14}$  Schwingungen in der Sekunde und ist bei den äußersten ultravioletten Strahlen, d. h. bei  $\lambda = 500 \text{ \AA}$ , achtmal so groß, d. h.  $6 \cdot 10^{15}$  Schwingungen. Es gibt zwei Methoden zum Nachweisen und Erforschen dieser Strahlen.

Fängt man auf einer photographischen Platte das Spektrum einer Quelle von hoher Temperatur auf, so zeigt es sich, daß nicht nur hellblaue, dunkelblaue und violette Strahlen auf die Platte eingewirkt haben, sondern daß hinter dem violetten Ende sich ein langer Streifen befindet, der vom Einfluß des unsichtbaren Spektrums herrührt. Es ist das die Abbildung des unsichtbaren Teiles des Spektrums. Erhält man auf gleiche Weise das Spektrum auf der Oberfläche eines fluoreszierenden Schirmes, der z. B. mit Doppelcyansalz des Platins und Bariums (S. 144) bedeckt ist, so erblickt man auf dem Schirm hinter dem

violetten Ende des sichtbaren Spektrums einen langen hellen Streifen. Natürlich ist das nicht das Spektrum der ultravioletten Strahlen, die ja auf unser Auge nicht wirken und daher unter allen Umständen unsichtbar sind. Der Streifen beweist jedoch die Existenz dieser Strahlen und zeigt die Stellen der Platte, wo sie Fluoreszenz hervorriefen, d. h. absorbiert wurden und einer Verwandlung in sichtbare, z. B. gelbe Strahlen unterlagen. Diese letzteren, von dem erwähnten Salz ausgesandt, gelangen in unser Auge, so daß wir den Streifen sehen können, der das Spektrum der ultravioletten Strahlen darstellt. Außer diesen beiden Hauptmethoden läßt sich das ultraviolette Spektrum auch aus der Wärmewirkung der Strahlen erforschen. Sie ist zwar nicht groß, wird aber dennoch von neuzeitlichen, empfindlichen Apparaten angezeigt. Diesbezügliche Arbeiten sind vom Jahre 1902 an von verschiedenen Forschern ausgeführt worden.

Ultraviolette Strahlen werden von vielen, für Lichtstrahlen vollkommen durchlässigen Stoffen absorbiert. Hierher gehören Glas, Glimmer und Luft. Eine 10 m dicke (oder lange) Luftsäule absorbiert vollständig alle ultravioletten Strahlen, die eine Wellenlänge unter 2118 Å besitzen. 1 m Luft läßt Strahlen bis zu  $\lambda = 1842$  Å nicht durch, und sogar eine Luftschicht von 0,1 m Dicke absorbiert alle Strahlen mit einer Wellenlänge unter 1566 Å. Der deutsche Forscher Schumann (1841 bis 1913) hat (1893 und 1901) einen Apparat konstruiert, dessen optische Teile nicht aus Glas, sondern aus farblosem Flußspat hergestellt sind, der für ultraviolette Strahlen vollkommen durchlässig ist. Die photographische Platte wird mit einer Schicht reinen Bromsilbers bedeckt, ohne Gelatine, die ganz kurzwellige Strahlen absorbiert. Außerdem wird die Luft aus dem ganzen Apparat, soweit es möglich ist, evakuiert und eine Strahlung des Wasserstoffs unter Einwirkung von elektrischen Entladungen hervorgerufen. Vor dieser Arbeit hatte man das ultraviolette Spektrum nur bis  $\lambda = 1850$  Å verfolgen können, Schumann gelang es,  $\lambda = 1000$  Å zu erreichen, und man nennt diese weit gelegenen ultravioletten Strahlen Schumannstrahlen. Noch weiter kam in letzter Zeit der amerikanische Forscher Lyman, der (1914 bis 1916) noch eine ganze Oktave von  $\lambda = 1000$  Å bis  $\lambda = 500$  Å entdeckte. Es ist sehr interessant, daß eine dünne Silberschicht, die für sichtbare

Strahlen vollständig undurchlässig ist, eine bestimmte Gruppe von ultravioletten Strahlen, mit einer Wellenlänge um  $\lambda = 3200 \text{ \AA}$  herum, gut durchläßt. Das ermöglicht die Durchführung eines merkwürdigen Versuches. In einem gänzlich dunklen Zimmer wird ein undurchsichtiger Kasten aufgestellt, dessen eine Seitenwand aus einer dünnen Silberplatte besteht. Im Innern des Kastens befindet sich ein elektrischer Lichtbogen, dessen Licht an ultravioletten Strahlen sehr reich ist. Es ist nun möglich, im vollkommen dunklen Zimmer eine Aufnahme von den in ihm befindlichen Gegenständen zu machen. Es erklärt sich damit, daß die Gegenstände von den durch die Silberschicht gegangenen ultravioletten Strahlen sozusagen „beleuchtet“ wurden. Sie wurden „sichtbar“ nicht fürs Auge, sondern für die lichtempfindliche photographische Platte.

Wir haben somit das Spektrum der Strahlungsenergie auf einer Länge von  $12\frac{1}{2}$  Oktaven betrachtet. Davon entfällt weniger als eine Oktave auf das Spektrum der sichtbaren Strahlen,  $8\frac{1}{2}$  Oktaven auf infrarote und drei auf ultraviolette Strahlen. Auf diese Weise haben wir das Spektrum der Strahlungsenergie, von dem uns unser Auge Kunde gibt, fast um das 13fache verlängert. Das uns jetzt bekannte Spektrum erstreckt sich von den äußersten bis jetzt erforschten infraroten bis zu den äußersten von uns entdeckten ultravioletten Strahlen, d. h. von einem Strahle mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 313 \mu = 0,313 \text{ mm}$  bis zu einem solchen mit  $\lambda = 0,05 \mu = 500 \text{ \AA}$ . Die Wellenlänge des ersteren ist 6250mal so groß und die Frequenz 6250mal so klein wie dieselben Größen des zweiten Strahles. Der ungeheure Unterschied in der Frequenz bedingt einen großen Unterschied in den Eigenschaften der äußersten Strahlen. Das bezieht sich z. B. auf Reflexion, Absorption durch verschiedene Stoffe und die Brechung dieser Strahlen. Letztere hängt, wie wir sahen, mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Stoffe zusammen, in dem beim Eintritt die Strahlen brechen. Man darf jedoch nicht vergessen, daß alle betrachteten Strahlen, dem Wesen nach, eine und dieselbe Erscheinung von sich ausbreitenden Schwingungen, d. h. eine Erscheinung der Strahlungsenergie darstellen. Der Unterschied zwischen ihnen ist vor allem rein quantitativer Natur und besteht lediglich darin, daß

die Frequenzen, d. h. die Schwingungszahlen pro Sekunde und im Zusammenhang damit die Wellenlängen verschieden sind. Der Unterschied ist derselbe, wie er bei verschieden hohen Tönen beobachtet wird.

**§ 7. Elektrische Schwingungen.** Bevor wir zu den weiteren Teilen des Spektrums der Strahlungsenergie übergehen, müssen wir zwei interessante Erscheinungen kennenlernen: die elektrischen Schwingungen und die Resonanzerscheinung. Wir beginnen mit den ersteren.

Der Schwingungsbewegung begegnet man auf allen Gebieten der Physik, wobei alle Fälle einer derartigen Bewegung gewisse gemeinsame charakteristische Merkmale aufweisen. Die Entstehungsursache der Schwingungen kann dabei in den einzelnen Fällen von ganz verschiedener Art sein. Die gemeinsamen Merkmale sind folgende. Wir haben stets einen Körper vor uns, der einigermaßen frei, d. h. nicht in allen Teilen befestigt ist, so daß er schwingende Bewegungen auszuführen vermag. Für einen solchen Körper gibt es eine gewisse Lage der Ruhe oder des „Gleichgewichtes“, in welcher keinerlei Kräfte auf ihn einwirken oder, falls außerhalb solche vorhanden sind, doch keine Bewegung hervorgerufen wird. Nehmen wir an, irgendwelche außerhalb wirkende Kräfte zwingen den Körper, seine Ruhelage aufzugeben und halten ihn in der neuen Lage fest, so daß er nicht mehr in die Ruhelage zurückkehren kann. Verschwinden diese Kräfte, so beginnt der Körper in die Gleichgewichtslage zurückzustreben, und zwar mit zunehmender Geschwindigkeit. Erreicht er jedoch die Ruhelage, so bleibt er nicht stehen, sondern setzt seine Bewegung in einer Richtung fort, die der ursprünglichen Ablenkung entgegengesetzt ist. Jetzt nimmt seine Geschwindigkeit ab, bis der Körper einen Punkt erreicht, der gleich weit von der Ruhelage entfernt ist, wie die erste Ablenkung. Der Körper hält still und kehrt sofort mit anwachsender Geschwindigkeit zur Ruhelage zurück, schwingt über diese hinaus und erreicht mit verzögerter Geschwindigkeit den Punkt der ersten Ablenkung. In diesem Augenblick ist die erste volle Schwingung „hin und zurück“ beendet, und es beginnt die zweite, die in der gleichen Reihenfolge verläuft.

Als wichtigste für eine gegebene Schwingungsbewegung charakteristische Größe erscheint, wie wir sehen, die Periode, d. h. die Zeit, in welcher eine volle Schwingung ausgeführt wird, oder die mit der Periode zusammenhängende Frequenz, d. h. die Schwingungszahl pro Sekunde. Als äußerst wichtig sei hervorgehoben, daß die Schwingungsperiode durch die Bedingungen, die einen schwingenden Körper allseitig charakterisieren, vollkommen bestimmt wird. Es können das folgende Bedingungen sein: 1. die Gestalt des Körpers, 2. der Stoff, aus dem er besteht und der seine physikalischen Eigenschaften, wie Dichte, Elastizität usw., bestimmt, 3. seine Temperatur und 4. die auf den Körper einwirkenden Kräfte. Sind solche Bedingungen vorhanden, so kann der Körper, als Ganzes, Schwingungen von nur einer ganz bestimmten Periode ausführen. Fälle, in denen Teile des Körpers, z. B. jede Hälfte, jedes Drittel, Viertel usw. Schwingungen von verschiedenen Perioden ausführen, widersprechen dem nicht. Von einem derartigen Falle (Schwingung einer Saite) wird später die Rede sein. Wir haben bereits gesehen, daß eine halbe Schwingung als Amplitude (S. 123) bezeichnet wird. In dem vorhin beschriebenen Falle hatten wir angenommen, daß in allen aufeinanderfolgenden Schwingungen die Amplitude stets dieselbe Größe hat. In Wirklichkeit beobachtet man jedoch, daß die Amplitude allmählich kleiner wird und der Körper schließlich stillsteht. Man nennt eine solche Schwingung eine gedämpfte. Die Dämpfung kann schwach sein, d. h. langsam vor sich gehen, wobei die Amplitude nach einer Reihe von Schwingungen nur um ein Weniges geringer wird und der Stillstand erst nach langer Zeit erfolgt. Sie kann aber auch stark sein, so daß der Körper nach wenigen Schwingungen stillsteht, wobei die Amplitude einer jeden Schwingung bedeutend kleiner ist als die der vorhergehenden.

Wir wollen eine Reihe von Beispielen aus verschiedenen Gebieten der Physik anführen.

1. Das Pendel. Die Schwingungen eines gewöhnlichen Pendels passen sich vollkommen dem von uns beschriebenen allgemeinen Schema an. Als Ruhelage erscheint die Vertikale  $AB$  in Fig. 8. Bringt man das Pendel in die Lage  $AC$  und läßt es los, so wird es zwischen zwei äußeren Lagen  $AC$  und  $AD$  schwingen.

Der Bogen  $BC$  oder der Winkel  $BAC$  bestimmen die Amplitude. Die Kraft, welche die Schwingungen hervorruft, ist die Schwerkraft, die das abgelenkte Pendel zwingt, in die Ruhelage zurückzukehren. Die Schwingungsperiode hängt von der Länge und allgemein von der Gestalt des Pendels, sowie von der Größe der Schwerkraft ab. Letztere wird größer, je weiter man auf der Erdoberfläche vom Äquator nach den Polen zu schreitet, und ist in höheren Lagen, z. B. auf Bergen, geringer.

Im ersten Falle wird die Periode kleiner, im zweiten größer. Ist das Pendel nicht aus einem Stoffe hergestellt, so hängt die Periode von der Art und Verteilung der einzelnen Stoffe ab. Der Luftwiderstand und die Reibung in der Rotationsachse  $A$  dämpfen die Schwingungen. Schwingt das Pendel im Wasser, oder ist die Achse  $A$  einer starken Reibung ausgesetzt, so kann die Dämpfung schneller vor sich gehen und das Pendel steht nach wenigen Schwingungen still.

2. Die Saite (Fig. 9). Lenkt man eine gerade Saite von der Ruhelage  $AB$  ab, gibt ihr die Lage  $ACB$  und läßt sie darauf los, so wird sie zwischen den Lagen  $ACB$  und  $ADB$  schwingen. Die Periode hängt von der Länge, Dicke, dem Material und der Spannung der Saite ab. Während die Saite als Ganzes schwingt, können beide Hälften, d. h.  $AC$  und  $CB$  eigene Schwingungen ausführen, an denen die Punkte  $A$ ,  $C$  und  $B$  keinen Anteil nehmen. Zugleich kann auch jedes Drittel, Viertel usw. für sich schwingen, wobei die einzelnen Perioden 2-, 3-, 4- usw. mal kleiner sein werden als die Periode der ganzen Saite. Daraus erklärt es sich, daß dem Grundton der Saite Obertöne beigemischt sind. Die Schwingungsursache liegt in der Spannung der Saite.

3. Die Feder. Eine gerade, elastische Platte  $AB$  (Fig. 10) ist im Punkte  $B$  befestigt. Bringt man das Ende  $A$  in die Lage  $C$  und läßt es los, so führt die Platte zwischen den Lagen  $BC$  und

Fig. 8.

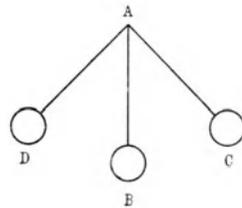


Fig. 9.

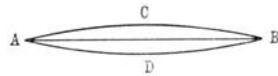
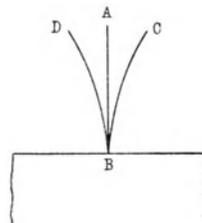


Fig. 10.



*BD* Schwingungen aus. Als Schwingungsquelle treten hier innere Elastizitätskräfte auf, welche die ursprüngliche Lage der Platte wiederherzustellen suchen.

An einer im Punkte *A* befestigten schraubenförmigen Feder *AB* (Fig. 11) hängt ein Gewicht *B*. Zieht man dieses Gewicht nach unten oder hebt es hoch und läßt es darauf los, so führt es vertikale Schwingungen aus.

Fig. 11.

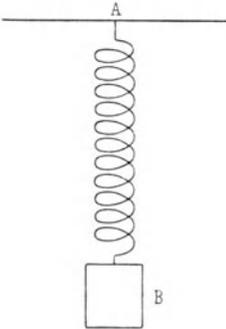


Fig. 12.

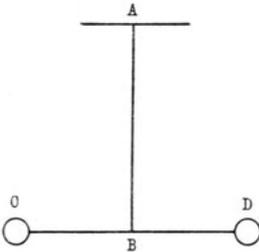
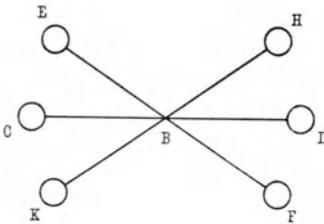


Fig. 13.



#### 4. Torsionsschwingungen.

Am unteren Ende eines vertikalen Drahtes *AB* (Fig. 12), der in *A* befestigt ist, ist ein horizontaler Stab, mit zwei Kugeln *C* und *D* an den Enden, angebracht. Dreht man den Stab um seine vertikale Achse, so daß z. B. die Kugel *C* sich auf den Leser zu bewegt und die Kugel *D* sich von ihm entfernt, so wird der Draht verdreht. Läßt man nun den Stab los, so sucht der Draht sich loszudrehen und der Stab mit den beiden Kugeln führt in der horizontalen Ebene Schwingungen aus. In Fig. 13 ist diese horizontale Ebene abgebildet, und man sieht die Ruhelage *CD* und die beiden äußeren Lagen des Stabes *EF* und *KH*. Den Draht muß man sich im Punkte *B* senkrecht zur Ebene der Figur denken. Das sind sogenannte Torsionsschwingungen. Ihre Periode hängt von der Länge, Dicke und dem Material des Drahtes, sowie von der Länge des Stabes

und den Dimensionen und dem Material der beiden Kugeln ab.

5. Flüssigkeit in kommunizierenden Gefäßen. In einer gebogenen Röhre (Fig. 14) befindet sich das Niveau der Flüssigkeit in beiden vertikalen Hälften auf gleicher Höhe *AB*.

Das ist die Lage der Ruhe oder des Gleichgewichtes der Flüssigkeit. Verleiht man der ganzen Röhre eine schräge Lage nach links und verschließt die linke Hälfte durch einen Pfropfen und

stellt darauf die Röhre wieder in die ursprüngliche Lage, so werden sich die Oberflächen der Flüssigkeit in *C* und in *D* befinden (Fig. 15), d. h. in der linken Hälfte höher als in der rechten. Entfernt man nun den Pfropfen, so wird die Flüssigkeit links sinken und rechts steigen. Ist die Ruhelage *AB* erreicht, so setzt die Flüssigkeit ihre Bewegung

fort, bis die Oberflächen sich in den Punkten *E* und *F* befinden. Darauf beginnt eine rückwärtige Bewegung, d. h. die Flüssigkeit sinkt rechts und steigt links an usw. Sie führt Schwingungen aus und fließt in der Verbindungsröhre abwechselnd nach rechts und nach links. Solche Schwingungen verlöschen ziemlich rasch.

6. Die Schwingungen eines Magneten. Einen Magneten kann man so anordnen, daß er sich leicht bewegen kann, indem man ihn in horizontaler Lage an einen dünnen Faden (Fig. 16) hängt oder auf eine Spitze setzt (Fig. 17). Bekanntlich stellt sich ein derartiger Magnet von selbst so ein, daß seine Achse, d. h. die gerade Linie, welche seine Magnetpole verbindet, in der Ebene des magnetischen Meridians liegt. Dieser Meridian schließt mit dem geographischen Meridian einen gewissen Winkel ein, den man magnetische Abweichung nennt, und der an verschiedenen Orten der Erdoberfläche sehr verschiedene Größen besitzt.

Bringt man nun den Magneten aus seiner Ruhelage, indem man ihn um seine vertikale Achse dreht, und läßt ihn darauf los, so schwingt er in der horizontalen Ebene, genau wie der Stab mit den

Fig. 14.

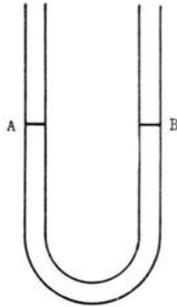


Fig. 15.

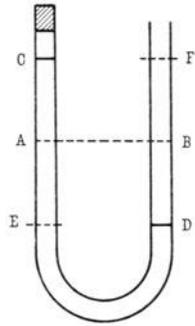


Fig. 16.

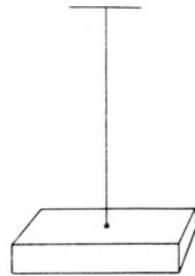


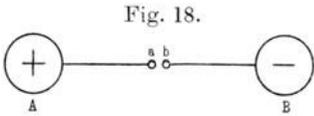
Fig. 17.



Kugeln (Fig. 12) Torsionsschwingungen ausführt. Als Schwingungsursache ist hier die Kraft des Erdmagnetismus anzusehen. Die Periode hängt von der Größe dieser Kraft ab, die an verschiedenen Orten der Erdoberfläche verschieden ist, sowie von der Größe und der Gestalt des Magneten und vom Grade der Magnetisierung.

Wir haben verschiedene Fälle der Schwingungsbewegung betrachtet. Man überzeugt sich leicht, daß in allen Fällen die allgemeinen Merkmale, auf die am Anfang des Paragraphen hingewiesen worden ist, vorhanden sind. Ihre Bedeutung ist durch die angeführten Beispiele vollkommen geklärt. Wir gehen jetzt zu den elektrischen Schwingungen über.

Angenommen, wir haben zwei Metallkörper *A* und *B* (Fig. 18), die gleichstark, jedoch ungleichnamig elektrisiert sind, so daß z. B. der Körper *A* eine Ladung positiver und *B* eine Ladung negativer Elektrizität trägt. Zwei Drähte verbinden die Körper *A* und *B* mit zwei Metallkugeln *a* und *b*. Nähert man diese Kugeln



einander, so entsteht zwischen ihnen ein elektrischer Funke, es erfolgt eine „Entladung“, d. h. nach der alten Theorie eine Vereinigung der beiden ungleichnamigen Elektrizitäten, die sich „gegenseitig aufheben“ oder ein neutrales, wirkungsloses Gemisch bilden. Gehen wir jedoch von der neuen Theorie aus, so müssen wir sagen, daß im Körper *B* eine größere Menge von negativen Elektroden vorhanden ist, als es im nicht elektrisierten, d. h. neutralen Zustande der Fall sein dürfte. Dagegen herrscht im Körper *A* ein Mangel an Elektronen. Die strittige Frage, ob ein nicht elektrisiertes Metall freie Elektronen besitzt und wie man die positive Elektrisierung zu verstehen hat, ob als Abgang dieser freien Elektronen oder als Resultat einer Trennung der Elektronen von den Metallmolekülen, ist für uns bedeutungslos. Die Entladung besteht darin, daß der Überfluß an Elektronen von *B* nach *A* geht, den Mangel in *A* deckt, so daß nun beide Körper sich in neutralem Zustande befinden.

Die Theorie und die Versuche haben jedoch gezeigt, daß man die Entladung nicht als einen einfachen Übergang von überzähligen Elektronen von *B* nach *A* betrachten darf. Die Entladung weist fast immer schwingenden Charakter auf,

d. h. sie zerfällt in eine gewisse Anzahl von aufeinanderfolgenden Entladungen, die abwechselnd in einander entgegengesetzten Richtungen erfolgen.

Es ist das so zu verstehen, daß die Elektronen zuerst von *B* nach *A* gehen. Damit hat aber der Fluß sein Ende nicht erreicht, es ist nicht der „Ruhezustand“ eingetreten, die Körper *A* und *B* befinden sich noch nicht im neutralen Zustande. Ein gewisser Überfluß an Elektronen ist auf den Körper *A* übergegangen, so daß nun dieser negativ elektrisiert ist, während *B* jetzt positive Ladung trägt. Es beginnt ein rückwärtiger Elektronenfluß von *A* nach *B*. Ist dieser beendet, so hat man, wie vorher, in *B* negative Elektrisierung und in *A* positive. In diesem Augenblick hat die erste volle Schwingung ihr Ende erreicht, es beginnt die zweite, darauf die dritte usw. Dementsprechend besteht auch der Entladungsfunke aus einer Reihe von aufeinanderfolgenden Funken, die man durch einen besonderen Kunstgriff nachweisen kann. Als Urquelle dieser Schwingungen erscheinen die Kräfte der gegenseitigen Abstoßung zwischen den Elektronen. Die Periode der elektrischen Schwingungen hängt vor allem von der Gestalt und den Dimensionen der Körper ab, zwischen denen die Entladung erfolgt, und nur in sehr geringem Grade vom Material, d. h. von der Art des Leiters, aus dem sie bestehen. Elektrische Schwingungen gehören fast stets zu denen, die sehr rasch erlöschen. Sie erinnern an Schwingungen einer Flüssigkeit in kommunizierenden Gefäßen (Fig. 14 und 15). Sie können auch in einem einzigen Körper hervorgerufen werden, der gar keine Ladung trägt, z. B. in einer Metallstange. Dabei verschieben sich die Elektronen zum einen Ende der Stange, das in diesem Falle als negativ elektrisiert erscheint, während das andere Ende positive Ladung trägt. Die Elektronen bewegen sich längs der Stange hin und her, wobei die Elektrisierungen der beiden Hälften stets ihr Vorzeichen wechseln. Auch in diesem Falle erlöschen die Schwingungen sehr rasch. Die Periode hängt hauptsächlich von der Gestalt und den Dimensionen des Körpers ab, in dem die elektrischen Schwingungen stattfinden. Je kleiner die Dimensionen des Körpers sind, desto kleiner ist auch die Schwingungsperiode und um so größer folglich die Frequenz, die hier als eine Schwingungszahl aufzufassen ist, die auf eine

Sekunde entfallen würde, wenn die Entladung eine ganze Sekunde dauerte. In Wirklichkeit werden die wenigen Schwingungen, die wir gesehen haben, in einem ganz geringen Bruchteil einer Sekunde ausgeführt. Um einen Begriff von der Größe der Periode dieser elektrischen Schwingungen zu geben, kann man auf folgendes hinweisen. Besitzt der Körper sehr große Abmessungen, ist er z. B. eine Stange von mehreren Dutzend Meter Länge, so kann die Periode die Größe von einem Hunderttausendstel einer Sekunde erreichen. Bei kleinen Körpern, deren Dimensionen nur einige Zentimeter betragen, ist die Periode eine Million mal so klein, d. h. die Frequenz, bezogen auf eine ganze Sekunde, erreicht die Zahl von hunderttausend Millionen. Dem in Fig. 18 dargestellten Falle entsprechen folgende genauere Angaben. Der Durchmesser der beiden gleich großen Kugeln *A* und *B* möge 30 cm betragen, der Verbindungsdraht sei 1 m lang und 5 mm dick. Die Periode der elektrischen Schwingungen dauert dann ungefähr ein Dreißigmillionstel einer Sekunde. Ersetzt man die Kugeln durch quadratförmige Platten mit einer Seitenlänge von 40 cm, so wird die Periode etwas geringer und die Frequenz beträgt 35 Millionen.

**§ 8. Das Prinzip der Resonanz.** Wir wenden uns der zweiten der beiden im vorigen Paragraphen erwähnten Fragen zu, dem Prinzip der Resonanz. Angenommen, wir haben einen Körper, der Schwingungen auszuführen vermag. Wie wir gesehen haben, wird die Periode dieser Schwingungen durch die Größen, die den Körper selbst charakterisieren (Gestalt, Abmessungen, Material), und durch die auf ihn einwirkenden Kräfte vollständig bestimmt. Ein derartiger Körper kann zu schwingen anfangen, wenn man auf ihn durch Stöße einwirkt, die zwar ganz schwach sein können, jedoch in gleichen Zeitabschnitten, die einer Periode entsprechen, aufeinanderfolgen müssen. Diesen Vorgang kann man wohl am besten mit dem Ausdruck „in Schwung bringen“ bezeichnen. Wir haben z. B. eine schwere Schaukel mit Menschen vor uns, und die Periode, d. h. eine volle Schwingung hin und zurück, beanspruche 10 Sekunden. Es ist wohl selbstverständlich, daß die Schaukel nicht in Schwung kommt, wenn man ihr in ungleichen Zeitabschnitten oder nicht alle 10 Sekunden, sondern

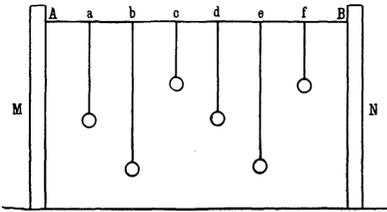
z. B. alle 7 oder 16 Sekunden Stöße versetzt. Stößt man die Schaukel nur von einer Seite, so muß man darauf achten, daß auf jede ganze Schwingung, d. h. auf 10 Sekunden, ein Stoß entfällt und dabei zu geeigneter Zeit und in zweckentsprechender Richtung. Übrigens kann man die Stöße alle 20, 30 usw. Sekunden ausführen. Auch in diesem Falle kommt die Schaukel in Schwung, man braucht jedoch viel mehr Zeit als bei einem Stoß auf jede Schwingung.

Nehmen wir jetzt zwei Körper *A* und *B* mit gleicher Schwingungsperiode. Man sagt in diesem Falle, die Schwingungen seien synchron. Die Körper mögen sich in einer gewissen Entfernung voneinander befinden und zwischen ihnen sei etwas vorhanden, was „Schwingungen zu übertragen“ imstande ist. Was darunter gemeint ist, wird sich aus späteren Beispielen ergeben. Zunächst mögen sich beide Körper in Ruhe befinden. Jetzt versetzen wir den Körper *A* in Schwingung. Die Schwingungen werden „übertragen“, gelangen bis zum Körper *B* und wirken auf ihn durch aufeinanderfolgende Stöße ein, so daß jeder Schwingung des Körpers *A* ein Stoß entspricht. Da die Schwingungsperioden von *A* und *B* gleich sind, so kommt auch im Körper *B* je ein Stoß auf eine Periode. Es ist klar, daß *B* zu schwingen beginnt. Mithin haben die Schwingungen des Körpers *A* im Körper *B* synchrone Schwingungen hervorgerufen. Die hier beschriebene Erscheinung heißt Resonanz. Wird der Synchronismus aufgehoben, indem z. B. auf irgend eine Weise die Periode des einen Körpers geändert wird, so verschwindet die Resonanz, d. h. die Schwingungen des einen Körpers bringen den anderen nicht mehr in Schwung, da er nun Stöße in Zeitabschnitten erhält, die seiner Periode nicht entsprechen. Diese Ausführungen sollen an zwei Beispielen geklärt werden.

1. Die Pendelresonanz. Zwischen zwei Säulen *M* und *N* (Fig. 19) ist eine gewöhnliche Schnur gezogen und an dieser hängen Pendel von verschiedener Länge, bestehend aus einem Faden und einer Metall- oder Beinkugel. Die Pendel *a* und *d*, *b* und *e*, *c* und *f* sind gleich lang, besitzen mithin gleiche Schwingungsperioden. Bringen wir ein Pendel, z. B. *b*, ins Schwingen, und zwar in einer Ebene senkrecht zur Ebene der Figur, d. h. nicht etwa nach rechts und nach links, sondern, vom Leser aus betrachtet, nach vor-

und rückwärts. Hier überträgt die Schnur die Schwingungen, da das schwingende Pendel dem Punkte *b* leichte Stöße nach vor- und nach rückwärts versetzt. Sie pflanzen sich längs der Schnur fort und gelangen so an die Aufhängpunkte aller Pendel, die also von den Pendelschwingungen *b* synchrone Stöße nach vor- und nach rückwärts erhalten. Diese Stöße bringen jedoch nur das

Fig. 19.



Pendel *e* in immer stärkeres und stärkeres Schwingen. Die übrigen, die asynchrone Stöße empfangen, d. h. in Zeitabschnitten, die ihrer Periode nicht entsprechen, führen ganz unregelmäßige Bewegungen aus: bald schwingen sie etwas, bald stehen sie still. Reso-

nanz tritt nur im Pendel *e* auf. Zuweilen läßt sich folgende interessante Erscheinung beobachten. Die Schwingungen des Pendels *e* werden größer, während die von *b* abnehmen. Schließlich schwingt *e* genau so stark, wie es *b* am Anfang getan hatte, und *b* steht still: seine ganze Energie ist an *e* übergegangen. Nun beginnt aber derselbe Prozeß in entgegengesetzter Richtung. Das Pendel *b* beginnt zu schwingen, die Schwingungen von *e* verzögern sich, die Energie geht nun von *e* nach *b* über. Hätten wir nicht *b*, sondern *a* oder *c* ins Schwingen gebracht, so hätten wir entsprechend in *d* oder *f* Resonanz beobachten können.

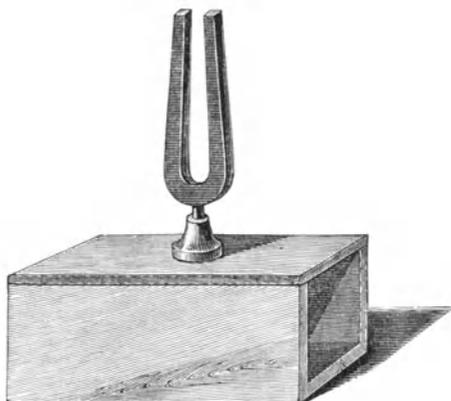
Eine interessante Beobachtung macht man in einem Falle, in dem der Synchronismus nicht vollkommen ist, d. h. in dem die Schwingungszeiten zweier Pendel nicht ganz gleich sind. Das stärker schwingende Pendel beschleunigt die Bewegung des anderen und dieses seinerseits verzögert die des ersten, so daß im Resultat beide Pendel eine gewisse mittlere Schwingungszeit erhalten. Der englische Uhrmachermeister Ellicot hatte schon im Jahre 1739 bemerkt, daß mit Pendeln versehene Wanduhren, die, weit voneinander entfernt, unbedingt verschieden gehen, gleiche Geschwindigkeit annehmen, wenn sie an einem gemeinsamen Brette befestigt werden: das Brett überträgt hier die Schwingungen.

2. Akustische (Schall-) Resonanz. In Fig. 20 ist eine allgemein bekannte Stimmgabel auf einem von einer Seite offenen

Kasten befestigt. Wir stellen in einer gewissen Entfernung voneinander zwei gleiche Stimmgabeln auf, so daß die beiden Öffnungen der Kasten sich gegenüberliegen. Die Gabeln seien auf einen und denselben Ton gestimmt, d. h. sie führen eine gleiche Anzahl von Schwingungen in der Sekunde aus. Bringt man die eine Stimmgabel auf gewohnte Art zum Tönen, indem man ihr z. B. mit einem weichen Hammer einen Schlag erteilt, und erstickt nach einiger Zeit die Schwingungen mit der Hand, so hört man ganz deutlich das Tönen der anderen Stimmgabel. Die Schwingungen überträgt hier die Luft. Die Schwingungen der ersten Gabel rufen Längsschwingungen (S. 133) der Luftteilchen hervor, und diese gelangen, sich nach allen Seiten ausbreitend, zur zweiten Gabel. Die unmittelbar an

der Oberfläche dieser Gabel befindlichen Luftteilchen führen Schwingungen aus, deren jede einen schwachen Stoß gegen die Gabel zur Folge hat. Die Anzahl der Stöße in der Sekunde ist aber gleich der Schwingungsfrequenz der ersten Stimmgabel, d. h. beträgt allgemein mehrere hundert. Alle diese Stöße sind den Schwingungen der zweiten

Fig. 20.



Gabel synchron, so daß letztere auch zu schwingen beginnt und einen Ton erzeugt: in der zweiten Gabel tritt Resonanz auf. Es ist bemerkenswert, daß die so sehr schwachen Stöße der Schallschwingungen imstande sind, massive, aus Stahl hergestellte Stimmgabeln zum Schwingen zu bringen. Die Resonanz hört auf, wenn die eine Stimmgabel verstimmt ist. Dies läßt sich leicht erreichen, indem an der Gabel kleine Wachsstücke befestigt werden. Resonanz tritt auch zwischen Körpern auf, die der Form und dem Stoffe nach verschieden sind, wenn sie zu tönen imstande und auf den gleichen Ton gestimmt sind. Es ist wohl allgemein bekannt, daß eine Luftsäule tönen kann, und daß auf diesem Umstande die Einrichtung der Orgelpfeifen und anderer Blasinstrumente

beruht. Die Abmessungen des Kastens in Fig. 20 sind so gewählt, daß die in ihm befindliche Luftsäule durch Schwingungen denselben Ton erzeugt wie die Stimmgabel, wobei durch Resonanz der Ton der letzteren ungemein verstärkt wird. Eine Saite tönt, wenn sie von einem zusammengesetzten Ton getroffen wird, in dem ihr eigener Ton als Bestandteil enthalten ist. Drückt man auf das Pedal eines Flügels und erzeugt über den Saiten irgend einen zusammengesetzten, aber starken und langanhaltenden Ton, indem man z. B. laut aufschreit, so ahmen die Saiten erstaunlich genau den Ton, z. B. einen Vokal, nach. Alle Töne, aus denen der zusammengesetzte Ton besteht, bringen die ihnen entsprechenden Saiten ins Schwingen, wobei die Energie einer jeden Schwingung der Stärke des betreffenden Tones proportional ist. Auf diese Weise addieren sich die Töne aller Saiten und rekonstruieren den ursprünglichen zusammengesetzten Ton, so daß wir hier eine gleichzeitige Analyse (Zergliederung) und Synthese (Zusammenfassung) vor uns haben. Dieser Versuch zeigt, daß die Körper imstande sind, aus einer großen Anzahl von Tönen, die gleichzeitig bis zu ihnen gelangen, sogar wenn sie für unser Ohr einen einzigen Ton darstellen, die ihnen entsprechende Schwingung aufzufangen.

**§ 9. Die Hertz'schen Strahlen.** In den Jahren 1887 bis 1889 erschien eine Reihe von unsterblichen Arbeiten des genialen Forschers Heinrich Hertz, der bereits 1894 verstorben ist (geb. 1857). Das Jahr 1888 kann man als Beginn der neuesten Periode der Geschichte der Physik betrachten. Die Abhandlungen von Hertz enthalten viele interessante Entdeckungen. So z. B. hat er entdeckt, daß ultraviolette Strahlen, die auf die Oberfläche von negativ elektrisierten Körpern treffen, die Entladung derselben fördern. Befinden sich die Kugeln *a* und *b* in Fig. 18 so weit voneinander, daß eine Entladung nicht erfolgen kann, so kann eine Belichtung der negativ elektrisierten Kugel mit ultravioletten Strahlen eine solche hervorrufen, d. h. zwischen den Kugeln einen Funken erzeugen. Mit dieser Erscheinung haben sich in der Folge viele Forscher befaßt, insbesondere Prof. A. G. Stoletow in Moskau (1839 bis 1896), welcher der Entdeckung von Hertz viel Neues und Interessantes beigefügt hat.

Den ersten Platz unter allen Entdeckungen von Hertz nehmen jedoch die elektrischen Strahlen ein, die eine neue Art der Strahlungsenergie darstellen. Wir können hier die Wege nicht betrachten, die Hertz zu seiner großen Entdeckung geführt haben. Wir wollen nur bemerken, daß er sich von den Gedanken leiten ließ, auf denen die bereits mehrfach erwähnte elektromagnetische Lichttheorie von Maxwell (s. § 12) beruht.

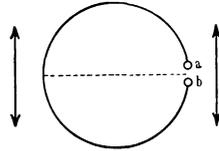
Die Entdeckung, die Hertz gemacht hat, war bei weitem keine zufällige (S. 33). Er war von der Existenz der Strahlen, deren Spektrum weit hinter dem infraroten Teil des Spektrums der Strahlungsenergie liegt, überzeugt und suchte nach einer Möglichkeit, sie hervorzurufen und ihre Eigenschaften zu erforschen. Die Theorie brachte ihn auf den Gedanken, daß von einer Stelle, an welcher elektrische Schwingungen stattfinden, nach allen Seiten Strahlen ausgehen müssen, die sich von den sichtbaren und den infraroten durch größere Wellenlänge unterscheiden, im übrigen aber alle Eigenschaften der anderen Arten der Strahlungsenergie besitzen. Ihre Geschwindigkeit muß der des Lichtes gleich sein (300 000 km in der Sekunde). Sie werden reflektiert und gebrochen wie die übrigen von uns schon betrachteten Strahlen, und weisen alle anderen Eigenschaften der Lichtstrahlen auf, die wir hier nicht beschreiben wollen, z. B. Interferenz, Diffraktion, Polarisation, Doppelbrechung usw. Die Erwartungen haben sich bewahrheitet, und es gelang Hertz, die Existenz solcher Strahlen zu beweisen, ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu bestimmen und ihre wichtigsten Eigenschaften festzustellen. Als Strahlenquelle diente ihm eine schwingende elektrische Entladung, in einem System, wie es in Fig. 18 (S. 158) abgebildet ist. Man bezeichnet eine solche Quelle von elektrischen Strahlen mit dem Namen Vibrator. Von ihr gehen tatsächlich nach allen Seiten Strahlen aus, deren Schwingungsperiode gleich ist der Periode der elektrischen Schwingung, die die Strahlen hervorruft. Vom Standpunkt der alten mechanischen Theorie der Strahlungsenergie ausgehend, hätten wir sagen müssen, daß die Vibrationen, d. h. die Schwingungen der Elektronen im Äther eine „Erschütterung“ hervorrufen, die sich nach allen Seiten ausbreitet. Der Vibrator spielt die Rolle des tönenden Körpers

und der Äther die Rolle der Luft, in der sich die akustischen Schwingungen ausbreiten. Wiederholt haben wir darauf hingewiesen, daß die mechanische Theorie der Strahlungsenergie heute bedingungslos verworfen und durch die elektromagnetische Theorie von Maxwell ersetzt ist. Um jedoch alle Arten der Strahlungsenergie kennenzulernen, d. h. um der Aufgabe dieses Kapitels gerecht zu werden, können wir vorläufig die theoretische Frage beiseite lassen. Auf diese kommen wir in § 12 zurück.

Vor allem muß gezeigt werden, wie die Existenz solcher Strahlen bewiesen werden kann, wie man imstande ist, ihr Vorhandensein an einem gegebenen Orte nachzuweisen, d. h. wie man ihnen auf die Spur kommt. Sichtbare Strahlen erspät man mit dem Auge, unsichtbare werden auf viererlei Wegen nachgewiesen: durch ihre Wärmewirkung, chemische Wirkung, Fluoreszenz und durch das Löschen der Phosphoreszenz. Bei den Hertzischen Strahlen versagen alle vier Methoden. Hier mußte eine neue angewandt werden, die auf der in § 8 besprochenen Resonanz beruht. Wir haben die Resonanz der Pendel und die akustische Resonanz kennengelernt. Jetzt begegnen wir der elektrischen Resonanz. In einer gewissen Entfernung vom Vibrator (Fig. 18) stellen wir einen Metallkörper auf, in dem elektrische Schwingungen von einer Periode gleich der Periode der elektrischen Schwingungen im Vibrator erzeugt werden können (s. § 7). Diesen Körper bezeichnen wir mit dem Namen Resonator, denn in ihm entstehen Schwingungen nach dem Resonanzprinzip. Die Schwingungen, die der Vibrator hervorruft und die, sich nach allen Seiten ausbreitend, das Wesen der Hertzischen Strahlen bilden, erreichen den Resonator, bringen dessen Elektronen in Bewegung und rufen in ihm elektrische Schwingungen hervor. Die Abmessungen des Vibrators, den Hertz benutzte, sind auf S. 160 angeführt worden. Die Berechnung zeigt, daß ein zu einem Kreise gebogener Draht mit einem Radius von 35 cm hier als Resonator dienen kann, da die Periode der in ihm möglichen Schwingungen der Periode im Vibrator (Fig. 18) gleich ist: sie beträgt den sechzigmillionsten Teil einer Sekunde. Um in solch einem Resonator elektrische Schwingungen nachweisen zu können, ordnete Hertz im Drahtkreise einen kleinen Luftspalt *ab* an (Fig. 21), in dem ein Funke auftritt, wenn die den Resonator

erreichenden Schwingungen eine Richtung besitzen, wie sie in Fig. 21 durch Pfeile angedeutet ist. Sie verlaufen also in der Ebene des Resonators, und zwar senkrecht zum Durchmesser des Ringes, gezogen durch den Luftspalt *ab*. In Fig. 21 ist dieser Durchmesser punktiert angegeben. Mithin weist der Funke darauf hin, daß die vom Vibrator erzeugten Schwingungen den Resonator erreicht haben. Ändert man die Abmessungen des letzteren, indem man z. B. den Radius des Kreises verkleinert oder vergrößert, so tritt keine Resonanz auf, und der Apparat kann nicht mehr dazu dienen, Strahlen von der genannten Periode nachzuweisen. Dagegen reagiert er jetzt auf Strahlen von einer anderen Periode, die derjenigen seiner eigenen elektrischen Schwingungen gleich ist.

Fig. 21.



Außer dieser Methode eines Resonators mit Funkenstrecke gibt es heute eine ganze Reihe (nicht weniger als sechs) anderer Methoden zur Aufdeckung der elektrischen Schwingungen im Resonator. Die dabei zur Verwendung kommenden Apparate nennt man Indikatoren oder Detektoren. Unter ihnen spielen eine wichtige Rolle die Kohärer, deren Einrichtung darauf beruht, daß der elektrische Widerstand von Metallspänen sich unter der Einwirkung der durch sie hindurchgehenden elektrischen Schwingungen ändert. Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, wollen wir bemerken, daß es mit Hilfe von verschiedenen Detektoren gelungen ist, die Eigenschaften der Hertzschen Strahlen allseitig zu erforschen. Die Prophezeiungen der Theorie erwiesen sich in jeder Hinsicht als richtig (S. 27, 29). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Strahlen ist in der Tat gleich der Lichtgeschwindigkeit. Sie werden reflektiert und gebrochen wie die anderen Arten der Strahlungsenergie und weisen alle übrigen, von uns nicht betrachteten Eigenschaften, z. B. der Lichtstrahlen, auf, wie Interferenz, Differenz, Diffraktion, Doppelbrechung usw. Ohne jeden Zweifel stellen die Hertzschen Strahlen eine Art der Strahlungsenergie dar.

Die Hertzschen Strahlen bezeichnet man oft als elektrische Strahlen, denn zweifellos werden sie durch eine Erscheinung rein elektrischen Charakters hervorgerufen, und zwar

durch elektrische Schwingungen eines Vibrators. Man würde jedoch den größten Fehler begehen, wollte man mit dieser Bezeichnung den Gedanken verbinden, daß diese Strahlen dem Wesen nach etwas ganz anderes seien als die in den früheren Paragraphen betrachteten Arten der Strahlungsenergie. Man muß folgendermaßen überlegen: Die Hertzschen Strahlen stellen zweifellos eine Art der Strahlungsenergie dar und werden gleichfalls zweifellos von elektrischen Schwingungen hervorgerufen. Daraus muß man schließen, daß auch alle anderen Arten der Strahlungsenergie, darunter das sichtbare Licht, dort ihren Ursprung haben, wo eine Elektronenbewegung von ganz bestimmter Art vor sich geht. Bezeichnet man die Hertzschen Strahlen als elektrische, so muß man diesen Namen auch allen übrigen Arten der Strahlungsenergie beilegen und diese als elektromagnetische Erscheinungen betrachten. Wir sagen „elektromagnetische“ und nicht einfach elektrische, denn die bewegten Elektronen rufen im umgebenden Raume nicht nur elektrische, sondern auch magnetische Kräfte hervor. Letzteres ersieht man daraus, daß der gewöhnliche elektrische Strom, d. h. eine Elektronenbewegung im Drahte, eine Magnetnadel beeinflußt (S. 61), Eisen magnetisiert usw., d. h. magnetische Wirkung ausübt. Auf diesem Umwege sind wir auf den Gedanken gekommen, daß das Licht eine elektromagnetische, durch eine bestimmte Elektronenbewegung hervorgerufene Erscheinung darstellt. Die Bezeichnung „elektrische Strahlen“, mit der man die Hertzschen Strahlen belegt, soll durchaus nicht ihr Wesen oder die Art ihrer Entstehung charakterisieren, sondern nur daran erinnern, daß sie offenbar dort entstehen, wo elektrische Schwingungen ausgeführt werden, d. h. eine Elektronenbewegung von besonderer Art vor sich geht. Alle anderen Arten der Strahlungsenergie sind gleichfalls elektrische Strahlen, denn zweifellos sind auch sie die Folge einer Elektronenbewegung, wenn auch der Charakter derselben bei verschiedenen Arten der Strahlungsenergie nicht der gleiche ist.

Wir gehen jetzt zur Frage nach der Schwingungsfrequenz und der Wellenlänge der Hertzschen Strahlen über. Wir wollen feststellen, welchen Platz sie im allgemeinen Spektrum der Strahlungsenergie einnehmen. Wir wollen uns erinnern, daß

die Wellenlänge der Entfernung gleich ist, auf die sich die Schwingungsbewegung während einer Periode ausbreitet, so daß wir sie durch Division der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlungsenergie (300000 km in der Sekunde) durch die Schwingungsfrequenz, d. h. durch die Schwingungszahl pro Sekunde erhalten können. Es ist auf S. 166 gesagt worden, daß die Schwingungsfrequenz der Hertzischen Strahlen der Frequenz jener elektrischen Schwingungen gleich ist, von denen sie hervorgerufen werden. Die Schwingungen der Elektronen können jedoch beliebig langsam erfolgen. Daraus schließen wir, daß die Schwingungsfrequenz der Hertzischen Strahlen beliebig klein und die Wellenlänge beliebig groß sein kann. Denken wir uns, daß eine elektrisierte Kugel, z. B. mit der Hand, langsam nach oben und nach unten bewegt wird. Es erfolgt dabei eine Schwingungsbewegung der Elektronen, und es müssen folglich von dem Orte, wo die Kugel bewegt wird, nach allen Seiten Hertzische Strahlen ausgehen. Vollführt man in einer Sekunde nur eine Schwingung der Kugel (nach oben und nach unten), so erhält man einen Strahl, dessen Wellenlänge 300000 km beträgt. Bei einer noch langsameren Bewegung der Kugel fällt die Wellenlänge noch größer aus. Es ist einleuchtend, daß auf der Seite der anwachsenden Wellenlängen dem Spektrum der Hertzischen Strahlen keine Grenze gesetzt ist. Strahlen von so gewaltiger Wellenlänge bieten jedoch gar kein Interesse und können überhaupt nicht nachgewiesen werden. Vollführt die elektrisierte Kugel 100, 1000 oder 10000 Schwingungen in der Sekunde, so erhält man entsprechend Wellenlängen von 3000, 300 und 30 km. Auch solche Strahlen schließen wir aus dem Spektrum der Strahlungsenergie aus. Es liegt mithin in unserer Hand, den Anfang dieses Spektrums beliebig festzulegen, und so wollen wir mit der Wellenlänge

$$\lambda = 4 \text{ km}$$

beginnen, der eine Frequenz von

75000 Schwingungen in der Sekunde

entspricht.

Wir wählen gerade diese Zahlen, weil der betreffende Strahl bereits praktische Bedeutung für die drahtlose Telegraphie besitzt.

Wir dürfen jedoch nicht vergessen, daß wir ganz willkürlich das Spektrum der Strahlungsenergie bei diesem Strahl abbrechen und einen, streng genommen, unendlich langen, doch uninteressanten Teil desselben auf der Seite der unendlich anwachsenden Wellenlängen außer acht lassen.

Mithin soll das Spektrum der Hertz'schen Strahlen mit einem Strahl beginnen, dessen Wellenlänge 4 km beträgt und der eine Frequenz von 75 000 Schwingungen in der Sekunde besitzt. Einen solchen Strahl erhält man durch elektrische Schwingungen in einem Körper (Draht) von sehr bedeutenden Dimensionen.

Bei seinen ersten Versuchen (1887 bis 1888) benutzte Hertz elektrische Schwingungen in einem System, wie es in Fig. 18 abgebildet ist. Die Dauer einer Schwingung (hin und zurück) reichte nahe an ein Dreißigmillionstel Sekunde heran. Dividiert man die Geschwindigkeit von 300 000 km durch 30 Millionen, so erhält man eine Wellenlänge von 10 m. Genauere Rechnung und unmittelbare Messungen haben gezeigt, daß der Apparat von Hertz (Fig. 18) Strahlen ergibt, deren Wellenlänge 9 m beträgt. Wir haben gesehen (S. 159), daß die Periode der elektrischen Schwingungen um so geringer ist, je kleiner die Dimensionen der Körper sind, in denen die Schwingungen stattfinden. Wir können sagen, daß je kleiner die Abmessungen des Vibrators sind, desto kleiner die Wellenlänge des von ihm ausgesandten Strahles ausfällt. Auf diese Weise entstand die Aufgabe, Hertz'sche Strahlen von möglichst geringer Wellenlänge zu erzeugen. Hertz selbst hat einen Vibrator konstruiert, der aus zwei Metallzylindern von 3 cm Dicke und je 13 cm Länge bestand. Die Achsen der Zylinder lagen auf einer Geraden, und die einander zugekehrten Grundflächen endeten kugelförmig und hatten einen Durchmesser von 4 cm. Sie wurden bis auf 3 mm einander genähert. Die Periode der elektrischen Schwingungen, die in diesem Vibrator erzeugt werden konnten, betrug ungefähr ein Vierhundertsechzigmillionstel einer Sekunde. Man erhält daraus eine Wellenlänge von 66 cm, die also etwa 14mal kleiner ist als die von Hertz früher gewonnene.

P. N. Lebedew (1895) erzeugte als erster Hertz'sche Strahlen, deren Wellenlänge noch 110mal kleiner war und nur 6 mm

betrug. Sein Vibrator bestand aus zwei kleinen Platinzylindern von 0,5 mm im Durchmesser und einer Länge von 1,3 mm. Die kleinste Wellenlänge, die bis jetzt erreicht, jedoch nicht genau gemessen werden konnte, war jedenfalls nicht kleiner als 4 oder im äußersten Falle 3 mm. Es entspricht ihr eine Frequenz von bereits  $10^{11}$  (hunderttausend Millionen) Schwingungen in der Sekunde.

Setzt man, wie verabredet, den Anfang des Spektrums der Hertzschens Strahlen auf  $\lambda = 4$  km, so umfaßt das ganze Spektrum bis zu  $\lambda = 3$  mm etwa 20 Oktaven. Diese Zahl ist ganz zufällig und könnte beliebig vergrößert werden, wenn man Strahlen von noch größerer Wellenlänge berücksichtigt hätte. Dennoch kann man sagen, daß das Gebiet der Hertzschens Strahlen, die von allgemein wissenschaftlichem und speziell technischem Interesse sind, nicht weniger als 20 Oktaven umfaßt.

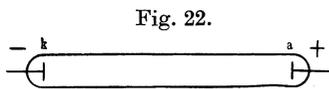
Es ist auf S. 146 gesagt worden, das infrarote Spektrum sei bis zu einer Wellenlänge von  $\lambda = 0,3$  mm verfolgt worden. Das Spektrum der Hertzschens Strahlen erreicht, wie gesagt, ein  $\lambda = 3$  mm. Es befindet sich also zwischen dem infraroten Strahl mit der größten Wellenlänge und dem Hertzschens mit der kleinsten ein unerforschtes Gebiet von etwa  $3\frac{1}{2}$  Oktaven. In diesem Zwischenraum ändert sich die Frequenz von  $10^{11}$  bis zu  $10^{12}$  Schwingungen in der Sekunde.

Wir haben bereits angedeutet, daß die Hertzschens Strahlen alle Grundeigenschaften der anderen Arten der Strahlungsenergie, z. B. der sichtbaren Lichtstrahlen, besitzen. Wir wollen nur eine interessante Eigenschaft hervorheben. Sämtliche Nichtleiter sind für sie vollkommen durchsichtig. Wände aus Holz, Stein oder Ziegeln sind für sie ebenso durchlässig wie farbloses Glas für Lichtstrahlen. Von elektrischen Leitern dagegen, z. B. von Metallen, werden diese Strahlen vollständig reflektiert.

Der Hertzschens Strahlen bedient man sich in der drahtlosen Telegraphie. Auf der Sendestation befindet sich ein Vibrator in Gestalt eines langen Drahtes (Antenne), in dem elektrische Schwingungen erregt werden. Auf der Empfangsstation wird ein Resonator, gleichfalls in Form einer Antenne, aufgestellt. Die vom Vibrator ausgehenden Hertzschens Strahlen erreichen den Reso-

nator und rufen in ihm elektrische Schwingungen hervor, die von einem Detektor angezeigt werden (S. 167). Als Erfinder der drahtlosen Telegraphie wird der Italiener Marconi angesehen. Gleichzeitig mit ihm verwirklichte diese Idee der russische Forscher A. S. Popoff (1859 bis 1905). Streng genommen, kann hier von einer Erfindung nicht die Rede sein, denn Hertz, der Entdecker der elektrischen Strahlen, benutzte in seinen Versuchen bereits einen Vibrator und einen Resonator, operierte also mit einem drahtlosen Telegraphen. Es blieb eigentlich nichts übrig, als diese bereits fertige Entdeckung technischen Zwecken anzupassen, was von Popoff in Kronstadt und von Marconi in Italien verwirklicht worden ist.

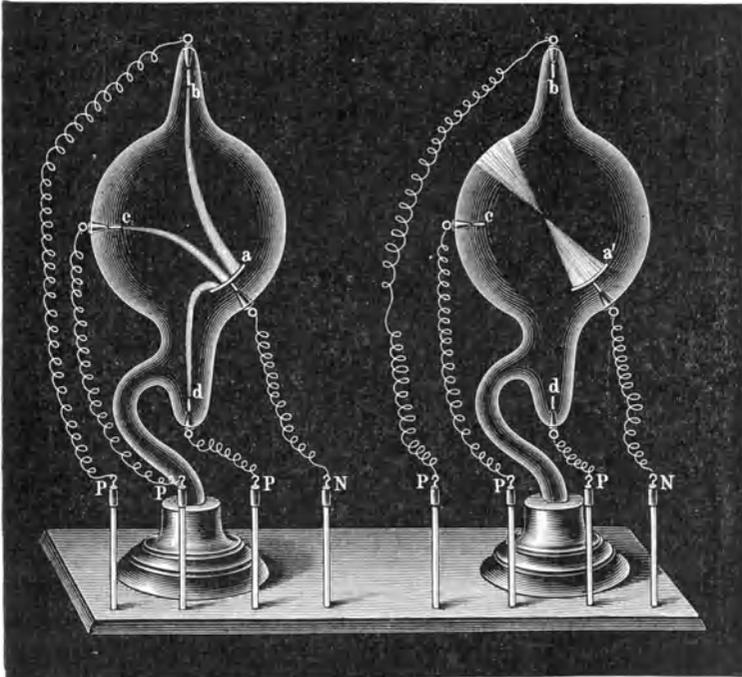
**§ 10. Röntgenstrahlen.** Der Professor der Würzburger Universität, Röntgen (später bis zu seinem Tode in München), entdeckte im Jahre 1895 eine neue Art von Strahlen, die über ganz merkwürdige Eigenschaften verfügten und die allgemeine Aufmerksamkeit auf sich lenkten. Vor allem wollen wir zeigen, wie man solche Strahlen gewinnt. Es ist allgemein bekannt, daß verdünnte Gase leuchten, wenn sie von einem elektrischen Strome durchflossen werden. In Fig. 22 ist eine an beiden Enden geschlossene Glasröhre mit verdünntem



Gas abgebildet. Der Druck desselben beträgt etwa ein Tausendstel Atmosphäre, so daß die Röhre bei Atmosphärendruck 1000mal mehr Luft enthalten würde. Durch die Enden der Röhre sind Platindrähte geführt, an die im Innern zuweilen Metallplättchen *a* und *k* angelötet werden. Nehmen wir an, daß durch die Röhre ein elektrischer Strom fließt und daß die negativen Elektronen an der Seite *k* eintreten. In diesem Falle heißt die Platte *k* Kathode, während *a* als Anode bezeichnet wird. Unter Einwirkung des Stromes leuchtet das Gas in der Röhre. Statt einer Röhre kann ein Glasgefäß von beliebiger Form genommen werden, z. B. in Gestalt einer Kugel. Man ist übereingekommen, alle solche Gefäße mit dem Namen Röhre zu bezeichnen, auch wenn sie diesem Namen nicht entsprechen. Röhren, die der in Fig. 22 abgebildeten gleichen, jedoch mit verengtem Mittelteil, verfertigte erstmals H. Geissler (1814 bis 1879)

in Bonn. Daher bezeichnet man bis zum heutigen Tage solche Röhren von beliebiger Gestalt als Geisslersche Röhren. Ist jedoch die Verdünnung des Gases so weit getrieben, daß in den Röhren neue Erscheinungen auftreten, die zuerst von Plücker (1801 bis 1868) bemerkt, von Hittorf (1824 bis 1915) beschrieben und besonders eingehend vom englischen Forscher Crookes (geb. 1832) untersucht worden sind (1874), so nennt man die Röhren Hittorfsche

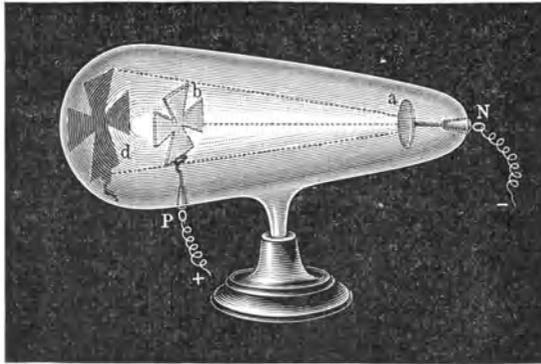
Fig. 23.



oder Crookessche Röhren. Die wichtigste Erscheinung, die in letzteren beobachtet werden kann, ersieht man aus Fig. 23. Es sind zwei Röhren von gleicher Form abgebildet, von denen jedoch *A* (links) eine Geisslersche und *B* eine Crookessche mit weniger Gas darstellen. In jeder Röhre dient eine konkave Platte *a* als Kathode, durch welche die Elektronen in das verdünnte Gas eintreten. Statt einer einzigen Anode besitzt jede Röhre drei eingelötete Drähte *b*, *c* und *d*, von denen jeder als

Anode dienen kann. Die Geisslersche Röhre (links) zeigt folgende Erscheinung: Benutzt man *a* als Kathode und einen der drei Drähte *b*, *c* oder *d* als Anode, so erblickt man im Innern der Röhre (im kugelförmigen Teil) einen leuchtenden Streifen, der sich von der Kathode *a* bis zu der gewählten Anode, d. h. bis zu einem der drei Drähte, erstreckt. In Fig. 23 sind alle drei Streifen abgebildet. In Wirklichkeit sieht man nur einen, und zwar denjenigen, dessen Ende sich an der gewählten Anode befindet. Etwas ganz anderes erblickt man in der Crookesschen Röhre *B*. Von der Oberfläche der Kathodenplatte gehen irgendwelche Strahlen aus, senkrecht zu dieser Oberfläche, und breiten sich geradlinig bis zu der gegenüberliegenden Gefäßwand aus. Längs

Fig. 24



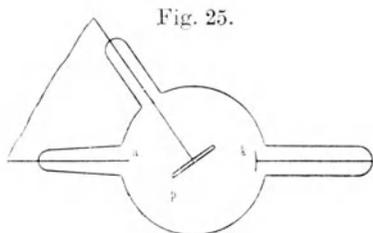
dieser Strahlen beobachtet man im Innern der Röhre ein schwaches Leuchten, während das Glas an der Stelle, an welcher es von den Strahlen getroffen wird, sehr stark leuchtet: das Glas fluoresziert (S. 143), und zwar gewöhnlich grün. In Fig. 23 ist die Kathodenplatte stark konkav, weshalb die Strahlen sich zuerst in einem Punkt vereinigen und darauf wieder divergieren. Gewöhnlich nimmt man eine ebene oder schwach konkave Platte. In diesem Falle verlaufen die Strahlen parallel oder in einem schwach konvergierenden Bündel von der Kathode bis zur Gefäßwand. Die Erscheinung ist von der Lage der Anode vollkommen unabhängig. Sie ändert sich nicht, wenn man den Strom statt durch den Draht *b* durch *c* oder *d* fließen läßt. Die in einer hoch evakuierten Crookesschen Röhre von der Kathode

ausgehenden Strahlen nennt man Kathodenstrahlen. Ihre geradlinige Ausbreitung ersieht man am besten in einer Röhre, wie sie in Fig. 24 abgebildet ist. Es ist hier  $a$  die Kathodenplatte, während die Anode sich irgendwo an der Seite im Punkte  $P$  befindet. In die Bahn der Kathodenstrahlen stellt man ein Metallkreuz  $b$ , welches auf der Glasoberfläche einen scharf umrandeten Schatten  $d$  ergibt.

Untersuchungen, auf die wir nicht näher eingehen, zeigen, daß die Kathodenstrahlen Ströme von Elektronen darstellen, die von der Kathodenplatte senkrecht zu ihrer Oberfläche ausfliegen. Sie bewegen sich mit beschleunigter Geschwindigkeit und rufen, auf das Glas treffend, Fluoreszenz hervor. Die Geschwindigkeit der Elektronen im Kathodenstrahl ist, allgemein gesprochen, sehr hoch. Sie reicht an die Lichtgeschwindigkeit heran und kann leicht auf ein Drittel derselben, also auf 100 000 km in der Sekunde, gebracht werden. Es ist sogar gelungen, eine Geschwindigkeit zu erzielen, die 150 000 km in der Sekunde, d. h. die Hälfte der Lichtgeschwindigkeit erreichte. Im Kapitel über radioaktive Erscheinungen werden wir noch den sogenannten  $\beta$ -Strahlen begegnen, die gleichfalls Elektronenströme darstellen, d. h. den Kathodenstrahlen vollkommen analog sind. In ihnen erreicht die Geschwindigkeit der Elektronen die ungeheure Größe von 0,996 der Lichtgeschwindigkeit, kann also annähernd 300 000 km in der Sekunde gleichgesetzt werden. Das Interessante dabei ist, daß man es hier mit Bewegungsgeschwindigkeiten von etwas tatsächlich Existierendem, nämlich der Elektronen, zu tun hat und nicht etwa mit einer Übertragungsgeschwindigkeit eines bestimmten Zustandes (Schwingungen), als welche uns die Geschwindigkeit der Strahlungsenergie, speziell des sichtbaren Lichtes, erscheint.

Röntgen (1895) bemerkte (s. S. 17), daß ein fluoreszierender Schirm (S. 144) leuchtet, wenn in seiner Nähe eine in schwarzes Papier eingewickelte Crookesche Röhre erregt wird. Dieser Umstand zeigte ihm, daß die Röhre irgendwelche Strahlen aussendet, die ungehindert durch das schwarze Papier und durch die Luft gehen und den Schirm zum Fluoreszieren bringen. Röntgen belegte diese Strahlen mit dem Namen X-Strahlen. Heute nennt man sie allgemein Röntgenstrahlen. Sie

gehen von der Stelle der Glasoberfläche aus, die von den Kathodenstrahlen getroffen wird. Es erwies sich, daß jeder feste Körper, der von ausreichend schnellen Kathodenstrahlen getroffen wird, imstande ist, Röntgenstrahlen auszusenden. Als besonders intensive Radiatoren, d. h. Aussender von Röntgenstrahlen, haben sich Platin und andere schwere Metalle erwiesen. Moderne Röntgenröhren sind so gebaut, wie es in Fig. 25 schematisch dargestellt ist. Die Kathodenplatte ist konkav und infolgedessen erhält man ein konvergierendes Bündel von Kathodenstrahlen, die sich auf einem ganz geringen Abschnitt der Platte  $p$ , der Antikathode, konzentrieren. Als Anode dient ein Metallstäbchen  $a$ , das außen mit der Antikathode in Verbindung steht. In Fig. 25 sind allerart andere Vorrichtungen weg-



gelassen. So zeigt es sich, daß die Antikathode unter Einwirkung der Kathodenstrahlen sich stark erwärmt und infolgedessen künstlich gekühlt werden muß. Weiterhin hat man oft Vorrichtungen zur Veränderung der Gasmenge in der Röhre. Von dieser Menge hängen die Eigenschaften der Röntgenstrahlen ab, die an der Stelle der Antikathode, wo diese von Kathodenstrahlen getroffen wird, ihren Ursprung nehmen.

Es ist hier nicht am Platze, alle Eigenschaften und Abarten der Röntgenstrahlen eingehend zu betrachten. Wir wollen nur auf einige von ihnen hinweisen. Gleich den ultravioletten Strahlen rufen die Röntgenstrahlen nicht nur Fluoreszenz hervor, sondern beeinflussen auch photographische Platten. Sie schwärzen dieselben, wobei die Aufnahme in einem hellen Zimmer stattfinden kann. Die Platte wird dabei in einen Umschlag aus festem schwarzen Papier getan, das, für Licht undurchsichtig, den Röntgenstrahlen freien Durchgang gewährt.

Röntgen fand, daß die Durchsichtigkeit der Körper für die von ihm entdeckten Strahlen mit Zunahme der Körperdichte abnimmt und bei Elementen von hohem Atomgewicht besonders gering ist. Eine dicke Bleiplatte läßt die Strahlen überhaupt nicht durch, während Aluminium für sie in hohem Grade durch-

geht.

lässig ist. Sie gehen ungehindert durch Holz, Papier, Wachs, Wasser, Paraffin, Kohle, Graphit, Diamant usw. Legt man auf eine in schwarzes Papier eingewickelte photographische Platte verschiedene Gegenstände und läßt von oben Röntgenstrahlen auftreffen, so erhält man auf der Platte nach der Entwicklung Schattenabbildungen (Silhouetten) dieser Gegenstände. Legt man auf den Umschlag einen Beutel mit Metallgegenständen, z. B. Münzen, Schlüsseln usw., oder ein Reißzeug im Etui, so erhält man schwache Abbildungen des Beutels und des Etuis, dagegen erblickt man auf ihrem Hintergrund ganz deutlich die Metallgegenstände, welche die Röntgenstrahlen nur in sehr geringem Maße oder gar nicht durchlassen. Die Schwärze des Schattenbildes ist um so größer, je weniger durchsichtig die Gegenstände für Röntgenstrahlen sind. So ergeben die Knochen des menschlichen Körpers dunklere Schatten als weiche Gewebe, und letztere bilden ihrerseits je nach Bau und Dicke für die Strahlen ein größeres oder kleineres Hindernis.

Auf diese Weise erhält man Schattenbilder des Knochengerüsts von Mensch oder Tier. Auf diesen Eigenschaften der Röntgenstrahlen beruht ihre weitgehende Anwendung in der Medizin zur Erforschung der inneren Organe des menschlichen Körpers.

Es gibt Röntgenstrahlen verschiedener Art, die sich voneinander durch ihr Vermögen, verschiedene Stoffe zu durchdringen, unterscheiden. Es gibt solche, die verhältnismäßig wenig absorbiert werden, die also ein starkes Durchdringungsvermögen besitzen. Es sind das die sogenannten harten Strahlen, im Gegensatz zu den weichen, die leicht absorbiert werden und deshalb nicht sehr tief in die Stoffe zu dringen vermögen. Es versteht sich von selbst, daß Härte und Weichheit relative Eigenschaften sind, und daß es nicht möglich ist, die Grenze zwischen harten und weichen Strahlen genau festzulegen. Man kann sich alle Strahlen in eine ununterbrochene Reihe, nach anwachsender Härte geordnet, denken, so daß am Anfang der Reihe sich die weichsten und am Ende die härtesten Strahlen befinden. Je höher das Gas in der Röhre evakuiert ist und je größer die Geschwindigkeit der gegen die Antikathode fliegenden Elektronen, desto härter sind die von dieser ausgesandten Röntgenstrahlen.

Nachdem wir die Entstehungsbedingungen und einige Eigenschaften der Röntgenstrahlen betrachtet haben, gehen wir zu der Frage nach der Natur dieser Strahlen über. Im Laufe von 17 Jahren (1895 bis 1912) war das eine vielumstrittene Frage. Endgültig gelöst wurde sie erst mit Hilfe einer Experimental-methode, die von dem deutschen Forscher Laue in Vorschlag gebracht worden ist. Wir können hier auf diese Methode nicht eingehen. Mit ihrer Hilfe konnte bewiesen werden, daß die Röntgenstrahlen eine der vielen Arten der Strahlungs-energie darstellen und eine sehr kleine Wellenlänge besitzen, d. h. eine sehr große Zahl von Schwingungen in der Sekunde ausführen. Ihr Spektrum liegt weit hinter dem ultra-violetten Teil, den wir betrachtet haben (S. 150 bis 153), und der mit einer Wellenlänge  $\lambda = 500 \text{ \AA}$  seinen Abschluß fand. Da  $1 \text{ \AA}$  ein Zehnmillionstel Millimeter beträgt, so ist diese geringste Wellenlänge mithin gleich  $\frac{1}{20\,000} \text{ mm}$ .

Das Spektrum der bis zum Jahre 1924 erforschten Röntgenstrahlen erstreckt sich von  $\lambda = 12 \text{ \AA}$  bis zu  $\lambda = \frac{1}{14} \text{ \AA}$ , was über sieben Oktaven ausmacht. Die Schwingungsfrequenz der äußersten Strahlen beträgt  $2 \cdot 10^{17}$  und  $4 \cdot 10^{19}$  in der Sekunde. Zwischen den äußersten ultravioletten Strahlen ( $\lambda = 500 \text{ \AA}$ ) und den ersten Röntgenstrahlen ( $\lambda = 12 \text{ \AA}$ ) liegt ein unerforschtes Gebiet, das fünf Oktaven umfaßt. Seinen beiden Enden entsprechen Frequenzen von  $6 \cdot 10^{15}$  und  $2 \cdot 10^{17}$  Schwingungen. Die größte Wellenlänge der Röntgenstrahlen ( $\lambda = 12 \text{ \AA}$ ) ist um ein Geringes größer als ein Millionstel Millimeter und die kleinste beträgt nur ein Hundertvierzigmillionstel Millimeter. Setzt man den Durchmesser eines Atoms gleich einem Zehnmillionstel Millimeter, so zeigt es sich, daß die Wellenlänge des äußersten Strahles 14mal kleiner ist. Die Mitte des Spektrums der Röntgenstrahlen liegt 13 Oktaven weit von der Mitte des sichtbaren Spektrums entfernt. Das Ende des Spektrums der Röntgenstrahlen ( $\lambda = \frac{1}{14} \text{ \AA}$ ) befindet sich auf einer Entfernung von 16 Oktaven von den äußersten sichtbaren violetten Strahlen.

**§ 11. Übersicht über alle Arten der Strahlungsenergie.** Unser Auge empfindet die Erscheinung des sichtbaren Lichtes, dessen

Spektrum von den äußersten roten bis zu den äußersten violetten Strahlen nicht einmal eine ganze Oktave umfaßt. Wir stellen uns dieses Spektrum in Gestalt eines Streifens vor, der von links nach rechts verläuft und an seinem linken Ende den roten und am rechten den violetten Teil besitzt. Die Schwingungszahl wächst, während die Wellenlänge abnimmt, wenn man den Streifen von links nach rechts durchschreitet. In derselben Richtung wächst auch die Zahl der Schallschwingungen und nimmt die Länge der Tonwelle ab, wenn wir ein Klavier vor uns haben, auf dem die Tasten von links nach rechts die einzelnen Töne von verschiedener Höhe vertreten. Wir haben den Begriff des Lichtspektrums zu dem viel allgemeineren Begriff des Spektrums der Strahlungsenergie erweitert, von dem das sichtbare Spektrum nur einen geringen Teil bildet. Wir hatten zuerst das sichtbare Spektrum verlängert, indem wir rechts den ultravioletten und links den infraroten Teil hinzufügten: ersterer umfaßt 3, letzterer  $8\frac{1}{2}$  Oktaven. Darauf erschienen (1887) die Hertzschen Strahlen links und die Röntgenstrahlen (1895 und 1912) rechts. Es bleiben zwei unerforschte Zwischenräume, die sich wahrscheinlich allmählich verkürzen und dann ganz verschwinden werden.

Das ganze Spektrum der Strahlungsenergie zerfällt in folgende Teile. Die Schwingungszahl pro Sekunde möge mit dem Buchstaben  $N$  bezeichnet werden.

1. Hertzsche Strahlen, die sich von einer beliebig großen Wellenlänge bis zu  $\lambda = 3$  mm erstrecken. Die Schwingungszahl wächst von einem beliebig kleinen  $N$  bis zu  $N = 10^{11}$ . Beginnt man mit  $\lambda = 4$  km, so beträgt das erste  $N = 75000$  und das Spektrum umfaßt ungefähr 20 Oktaven.

2. Ein unerforschter Zwischenraum von  $\lambda = 3$  mm bis zu  $\lambda = 0,314$  mm  $= 314 \mu$ , oder von  $N = 10^{14}$  bis  $N = 10^{12}$ ; etwa  $3\frac{1}{2}$  Oktaven.

3. Infrarote Strahlen von  $\lambda = 314 \mu$  bis zu  $\lambda = 0,76 \mu = 7600$  A; von  $N = 10^{12}$  bis zu  $N = 4 \cdot 10^{14}$ ; ungefähr  $8\frac{1}{2}$  Oktaven.

4. Sichtbare oder Lichtstrahlen von  $\lambda = 0,76 \mu = 7600$  A bis zu  $\lambda = 0,4 \mu = 4000$  A; von  $N = 4 \cdot 10^{14}$  bis zu  $N = 7,5 \cdot 10^{14}$ ; weniger als eine Oktave.

5. Ultraviolette Strahlen von  $\lambda = 0,4 \mu = 4000 \text{ \AA}$  bis zu  $\lambda = 500 \text{ \AA}$ ; von  $N = 7,5 \cdot 10^{14}$  bis zu  $N = 6 \cdot 10^{15}$ ; drei Oktaven.

6. Ein unerforschter Zwischenraum von  $\lambda = 500 \text{ \AA}$  bis zu  $\lambda = 12 \text{ \AA}$ ; von  $N = 6 \cdot 10^{15}$  bis zu  $N = 2,5 \cdot 10^{17}$ ; etwa fünf Oktaven.

7. Röntgenstrahlen von  $\lambda = 12 \text{ \AA}$  bis zu  $\lambda = \frac{1}{14} \text{ \AA}$ ; von  $N = 2,5 \cdot 10^{17}$  bis zu  $N = 4 \cdot 10^{19}$ ; mehr als sieben Oktaven.

Noch besser überblickt man alle Arten der Strahlungsenergie in folgender Tabelle:

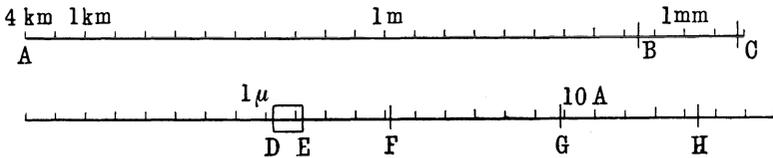
	Wellenlänge		Schwingungszahl pro Sekunde		Anzahl der Oktaven
	von	bis	von	bis	
1. Hertzsche Strahlen .	(4 km)	3 mm	(75 000)	$10^{11}$	20
2. Zwischenraum . . .	3 mm	$314 \mu$	$10^{11}$	$10^{12}$	$3\frac{1}{2}$
3. Infrarote Strahlen .	$314 \mu$	$\left. \begin{array}{l} 0,76 \mu \\ = 7600 \text{ \AA} \end{array} \right\}$	$10^{12}$	$4 \cdot 10^{14}$	$8\frac{1}{2}$
4. Lichtstrahlen . . . .	7600 \AA	4000 \AA	$4 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{14}$	weniger als 1
5. Ultraviolette Strahlen	4000 \AA	500 \AA	$7,5 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{15}$	3
6. Zwischenraum . . .	500 \AA	12 \AA	$6 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{17}$	5
7. Röntgenstrahlen . .	12 \AA	$\frac{1}{14} \text{ \AA}$	$2,5 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{19}$	7

In der ersten Zeile sind 4 km und 75000 eingeklammert, um dadurch in Erinnerung zu bringen, daß diese Zahlen willkürlich gewählt sind. In Fig. 26 ist das ganze Spektrum der Strahlungsenergie schematisch dargestellt. Der Bequemlichkeit halber ist es in zwei Abschnitte eingeteilt, wobei man sich das linke Ende des unteren Teiles als unmittelbare Fortsetzung des rechten Endes des oberen Teiles zu denken hat. Das ganze Spektrum zerfällt in 49 Teile, deren jeder eine Oktave darstellt. Angegeben sind Wellenlängen von 4 km, 1 km, 1 m, 1 mm,  $1 \mu$  und 10 \AA. Wir haben:

1. Hertzsche Strahlen von A bis B;
2. einen Zwischenraum von B bis C;
3. infrarote Strahlen von C bis D;
4. sichtbare Strahlen von D bis E;
5. ultraviolette Strahlen von E bis F;
6. einen Zwischenraum von F bis G;
7. Röntgenstrahlen von G bis H.

Das ganze Spektrum umfaßt etwa 49 Oktaven. Interessant ist es, die Länge des sichtbaren Spektrums  $DE$  mit der Länge des ganzen Spektrums zu vergleichen. Es zeigt sich, daß nur ein ganz geringer Teil aller Arten der Strahlungsenergie von unserem Auge empfunden wird. In diesem kleinen Abschnitt jedoch liegt für uns die Quelle alles dessen, was mit den Worten Licht und Farbe verknüpft ist.

Fig. 26.



Großes Interesse bietet ein Vergleich zwischen den Enden  $A$  und  $H$  des ganzen Spektrums der Strahlungsenergie. Die Wellenlängen erstrecken sich von 4 km bis zu einem Hundertvierzig-millionstel Millimeter. Die erste ist  $5 \cdot 10^{14}$ , d. h. 500 Millionen mal größer als die letzte, und im gleichen Verhältnis zueinander stehen die Schwingungszahlen 75000 und  $4 \cdot 10^{14}$ . Erstere entspricht der Zahl der leicht erzielbaren akustischen Schwingungen (S. 121), die bloß eine Oktave höher liegen als die dem Ohre noch erreichbaren. Letztere Zahl übertrifft die Anzahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter bei  $0^{\circ}$  und normalem Barometerdruck. Auf S. 55, 56 sind zwei Illustrationen dieser ungeheuren Zahl gebracht worden. Von diesen zeigt erstere, daß ein Körper, der eine Million Schwingungen in der Sekunde ausführt, 1270000 Jahre brauchen würde, um so viel Schwingungen auszuführen, wie der äußerste Röntgenstrahl in einer Sekunde vollbringt.

**§ 12. Die Grundidee der elektromagnetischen Theorie der Strahlungsenergie.** Im vorhergehenden haben wir alle Arten der Strahlungsenergie betrachtet, jedoch keine Antwort auf die Hauptfrage gegeben: Worin besteht das Wesen der Strahlungsenergie im allgemeinen und des Lichtes im speziellen? In § 3 sind die Newtonsche Theorie und die Theorie der Ätherschwingungen (Huyghens) kurz dargelegt worden. Wir haben uns an letztere gehalten, als an eine Theorie, die alles,

was wir in der Folge brauchten, vollauf befriedigte und besonders die Unterschiede zwischen den vorhandenen Arten der Strahlungsenergie klarlegte. Wir sind davon ausgegangen, daß die Strahlungsenergie eine sich ausbreitende Schwingungsbewegung darstellt, wobei die einzelnen Arten durch die Periode (Dauer einer Schwingung), oder die Frequenz (Schwingungszahl pro Sekunde), oder die Wellenlänge (die Entfernung, auf die sich die Schwingungsbewegung im Vakuum während einer Periode ausbreitet) charakterisiert werden. Alle drei Größen sind auf das engste miteinander verknüpft (s. § 2), so daß jede einzelne die beiden anderen vollkommen bestimmt, wenn man in Betracht zieht, daß alle Arten der Strahlungsenergie sich im Vakuum mit der gleichen Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde fortpflanzen. Offen blieb die Frage nach dem Träger der Schwingungsbewegung, d. h. es ist nicht klargestellt, was eigentlich diese Bewegungen ausführt. Nach der Theorie von Huyghens haben wir es mit rein mechanischen Schwingungen der Teilchen des elastischen Äthers zu tun, und man kann sagen, daß diese Theorie bis zum Jahre 1887 geherrscht hat. In diesem Jahre machte Hertz seine große Entdeckung, welche die Theorie von Huyghens zu Fall brachte und der elektromagnetischen Theorie von Maxwell zum Triumph verhalf. Letztere haben wir oft erwähnt, ihre Darlegung jedoch stets verschoben, da wir bei der Betrachtung der verschiedenen Arten der Strahlungsenergie auch ohne sie auskommen konnten. Als wir aber auf S. 168 die Entstehungsquelle der Hertzschen Strahlen kennenlernten, mußten wir zu dem Schluß kommen, daß die Strahlungsenergie eine elektromagnetische, von bewegten Elektronen hervorgerufene Erscheinung ist.

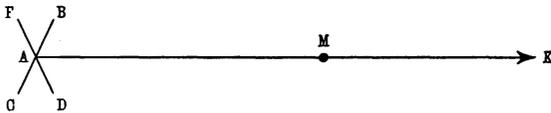
Die elektromagnetische Lichttheorie ist von Maxwell in den sechziger Jahren des verflossenen Jahrhunderts geschaffen worden, d. h. lange vor dem Erscheinen der Elektronenlehre (neunziger Jahre). Sie erschien, von einer rein mechanischen Seite betrachtet, als gänzlich unverständlich, und man muß sagen, daß sie es bis zum heutigen Tage geblieben ist. Später werden wir auf diese Frage näher eingehen. Die Grundlage der Maxwellschen Theorie bildet der Gedanke, daß die Strahlungsenergie, speziell das Licht, eine „sich ausbreitende elektromagnetische Schwingung oder Störung“ darstellt, und

wir müssen vor allen Dingen die Bedeutung dieser letzten Worte erklären.

Einem jeden ist es verständlich, daß es elektrische und magnetische Kräfte gibt. Elektrisiert man einen Körper, so entstehen im umgebenden Raume elektrische Kräfte, die auf jede dort befindliche Ladung einwirken. Darin besteht eben die sogenannte „Wechselwirkung“ von elektrisierten Körpern. Im Raume, der die Magnete oder die elektrischen Ströme umgibt, wirken magnetische Kräfte auf andere Magnete oder Ströme ein, die sich in diesem Raume befinden. Darauf laufen die allgemein bekannten Wechselwirkungen zwischen Magneten, Strömen oder zwischen Strömen und Magneten hinaus. Nimmt man an, daß im Innern der Magnete bewegte Elektronen vorhanden sind, so kann man sagen, daß ruhende Elektronen in ihrer Umgebung elektrische Kräfte, bewegte dagegen außerdem noch magnetische Kräfte hervorrufen.

Vor allem müssen wir eine Erscheinung kennenlernen, die man elektromagnetische Störung nennt. Wenden wir uns der Fig. 27 zu, die man als perspektivische zu betrachten hat.

Fig. 27.



Wir sehen eine lange gerade Linie  $AK$  und zwei kurze  $BC$  und  $DF$ . Letztere stehen senkrecht aufeinander und sind beide senkrecht zur Geraden  $AK$  gelegen.  $BC$  liegt in der Figurebene, während man sich  $DF$  senkrecht zu  $AK$  und  $BC$  denken muß, d. h. senkrecht zur Figurebene und dabei  $AD$  auf den Leser zu gerichtet und  $AF$  hinter der Figurebene.

Denke man sich, daß in einem gewissen Raumpunkt  $A$  zuerst weder eine elektrische noch eine magnetische Kraft vorhanden ist. Zu einem bestimmten Zeitpunkt entsteht in  $A$  eine elektrische Kraft, sagen wir in Richtung  $AB$ , und gleichzeitig eine magnetische, senkrecht zur elektrischen, in Richtung  $AD$ . Beide Kräfte (eine genauere Bezeichnung kommt später) wachsen und erreichen gleichzeitig gewisse, ganz bestimmte Höchstwerte, die von den

Abschnitten  $AB$  und  $AD$  dargestellt sein mögen. Darauf beginnen beide Kräfte abzunehmen, erreichen gleichzeitig den Nullwert, entstehen von neuem und wachsen wieder an, jedoch in entgegengesetzten Richtungen  $AC$  und  $AF$ . Haben sie wieder gleichzeitig die früheren Höchstwerte  $AC = AB$  und  $AF = AD$  erreicht, so streben sie von neuem der Null zu. Wir sagen, daß in diesem Augenblick eine ganze „Schwingung“ beendet ist. Es beginnt sofort eine zweite, d. h. eine elektrische und eine magnetische Kraft entstehen in Richtung  $AB$  und  $AD$ , erreichen die alten Höchstwerte, nehmen bis auf Null ab, steigen in entgegengesetzten Richtungen  $AC$  und  $AF$  an, erreichen ihre Höchstwerte und werden wieder zu Null. Damit ist die zweite „Schwingung“ beendet, es beginnt die dritte usw. Tritt in irgend einem Raumpunkt eine derartige Erscheinung auf, so sagen wir, daß in diesem Punkte eine elektromagnetische Störung (oder Perturbation) stattfindet. Sie ist periodisch, d. h. sie wiederholt sich gleichmäßig in gleichen Zeitabschnitten. Wir sprechen hier von einer „Schwingung“, obwohl im gewöhnlichen Sinne des Wortes gar nichts schwingt. Jedoch ist die Analogie mit den Schwingungen augenfällig. Es schwingt nicht etwa ein materielles Teilchen, das sich zuerst in  $A$  befand, dann nach  $B$  gelangte, darauf wieder nach  $A$ , dann nach  $C$  kam und schließlich nach  $A$  zurückkehrte. Es schwingen die Größen zweier Kräfte von Null bis zum Höchstwert zuerst in einer Richtung, dann in der entgegengesetzten. Hätten wir bei Betrachtung der Schwingungsbewegung eines materiellen Teilchens (oder eines Elektrons) unser Augenmerk nicht auf die Lagen gerichtet, die das Teilchen eine nach der anderen bei seiner Bewegung einnimmt, sondern auf die Größe seines Abstandes von der Mittellage, so wäre die Analogie noch vollkommener, denn diese Entfernung wächst auch von Null bis zu einem Höchstwert, gleich der Schwingungsamplitude (S. 122, 123), fällt wieder auf Null, wächst in entgegengesetzter Richtung bis zum gleichen Höchstwert an und nimmt wieder bis auf Null ab. Es leuchtet ein, daß die Entfernung des schwingenden Teilchens von seiner Mittellage denselben Veränderungen unterworfen ist, wie die zwei Kräfte bei einer elektromagnetischen Störung. Das eben gibt uns das Recht, von zwei schwingenden Kräften zu sprechen und ihre Höchstwerte als Schwingungsamplituden

zu bezeichnen. Die Zeit, in deren Verlauf eine ganze Schwingung ausgeführt wird, nennen wir wieder Periode und wollen unter Frequenz die Schwingungszahl pro Sekunde verstehen. Der Ort, an dem die elektromagnetische Störung stattfindet, birgt zweifellos eine gewisse Energiemenge, und zwar ist es kinetische Energie.

Es sind uns viele Gesetze gut bekannt, denen die verschiedenen elektrischen und magnetischen Erscheinungen gehorchen. Lediglich von diesen feststehenden Gesetzen ausgehend, gelangte Maxwell zu einer ganzen Reihe von Schlußfolgerungen, die gleich den betreffenden Gesetzen über jeden Zweifel erhaben sind. Die hauptsächlichste Folgerung ist diese:

Entsteht in irgend einem Raumpunkt  $A$  (Fig. 27) aus irgendwelchen Gründen eine elektromagnetische Störung von der soeben beschriebenen Art, so beginnt diese sofort sich in Richtung  $AK$  auszubreiten, d. h. senkrecht zu den Richtungen  $BC$  und  $DF$  der (in der Größe) schwingenden Kräfte und in entgegengesetzter Richtung, d. h. nach links von  $A$ . Das bedeutet, daß gleich nach dem Entstehen einer Störung im Punkte  $A$  eine gleiche Störung im benachbarten Punkte auftritt, darauf im nächsten usw. Je weiter ein beliebiger Punkt  $M$  von  $A$ , wo die elektromagnetische Störung ihren Anfang nahm, entfernt ist, desto später setzt in ihm die Störung ein. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Störung ist gleich der Lichtgeschwindigkeit, beträgt also 300 000 km in der Sekunde. Die Entfernung, auf die sich die Störung während der Dauer einer Schwingung (einer Periode) ausbreitet, wollen wir auch hier als Wellenlänge bezeichnen und belegen die Gerade  $AK$  mit dem Namen Strahl. Längs dieses Strahles wird eine Energie von besonderer Art übertragen, eine Energie, die von der Amplitudengröße der elektrischen und der magnetischen Kraft abhängt. Wir können von einem Energiefluß sprechen, der sich von der Stelle aus, an welcher die elektromagnetische Störung entsteht und durch irgend etwas aufrecht erhalten wird, ausbreitet. Weiterhin fand Maxwell, daß ein solcher Strahl, wenn er verwirklicht werden könnte, alle Eigenschaften der von uns in diesem Kapitel betrachteten Strahlen, darunter auch der Lichtstrahlen, besitzen müßte. Jedoch ist das nicht alles. Auf seiner Theorie fußend,

konnte Maxwell das Vorhandensein zweier neuer gesetzmäßiger Zusammenhänge zwischen den elektrischen und den Lichterscheinungen voraussagen. Wir haben hier nicht die Möglichkeit, diese ziemlich komplizierten Zusammenhänge zu betrachten, es liegt dazu auch keine zwingende Notwendigkeit vor. Es genügt uns zu wissen, daß sie vorausgesagt worden sind und daß auf Versuchswegen ihre Existenz tatsächlich nachgewiesen werden konnte.

Alles das führte Maxwell zur elektromagnetischen Lichttheorie, der die Hypothese zugrunde liegt, daß das Licht (oder allgemein die Strahlungsenergie) eine sich im Raume ausbreitende Störung der soeben beschriebenen Art darstellt. Jedoch schien einerseits diese ganze Theorie nicht genügend begründet zu sein, andererseits war die Idee der schwingenden elektrischen und magnetischen Kräfte wenig verständlich. Daher hatte sie im Verlaufe einer gewissen Zeit verhältnismäßig wenige Anhänger unter den Forschern zu verzeichnen gehabt. Diese jedoch waren bemüht, der neuen Theorie zur weiteren Entwicklung zu verhelfen und ihr eine festere Grundlage zu schaffen. Die Lage änderte sich von Grund auf am Ende der achtziger Jahre nach Veröffentlichung der unsterblichen Arbeiten von Hertz (1887), die in § 9 dieses Kapitels beschrieben worden sind. Wir haben gesehen, daß es Hertz gelungen ist, die elektromagnetischen Strahlen, von denen in der Maxwell'schen Theorie die Rede ist, zu verwirklichen. Sie entstehen dort, wo eine Schwingungsbewegung der Elektronen stattfindet. Da ein ruhendes Elektron in seiner Umgebung elektrische Kräfte hervorruft, ein bewegtes aber außerdem noch magnetische, so ist es klar, daß im Raume, der schwingende Elektronen umgibt, elektrische und magnetische Kräfte auftreten müssen, die ihrer Größe nach schwingen. Das sind die elektromagnetischen Strahlen von Maxwell.

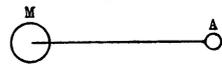
Die Versuche von Hertz, sowie spätere experimentelle und theoretische Untersuchungen haben der Maxwell'schen Theorie ein festes Fundament geschaffen und die rein mechanische Theorie der Schwingungsbewegung der Ätherteilchen endgültig und zweifellos für immer zu Fall gebracht. Heute ist die Maxwell'sche Theorie in ihren Grundlagen ausnahmslos von allen Forschern,

die sich mit der Physik beschäftigen, angenommen. Die weitere Entwicklung der Wissenschaft in den folgenden 30 Jahren hat die Richtigkeit dieser Theorie noch klarer an den Tag gelegt. Darüber kann kein Zweifel bestehen, daß das Licht eine sich im Raume ausbreitende elektromagnetische Störung von der Art, wie wir sie beschrieben, darstellt.

Immerhin muß gesagt werden, daß die elektromagnetische Lichttheorie eine Reihe von Fragen schafft, auf welche die Wissenschaft bis jetzt, wenigstens teilweise, keine bestimmte und leichtverständliche Antwort geben kann.

Betrachten wir zuerst folgende Frage. Wir verstehen die elektrische Kraft, die einen elektrisierten, d. h. freie Elektronen enthaltenden Körper beeinflusst, und die magnetische Kraft, die auf Magnete oder auf elektrische Ströme einwirkt. In beiden Fällen haben wir eine Kraft und gleichzeitig ein Objekt, auf das sie einwirkt. Es ist daher nicht leicht, sich eine tatsächlich existierende Kraft vorzustellen, die nichts beeinflusst, d. h. der kein Objekt zur Verfügung steht. Wir haben aber in der elektromagnetischen Störung, die sich längs des Strahles ausbreitet, in jedem Punkte desselben zwei Kräfte, eine elektrische und eine magnetische, die tatsächlich vorhanden sind, zu jeder gegebenen Zeit ihre bestimmte Richtung und Größe besitzen, sich sogar in der Größe fortwährend ändern und dennoch kein Objekt haben, auf das sie einwirken könnten. Selbstverständlich gibt es in einem beliebigen Punkte weder ein Elektron, auf das die elektrische Kraft einwirken könnte, noch einen Magnetpol oder einen elektrischen Strom, die der magnetischen Kraft als Objekte dienen könnten. Wie hat man sich also das Entstehen, Wachsen, Abnehmen usw. der Kräfte in einem gegebenen Raumpunkt, ohne daß Objekte vorhanden

Fig. 28.



wären, zu denken? Auf diese Frage kann eine vollkommen befriedigende Antwort gegeben werden. Nehmen wir an,  $M$  (Fig. 28) stelle einen, sagen wir negativ elektrisierten Körper dar. Im Raume, der ihn umgibt, läßt sich folgendes beobachten. Wird irgendwo in diesem Raume ein positiv elektrisierter Körper  $A$  untergebracht, so wird er der Einwirkung einer Kraft unterliegen, die ihn nach dem allgemein bekannten Gesetz der „Wechselwirkung“ von elektrisierten Körpern,

$M$  zu nähern, bestrebt sein wird. Wir sagen, daß ungleichnamig elektrisierte Körper „sich gegenseitig anziehen“. Mit diesen Worten erklären wir aber gar nichts und versuchen offenbar auch nicht, eine Erklärung zu geben. Indem wir sagen, daß die Körper  $M$  und  $A$  sich gegenseitig anziehen, geben wir in Wirklichkeit nur eine Beschreibung dessen, was tatsächlich geschieht, und zwar, daß die Körper sich einander nähern. Die Frage nach der Ursache dieser Annäherung bleibt offen. Lange Zeit hindurch hat es aber fast allen geschienen, daß diese Worte nicht nur eine Beschreibung, sondern auch eine Erklärung der beobachteten Erscheinung enthalten: Die gegenseitige Anziehung der Körper  $M$  und  $A$  ist als vorhandene Tatsache die Ursache ihres Bestrebens, sich einander zu nähern. Die in  $M$  enthaltene Ladung übt unmittelbar auf die Ladung in  $A$  eine Fernwirkung aus (auf lateinisch: *actio in distans*). Das ist die primäre Eigenschaft der elektrischen Ladungen und dadurch „erklärt sich“ die beobachtete gegenseitige Annäherung der Körper  $M$  und  $A$ . Eine derartige Fernwirkung erblicken wir scheinbar in den Erscheinungen der Weltgravitation, und die hohe Blüte der Himmelsmechanik im 18. und 19. Jahrhundert sprach scheinbar zugunsten der tatsächlichen Existenz einer unmittelbaren Fernwirkung. Das ist jedoch ein Irrtum. Die ganze Himmelsmechanik beruht nicht darauf, daß die Gestirne sich gegenseitig anziehen, sondern darauf, daß ihre Bewegung bis in die kleinsten Einzelheiten so verläuft, als zögen sie sich unmittelbar nach einem bestimmten, von Newton entdeckten Gesetz an. Die moderne Wissenschaft widersetzt sich dem Gedanken einer Fernwirkung. Sie hält es für ausgeschlossen, daß ein Körper dort, wo er sich selbst nicht befindet, wirken könnte, und ersetzt die Fernwirkung durch die Nahe-  
wirkung, was bedeuten will, daß eine Wirkung nur in der unmittelbaren Nähe ihres Ursprungs ausgeübt werden kann. Indem sie im Raume von Punkt zu Punkt übertragen wird, kann sie auf einer beliebigen Entfernung von ihrer Quelle zu spüren sein. Kehren wir zu Fig. 28 zurück. Der elektrisierte Körper  $M$  versetzt den ihn umgebenden Raum in irgend einen besonderen Zustand, ruft in ihm eine Veränderung hervor, die sich vom Körper  $M$  aus mit einer bestimmten Geschwindigkeit vom Augenblick an, in dem  $M$  eine elektrische Ladung erhält, nach allen Seiten aus-

breitet. Solange  $M$  seine Ladung besitzt, erhält sich der besondere Zustand des Raumes. Diese Veränderung eben, die sich dank der Ladung in  $M$  im Körper  $A$  vollzog, ist die unmittelbare Ursache der Bewegung des elektrischen Körpers  $A$  in Richtung  $M$ . Den Raum, welcher den Körper  $M$  umgibt, bezeichnet man als elektrisches Feld, und wir sagen, daß in jedem Punkte desselben tatsächlich eine bestimmte „Feldspannung“ vorhanden ist, die als unmittelbare Entstehungsursache der motorischen Kraft anzusehen ist, die auf die im gegebenen Punkte vorhandene Ladung einwirkt. Diese Kraft ist der Feldspannung proportional. Vergrößert sich die Ladung in  $M$  oder wird kleiner, so ändert sich sofort dementsprechend die Feldspannung, und diese Änderung breitet sich von Punkt zu Punkt im ganzen Raume aus.

Genau das gleiche bezieht sich auch auf das Magnetfeld, welches gleichmäßig bewegte Elektronen umgibt. In jedem Punkte desselben ist eine bestimmte Spannung vorhanden, die sich hier als unmittelbare Ursache des Auftretens einer motorischen Magnetkraft erweist, die auf einen Magnetpol oder einen elektrischen Strom in diesem Punkte einwirkt. Führen die Elektronen in  $M$  Schwingungsbewegungen aus, so schwingen in  $A$  die Spannungen zweier gleichzeitig vorhandener Felder. Der Charakter dieser Schwingungen und ihrer Ausbreitung von  $M$  nach allen Seiten entspricht vollkommen den Schwingungen, die auf S. 178 bis 181 beschrieben worden sind und nach der Maxwell'schen Theorie das Wesen sämtlicher Arten der Strahlungsenergie von den Hertz'schen bis zu den Röntgenstrahlen bilden.

Fassen wir unsere Betrachtungen kurz zusammen, so können wir sagen, daß in jedem Punkte des elektrischen und des magnetischen Feldes in der Tat etwas vorhanden ist, was wir mit Feldspannung bezeichnet haben, und das als unmittelbare Entstehungsursache von motorischen Kräften erscheint, wenn in diesem Punkte sich eine Ladung (elektrisches Feld), oder ein Magnetpol, oder ein elektrischer Strom (Magnetfeld) befinden. Jetzt können wir die Frage, die wir auf S. 187 gestellt haben, beantworten. Vor allem muß gesagt werden, daß es tatsächlich keine Kraft geben kann ohne ein Objekt, auf das sie einwirkt. Als wir von schwingenden Kräften sprachen, drückten wir uns ungenau aus. Es schwingen ihrer Größe und Richtung

nach nicht zwei Kräfte, sondern zwei Feldspannungen, d. h. etwas in einem gegebenen Raumpunkte tatsächlich Vorhandenes. Jetzt drängt sich aber eine zweite Frage auf, der die Wissenschaft jedoch vorläufig machtlos gegenübersteht: Was ist die Feldspannung, die durch das Vorhandensein von (ruhenden oder bewegten) Elektronen hervorgerufen wird, die in jedem Raumpunkte bestimmte Größe und bestimmte Richtung besitzt und als unmittelbare Ursache von motorischen Kräften auftritt, falls in dem betreffenden Punkte ein entsprechendes Objekt, d. h. eine Ladung, ein Magnet oder ein elektrischer Strom, vorhanden ist? Welcher Art sind die Veränderungen, die im Raume durch ruhende oder bewegte Elektronen hervorgerufen werden? Einfacher ausgedrückt: Worin besteht der Entstehungsmechanismus der Feldspannungen, oder was ist überhaupt die Feldspannung? Auf diese Frage ist vorläufig keine Antwort gefunden worden. Daß Feldspannungen existieren, ist eine Tatsache, die durch das Entstehen von motorischen Kräften unter den vorhin genannten Bedingungen unumstößlich bewiesen wird, wenn natürlich die Möglichkeit einer unmittelbaren Fernwirkung ausgeschaltet wird. Viele Forscher haben versucht, das Wesen der elektrischen oder magnetischen Feldspannung durch bestimmte, rein mechanische Veränderungen, die im Äther beispielsweise als elastische Spannungen, Torsionen usw. auftreten, zu erklären. Jedoch haben solche Versuche keinerlei Resultate gezeitigt: Der Entstehungsmechanismus der elektrischen und magnetischen Feldspannungen ist nicht aufgedeckt worden. Wir sind nicht in der Lage, anschaulich darzulegen, welche mechanisch verständliche Veränderung in einem gegebenen Raumpunkte erfolgt, wenn in ihm eine der Größe und Richtung nach bestimmte Spannung eines der beiden in Betracht kommenden Felder entsteht. Vorläufig sind wir gezwungen, das Vorhandensein von zwei Feldern und bestimmten Spannungen in jedem ihrer Punkte als Tatsache hinzunehmen. Dank diesen Spannungen entstehen eben Kräfte, die auf Objekte in diesen Punkten einwirken, der Größe der Spannung proportional sind und mit dieser gleiche Richtung besitzen. Es muß hinzugefügt werden, daß heute eine große Zahl von Forschern, und zwar die hervorragendsten, die Existenz des Äthers vollkommen verneinen. Es

ist das auch verständlich: Nachdem es sich herausgestellt hat, daß die Strahlungsenergie in keinem Falle eine Bewegung sein kann, die sich im elastischen Äther durch die Schwingungen seiner Teilchen ausbreitet, und nachdem alle Versuche, ein mechanisches Bild jener Veränderung im Äther, die dem Entstehen von elektrischen und magnetischen Feldspannungen im Raume entspricht, zu entwerfen, fehlgeschlagen sind, braucht die Wissenschaft den Äther nicht mehr. Es gibt keine Erscheinung, bei deren Erklärung die moderne Physik sich auf die Existenz des Äthers stützen müßte, und man könnte ein ausführliches Lehrbuch der Physik in vielen Bänden schreiben, ohne auch nur einmal den Äther zu erwähnen. Die Wissenschaft braucht den Äther eben nicht. Sie bedient sich nirgends der Ätherhypothese. Es ist wohl einleuchtend, daß etwas hypothetisch Angenommenes, das die Wissenschaft nicht braucht, für diese nicht existiert.

Indem wir also behaupten, die Strahlungsenergie sei eine elektromagnetische Schwingung, die sich im Raume ausbreitet, sind wir in der Lage, diese Schwingung ausführlich zu beschreiben (S. 178 bis 181 und Fig. 27) und sie mit elektrischen und magnetischen Feldspannungen in Verbindung zu bringen, deren Existenz außer Zweifel steht, wenn man sich von dem unbedingt unzulässigen Gedanken einer Fernwirkung freimacht. Die Feldspannung konnte jedoch bis jetzt mechanisch noch nicht gedeutet werden.

Diese Schwierigkeit kann man beseitigen, wenn man die Tatsache der Entstehung von magnetischen und elektrischen Spannungen, die ihrer Größe nach zu schwingen vermögen, als grundlegende Ausgangstatsache annimmt. Man kann sich auf folgenden Standpunkt stellen: Der Weltraum ist so beschaffen, daß in ihm eine besondere Art von Energie entstehen und sich ausbreiten kann. Es ist das die, der Strahlungsenergie identische elektromagnetische in Gestalt der von uns beschriebenen elektromagnetischen Störung. Sie wird durch magnetische und elektrische Kräfte (richtiger Spannungen) charakterisiert, die senkrecht zueinander und zum Strahl, den entlang die Störung sich ausbreitet, verlaufen. Der Weltraum ist ein elektromagnetischer Raum und darin besteht seine primäre Grundeigenschaft. Diese Eigenschaft auf bestimmte mechanische Prozesse zurückzuführen, die in einem besonderen Weltmedium

vor sich gehen, d. h. auf Prozesse, die bekannten und uns verständlichen Prozessen in der gewöhnlichen Materie analog wären, ist nicht möglich und auch nicht erforderlich, wenn man diese Eigenschaft des Weltraumes als etwas Vorhandenes, Gegebenes, von dem ausgegangen werden muß und auf dem weitere Folgerungen sich aufbauen lassen, betrachtet, ohne nach einer mechanischen Erklärung zu streben. Steht man auf diesem Standpunkt, so eröffnen sich neue weite Horizonte, und es taucht die Möglichkeit, ja vielleicht sogar Notwendigkeit auf, unsere ganze Weltauffassung von Grund auf zu ändern. Die Weltauffassung, die noch vor kurzem vorherrschend war, kann man, soweit sie sich auf den nicht lebendigen Teil der uns umgebenden Welt bezieht, als eine materiell-mechanische bezeichnen. Sie fußte auf der Existenz der Materie, die über einen besonderen Aufbau und besondere Eigenschaften verfügt und beweglich ist: Von ihr gehen Kräfte aus und sie selbst wird von solchen beeinflußt. Auf diesen Kräften und auf den Bewegungen, die letztere hervorrufen, mußte jede Erklärung von physikalischen Erscheinungen beruhen, denn es galt die Voraussetzung, daß diese Erscheinungen keine andere Quelle haben können außer den Kräften und der Bewegung der Materie. Die Physik wurde von der Mechanik beherrscht, d. h. von der allgemeinen Lehre von Bewegungen und Kräften. Als Ideal galt die Begründung aller Gebiete der Physik durch die Mechanik, und nach diesem Ziele strebten die Forscher bei Erklärung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen. Das zu verwirklichen, schien jedoch unmöglich zu sein. Daher entstand und entwickelte sich eine neue elektromagnetische Weltauffassung. Diese ist nicht mehr bestrebt, die Gesetze der elektromagnetischen Erscheinungen von den Gesetzen der Mechanik, die von Newton empirisch aufgestellt worden sind, abzuleiten. Die neue Weltauffassung nimmt als empirisch festgestellte Tatsachen die Gesetze, denen die elektromagnetischen Erscheinungen gehorchen, baut auf ihnen eine Wissenschaft des nicht lebendigen Teiles der Welt auf und versucht durch sie alle in dieser vorkommenden Erscheinungen zu erklären. Sie verzichtet auf die hoffnungslosen Versuche, die Gesetze der elektromagnetischen Erscheinungen durch die Gesetze der Mechanik zu erklären und ist im Gegenteil bestrebt, zu zeigen,

welche mechanischen Gesetze als Folgerungen aus den elektromagnetischen Gesetzen zu betrachten sind, die ihnen und zugleich jeder Lehre von der nicht lebendigen Materie zugrunde liegen und die Eigenschaften dieser Materie, sowie die in ihr auftretenden Erscheinungen zu erklären. Stellt man sich auf diesen Standpunkt, so fallen alle Zweifel und lassen sich die Fragen beantworten, welche die elektromagnetische Theorie der Strahlungsenergie in uns hervorrufen kann. Im achten Kapitel werden wir sehen, daß die neue Lehre vom Atombau die Wissenschaft von der Materie, als einer selbständigen Realität, zu Fall gebracht hat und zur einzigen Realität die Elektrizität erhob, aus der alles Bestehende, der ganze unserer Beobachtung zugängliche Teil des Weltalls besteht. Darin wurzelt die elektromagnetische Weltanschauung, die immer mehr und mehr um sich greift. Ihr gehört die Zukunft, und auf ihr wird die Wissenschaft, in der sie vorherrschen wird, aufgebaut.

### § 13. Der Druck der Strahlungsenergie. Schlußbetrachtung.

Die elektromagnetische Theorie der Strahlungsenergie hat Maxwell die Möglichkeit gegeben, vorherzusagen, daß diese Energie, speziell das Licht, auf die Oberfläche eines Körpers treffend, auf diesen einen gewissen Druck ausübt. Angenommen, die Strahlen treffen senkrecht (nicht schräg) auf; die Theorie zeigt, daß, im Falle die Strahlen vollkommen reflektiert werden, ihr Druck zweimal so groß ist als im Falle, daß sie von der Oberfläche ganz absorbiert werden. Werden sie dagegen zum Teil reflektiert und teilweise absorbiert, so ist der Druck größer als bei vollständiger Absorption, jedoch kleiner als bei vollkommener Reflexion. Poynting (geb. 1852) hat bewiesen (1904), daß Strahlen, die auf die Oberfläche eines Körpers schräg auftreffen, nicht nur einen Druck, sondern auch sozusagen einen seitlichen Zug ausüben, d. h. eine Bewegung des Körpers zur Seite hervorrufen. Sehr interessant ist es, daß der Gedanke eines Lichtdruckes von verschiedenen Forschern schon längst und häufig ausgesprochen worden ist. So hat z. B. Kepler (1619) versucht, mit dem Drucke der Sonnenstrahlen das Entstehen von Kometenschweifen zu erklären, die bekanntlich stets von der Sonne fort gerichtet sind. Diesen Gedanken unterstützte (1622) Longo-

montanus (1561 bis 1647), zu ihm kehrte auch Euler (1746) zurück. Die ersten Versuche wurden von Boyle unternommen, der das Licht wiegen wollte und zu diesem Zwecke festzustellen versuchte, ob die Lichtstrahlen auf die Schale einer empfindlichen Wage einen Druck ausüben. Selbstverständlich konnte ein so grober Versuch keine Resultate ergeben. Desgleichen lieferten Versuche von De Mairan (1678 bis 1771), Fresnel (1825), Zöllner (1877, lebte 1834 bis 1882) u. a. keine klaren Ergebnisse.

Dem großen Moskauer Physiker P. N. Lebedew (1866 bis 1912) war es als erstem gelungen, die Frage nach dem Lichtdruck zu beantworten. Durch äußerst feine und geistreiche Versuche hat er im Jahre 1900 nicht nur die Existenz dieses Druckes nachgewiesen, sondern auch seine Größe gemessen. Es hat sich gezeigt, daß die elektromagnetische Lichttheorie die Größe des Druckes richtig vorausgesagt hatte. Die Voraussagung hat sich im Versuch nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ bewahrheitet. Poynting gelang es (1904), auf Versuchswegen den vorhin erwähnten seitlichen Zug nachzuweisen. Weiterhin sagt die elektromagnetische Theorie, daß auf einen Körper, der nicht nach allen Seiten, sondern nur in einer Richtung Strahlen aussendet, eine Kraft wirken muß, die der Strahlenrichtung entgegengesetzt verläuft. Diese Erscheinung ist vollkommen analog dem sogenannten „Rückstoß“, den man bei Feuerwaffen (Pistolen, Gewehren, Geschützen) nach dem Schuß beobachtet: das Geschütz rollt zurück, das Gewehr erhält einen Stoß in einer dem Schuß entgegengesetzten Richtung. Wie Poynting (1910) im Versuch gezeigt hat, bewahrheitet sich auch diese Voraussagung der Theorie.

Auf Grund dieser Arbeiten wandten sich die Forscher von neuem dem von Kepler ausgesprochenen Gedanken zu, daß der Lichtdruck in kosmischen Erscheinungen eine gewisse Rolle spielt. Der abstoßende Druck, den die Sonnenstrahlen auf den Erdball ausüben, übersteigt nicht 0,5 mg pro Quadratmeter der Erdoberfläche: im Vergleich zur Anziehungskraft der Sonne ist er verschwindend klein. Jedoch, wie zuerst Lebedew (1892) gezeigt hat, übersteigt der Lichtdruck auf sehr kleine Körper, etwa Stäubchen, die sich in der Nähe der Sonne befinden, die Anziehungskraft der Sonne, und damit können die Kometenschweife erklärt werden. Bekanntlich bilden sie sich nur bei

Annäherung des Kometen an die Sonne, während in weiter Entfernung von derselben der Komet als ein kugelförmiger Nebel erscheint. Arrhenius (geb. 1859) in Schweden (1900) und Schwarzschild (1873 bis 1916) in Deutschland (1901) haben der auf einer abstoßenden Wirkung der Sonnenstrahlen aufgebauten Theorie der Kometen zur weiteren Entwicklung verholfen. Schwarzschild hat gezeigt, daß das Übergewicht des Strahlendruckes gegenüber der Anziehung seitens der Sonnenmasse seinen Höchstwert erreicht, wenn der Durchmesser des Stäubchens etwa ein Drittel der Wellenlänge der betreffenden Strahlen beträgt. Die Theorie ist imstande, das Entstehen von verschieden geformten Kometenschweifen als eine Folge des Lichtdruckes vollkommen einwandfrei zu erklären.

Schlußbetrachtung. Es erübrigt sich wohl, darauf hinzuweisen, daß auf jeder Seite dieses Kapitels die außerordentliche Erweiterung unserer Kenntnisse an den Tag tritt, die uns die Wissenschaft auf dem Gebiet der hier betrachteten Erscheinungen gibt. Den engen Begriff des Lichtes hat sie auf den fast grenzenlosen Begriff einer Strahlungsenergie erweitert, deren Gebiet etwa 50mal so groß ist als das des sichtbaren Lichtes, wenn man Strahlen von großer Wellenlänge, die weder theoretisch noch praktisch von Interesse sind, ausscheidet. Die Wissenschaft gab uns infrarote und ultraviolette, Hertz'sche Strahlen und Röntgenstrahlen. Sie hat die Frage nach dem Wesen des Lichtes beantwortet und hat ein festes Fundament errichtet, auf dem die alte Weltauffassung allmählich durch eine neue ersetzt wird, die nicht auf Gesetzen der Mechanik, sondern auf denen der elektromagnetischen Erscheinungen fußt. Diese wenigen Worte mögen genügen. Der aufmerksame Leser wird auch ohne sie verstehen, wieviel die Wissenschaft zur Erweiterung der Kenntnisse, nach denen die denkende Menschheit dürstet, auf diesem Gebiet beigetragen hat.

## 7. Kapitel.

### Der zweite Hauptsatz. Unsere Welt als Organismus.

§ 1. **Einleitung.** Vier Kapitel (3 bis 6) haben wir umfangreichen Fragen gewidmet, deren Betrachtung uns tiefe Erkenntnis dessen gab, was uns umgibt und was in dem unserer Beobachtung zugänglichen Teil des Weltalls vor sich geht. Die Kapitel 3 und 5 haben uns ein klares Bild vom Aufbau der Materie entworfen. Wir haben Moleküle, Atome und Elektronen kennengelernt, ihre Abmessungen und Bewegungen. In Kapitel 8 werden wir sehen, daß die Wissenschaft es verstanden hat, unsere Kenntnisse auf diesem Gebiete noch bedeutend zu erweitern, indem sie das Geheimnis der Atomstruktur vor uns aufdeckte. Kapitel 6 wiederum hat gezeigt, inwieweit die Physik unsere Kenntnisse auf dem Gebiete solcher Erscheinungen, von denen die Sinnenorgane uns nur spärliche Kunde verleihen, erweitern konnte. In Kapitel 4 hatten wir gesehen, daß dieselbe Wissenschaft zwei Grundgesetze entdeckte, welche die quantitative Seite aller physikalischer Erscheinungen ohne Ausnahme beherrschen. Über allem jedoch, was wir bis jetzt gesehen haben, steht die Erweiterung unserer Kenntnisse, die wir jetzt betrachten wollen. Hier begegnen wir einer Wahrheit, die der Tiefe ihres Grundgedankens, der allumfassenden Weite ihrer Weltbedeutung und dem Reichtum an Folgerungen nach, zu denen sie führt, wohl kaum in irgend einer Wissenschaft ihresgleichen findet. Die Physik kann stolz darauf sein, daß es ihr gelungen ist, die große Wahrheit zu entdecken, die uns die Richtung zeigt, in welcher die Welt, einem Organismus gleich, sich allmählich entwickelt. Großen Dank schuldet die Menschheit der Wissenschaft, die das Geheimnis der Weltevolution vor ihr aufgedeckt hat. Unvergeßlich bleiben die Namen der Denker, durch deren Arbeit die große Wahrheit gefunden wurde, welche die qualitative Seite alles dessen, was in der unserer Beobachtung zugänglichen Welt geschieht, beherrscht. Es sind das die Namen: Sadi Carnot (1796 bis 1832), Clausius, William Thomson (Lord Kelvin), Helmholtz, Ludwig Boltzmann (1844 bis 1906) und der Amerikaner Villard Gibbs (1839 bis 1903).

In diesem Kapitel werden wir zwischen den Begriffen Weltall und Welt einen strengen Unterschied machen.

Unter Weltall werden wir die Gesamtheit alles Existierenden verstehen. Als Welt bezeichnen wir dagegen nur denjenigen Teil des Weltalls, der unserer Beobachtung zugänglich ist. Sie umfaßt alle Sterne, die Milchstraße und Nebelflecken, die durch unsere Fernrohre zu erblicken sind. Diese Welt wollen wir unsere Welt oder „astronomische“ Welt nennen. Zweifellos bildet unsere Welt, die astronomische Welt, nur einen ganz geringen Bruchteil des Weltalls, welches natürlich dort nicht zu Ende ist, wo unsere Beobachtung aufhört.

**§ 2. Die physikalischen Prozesse und ihre Richtung.** Die große Wahrheit, der dieses Kapitel gewidmet ist, ist in der Wissenschaft unter verschiedenen Namen bekannt. Die gebräuchlichsten sind: zweiter Hauptsatz, Prinzip der Energiestreuung, Prinzip der anwachsenden Entropie, Prinzip der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile zweiter Art. Außer den Definitionen, die den drei letzten Bezeichnungen entsprechen, sind von verschiedenen Forschern noch eine Reihe anderer in Vorschlag gebracht worden. Einige von diesen werden wir später kennenlernen.

Am häufigsten wird wohl der erste Name gebraucht, der keinerlei Hinweise auf bestimmte Tatsachen enthält. In den drei übrigen sind solche Andeutungen vorhanden, man spricht von einer Streuung und dem Anwachsen gewisser Größen und von der Unmöglichkeit, einen Apparat zu konstruieren, der bestimmte Ansprüche erfüllen könnte.

Gewöhnlich spricht man von „zwei Hauptsätzen“, die den Gegenstand einer besonderen Abteilung der Physik, der sogenannten Thermodynamik, bilden.

Der erste Hauptsatz ist das uns bereits vom 4. Kapitel dieses Buches her bekannte Gesetz von der Erhaltung der Energie. Es gibt uns eine klare Antwort auf unsere Frage nach dem Verlauf der physikalischen Erscheinungen, d. h. nach den quantitativen Gesetzen, denen diese gehorchen. Dabei wird das Auftreten einer gegebenen Erscheinung einfach als Tatsache hingenommen, d. h. es wird nicht danach gefragt, warum gerade diese Erscheinung und nicht eine beliebige andere auftritt. Nehmen wir an, es wird mit

Hilfe des elektrischen Stromes eine Last gehoben. In diesem Falle bestimmt der erste Hauptsatz mit größter Genauigkeit die Menge der elektrischen Energie, die aufgewandt werden muß, um die gegebene Last auf eine gegebene Höhe zu heben, d. h. um eine bestimmte Menge potentieller Energie der gehobenen Last zu schaffen (S. 71, 72). Ein anderes Beispiel: Ein nichtelastischer Körper, dessen Masse gegeben ist, bewegt sich mit einer gegebenen Geschwindigkeit. Er trifft auf eine Wand und bleibt plötzlich stehen. Der erste Hauptsatz ermöglicht eine genaue Berechnung der Wärmemenge, die beim Übergang der kinetischen Bewegungsenergie des Körpers in Wärmeenergie entsteht. Es drückt mithin der erste Hauptsatz die strenge Gesetzmäßigkeit aus, die alle physikalischen Erscheinungen ohne Ausnahme beherrscht.

Indem der erste Hauptsatz uns darüber berichtet, wie die physikalischen Erscheinungen verlaufen, gibt er uns keinerlei Antwort auf eine andere wichtige Frage: Was geschieht denn tatsächlich? Was für physikalische Erscheinungen entstehen eigentlich? Wodurch wird, wenn man so sagen darf, die Wahl einer Erscheinung, die unter gegebenen Bedingungen auftritt, bestimmt? Auf diese Fragen gibt der zweite Hauptsatz Antwort. Er zeigt uns die verborgenen Triebfedern, die den Strom der Ereignisse, die wir als physikalische Erscheinungen bezeichnen, regeln. Um das Verstehen des zweiten Hauptsatzes zu erleichtern, wollen wir vor allem den Begriff des Prozesses einführen.

Als Prozeß bezeichnen wir jede einzelne Veränderung, die in irgend einem Teil der toten Materie vor sich geht. Die Bedeutung dieser Bezeichnung wird aus folgendem Verzeichnis verschiedenartiger Prozesse klar:

1. Übergang der Wärme von einem Körper auf einen anderen, oder von einer Stelle des gegebenen Körpers zu einer anderen.
2. Auftreten von Wärme, als Folge einer geleisteten Arbeit; Arbeitsleistung auf Kosten der dabei aufgewandten Wärme. Der Kürze halber sagt man: Arbeit geht in Wärme und Wärme in Arbeit über.
3. Auflösung eines festen oder gasförmigen Stoffes in einer Flüssigkeit; Ausscheiden derselben Stoffe aus der Flüssigkeit.

4. Übergang des Stoffes aus einem Zustand (festem, flüssigem oder gasförmigem) in einen anderen, d. h. Schmelzung, Erstarrung, Verdampfung, Verflüssigung.

5. Diffusion, d. h. allmähliches Eindringen eines Stoffes in einen anderen; z. B. gegenseitige Diffusion zweier Flüssigkeiten oder zweier Gase; Diffusion eines löslichen Stoffes in Flüssigkeit.

6. Übergang der Energie einer beliebigen Art in Energie einer anderen Art (S. 78).

7. Volumen-, Druck- oder Temperaturänderung eines Körpers.

8. Veränderung des Grades der Elektrisierung oder Magnetisierung eines Körpers.

9. Jede chemische Reaktion einer Verbindung, Zerlegung, doppelten Austausches usw.

10. Elastische Deformierung eines festen Körpers, z. B. Dehnung, Kompression, Drillung (Torsion) und Biegung.

Diese Beispiele klären wohl zur Genüge den Begriff eines physikalischen Prozesses. Er ist mit dem Begriff einer physikalischen Erscheinung nicht identisch, was man z. B. daraus ersieht, daß der Regenbogen wohl eine physikalische Erscheinung ist, aber nicht als Prozeß bezeichnet werden kann. In vielen Fällen besteht die physikalische Erscheinung aus einem bestimmten Prozeß. Allgemein gesprochen jedoch, wird sie durch die Gesamtheit mehrerer Prozesse dargestellt.

Jeder Prozeß besitzt eine bestimmte Richtung, in der er verläuft. Man ersieht es schon daraus, daß jedem Prozeß ein anderer, von entgegengesetzter Richtung an die Seite gestellt werden kann, der die vom ersten Prozeß hervorgerufene Veränderung wieder aufhebt. In den Beispielen, die soeben angeführt worden sind, stehen zuweilen unter einer Nummer zwei Prozesse, die einander entgegengesetzt verlaufen (s. Nr. 2, 3, 4 und 9). Es ist nicht schwer, auch für die übrigen Beispiele die entgegengesetzten Prozesse anzugeben. Hierher gehören: Wärmeübergang vom zweiten Körper auf den ersten (Nr. 1); Trennung von Stoffen, die sich durch gegenseitige Diffusion vermischten (Nr. 5); Übergang der Energie der zweiten Art in Energie der ersten (Nr. 6); Veränderung des Volumens, des Druckes, der Temperatur, der Elektri-

sierung, der Magnetisierung in einer Richtung, die der betrachteten entgegengesetzt ist (Nr. 7 und 8).

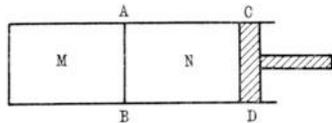
Man muß streng unterscheiden zwischen Prozessen, die einander entgegengesetzt verlaufen, und solchen, die eine gegenseitige Umkehrung bedeuten. Es möge z. B. ein Prozeß stattgefunden haben, als dessen Resultat irgend eine Veränderung, wie sie in den Beispielen angeführt worden ist, entstand. Ein entgegengesetzter Prozeß macht, wie gesagt, diese Veränderung zunichte. Jedoch kann er seinem Charakter und Verlauf nach vom ersten gänzlich verschieden sein. Sehr häufig erweist es sich, daß der erste Prozeß sich leicht und einfach ausführen läßt, während der entgegengesetzte komplizierte Manipulationen verlangt. Der Auflösungsprozeß eines Salzes in Wasser erfolgt sehr einfach. Das Ausscheiden des Salzes dagegen beansprucht besondere Manipulationen, wie Verdampfung oder Gefrieren. Der Übergangsprozeß der Bewegungsenergie eines Körpers in Wärme durch Stoß oder Reibung vollzieht sich leicht. Sehr kompliziert dagegen ist der Prozeß des Wärmeaufwandes, um den Körper in Bewegung zu setzen. Der Prozeß einer gegenseitigen Diffusion zweier Gase verläuft einfach. Der Prozeß jedoch, der die Trennung der beiden Gase im Gemisch zur Folge hat, ist sehr kompliziert. Das bezieht sich auch auf Prozesse einer chemischen Verbindung von zwei Stoffen und der Zerlegung des so entstandenen zusammengesetzten Stoffes, sowie auf Prozesse des Wärmeüberganges von einem wärmeren Körper auf einen kälteren und von einem kälteren auf einen wärmeren. Dieser letzte Prozeß ist wohl durchführbar, verlangt aber eine ganze Reihe von aufeinanderfolgenden recht komplizierten Manipulationen. Unterstreichen wir eine wichtige Tatsache: Was für ein Prozeß auch vor sich gehen möge, ein ihm entgegengesetzter ist stets möglich. Er kann allerdings viel komplizierter sein als der erste. Mit anderen Worten, er besteht aus einer Reihe von Prozessen, die den Vernichtungsprozeß der vom ersten hervorgerufenen Veränderung sozusagen begleiten.

Etwas ganz anderes bedeutet die Bezeichnung „umgekehrter Prozeß“. Gesetzt, es habe wieder irgend ein Prozeß stattgefunden. In diesem Falle muß der umgekehrte Prozeß in umgekehrter Reihenfolge verlaufen, ohne daß er von anderen Prozessen begleitet

wird, die beim ersten nicht erfolgten. Man überzeugt sich leicht, daß ein umgekehrter Prozeß fast stets undurchführbar ist. Um dieses zu illustrieren, betrachten wir nochmals die Beispiele auf S. 198, 199. Bei einer Berührung von zwei Körpern geht die Wärme vom wärmeren auf den kälteren über. Ein entgegengesetzter Prozeß der Wärmeübertragung vom kälteren Körper auf den wärmeren ist möglich, jedoch, wie gesagt, sehr kompliziert. Ein umgekehrter Prozeß der unmittelbaren Wärmeübertragung von einem kälteren Körper auf einen wärmeren durch Berührung ist offenbar unmöglich. Bei einem Stoß hat man es mit einem Prozeß zu tun, bei dem kinetische Bewegungsenergie des Körpers in Wärmeenergie übergeht. Ein entgegengesetzter Prozeß läßt sich durchführen, z. B. mit Hilfe einer Dampfmaschine, die, Wärme aufwendend, den Körper in Bewegung setzen kann. Ein umgekehrter Prozeß, bei dem die durch den Stoß entstandene Wärme sich unmittelbar in Bewegung des Körpers wandelt, ist gänzlich unmöglich. Es ist ohne weiteres verständlich, daß der Prozeß einer gegenseitigen Diffusion zweier Gase oder der Prozeß der Auflösung des Salzes in Wasser in umgekehrter Reihenfolge nicht verlaufen können: Die Gase gehen nicht auseinander und das Salz wird sich aus dem Wasser nicht ausscheiden, ohne daß eine ganze Reihe von zusätzlichen Prozessen nötig wäre. Besonders lehrreich ist jedoch der Prozeß der Gasausdehnung in ein Vakuum.

Angenommen, ein zylindrisches Gefäß (Fig. 29) sei durch eine Scheidewand  $AB$  in zwei Teile  $M$  und  $N$  getrennt.  $CD$  sei ein Kolben, der zuerst fest sein möge. Der Teil  $M$  ist mit Gas angefüllt, z. B. mit Luft, während  $N$  ein leerer Raum ist. Entfernt man die Scheidewand  $AB$ , so geht das Gas sofort nach  $N$  über und füllt beide Teile  $M$  und  $N$  des Zylinders gleichmäßig aus. Der umgekehrte Prozeß eines sozusagen freiwilligen Überganges des ganzen Gases nach  $M$ , so daß in  $N$  von neuem ein Vakuum entsteht, ist offenbar unmöglich. Dagegen läßt sich ein entgegengesetzter Prozeß der Konzentration des ganzen Gases in  $M$  leicht durchführen, wenn der Kolben  $CD$  von rechts nach links bewegt wird. Auf diese Weise wird das Gas zusammen-

Fig. 29.



gedrückt und von  $N$  nach  $M$  zurückbefördert. Hier sind aber zusätzliche Prozesse erforderlich: Erstens muß beim Zusammen-drücken des Gases eine Arbeit geleistet werden, wobei Wärme entsteht, denn durch Kompression erwärmt sich das Gas. Zweitens muß man dem Gas die Wärme entziehen, um den Zustand genau so herzustellen, wie er vor der Ausdehnung des Gases ins Vakuum hinüber vorhanden war. Man sieht, daß auch hier ein entgegengesetzter Prozeß wohl möglich, doch seinem Charakter und dem allgemeinen Verlauf nach bedeutend komplizierter ist, als der erste Prozeß der Ausdehnung des Gases ins Vakuum. Er kann nur dann erfolgen, wenn er die angegebenen zusätzlichen Prozesse im Gefolge hat.

Aus alledem ersieht man, daß physikalische Prozesse in zwei, einander entgegengesetzten Richtungen verlaufen können. Es ist von Wichtigkeit, zu bemerken, daß für den ersten Hauptsatz, d. h. für das Prinzip von der Erhaltung der Energie, welches ausschließlich die rein quantitative Seite der Prozesse bestimmt, beide Richtungen sich dem Wesen nach durch nichts voneinander unterscheiden. Der erste Hauptsatz verhält sich ihnen gegenüber indifferent und sieht zwischen ihnen keinen prinzipiellen Unterschied. Er bestimmt mit gleicher Genauigkeit die Wärmemenge, die beim Aufwand einer bestimmten Arbeit entsteht und die Arbeit, die beim Aufwand einer bestimmten Wärmemenge gewonnen werden kann. Er entscheidet beide Fragen gleichzeitig, indem er bestimmt, welche Mengen von Wärme und Arbeit einander äquivalent sind. Für das Prinzip von der Erhaltung der Energie spielen beide Richtungen des Prozesses die gleiche Rolle und es fragt gar nicht danach, ob die eine Richtung irgendwelche Vorzüge vor der anderen hat.

**§ 3. Natürliche und unnatürliche Prozesse.** Die im vorigen Paragraphen angeführten Beispiele zeigen zur Genüge, daß einige physikalische Prozesse, die in dem unserer Beobachtung zugänglichen Teil des Weltalls erfolgen, leicht und, wenn man so sagen darf, ohne besondere Schwierigkeiten verlaufen, während andere, und zwar die umgekehrten, niemals vor sich gehen und praktisch absolut nicht zu verwirklichen sind. Entgegengesetzte Prozesse sind wohl in allen Fällen möglich, doch

ist ihre Verwirklichung zuweilen mit sehr großen Schwierigkeiten verbunden und verlangt jedenfalls eine ganze Reihe von zusätzlichen Prozessen.

Eine eingehende Erforschung der verschiedenartigsten Erscheinungen hat gezeigt, daß alle physikalischen Prozesse sich in zwei Gruppen einteilen lassen, und zwar in natürliche und unnatürliche Prozesse. Sie sind einander entgegengesetzt: Ist irgend ein Prozeß ein natürlicher, so ist der ihm entgegengesetzte unbedingt ein unnatürlicher.

Wir wollen uns nun zur Charakteristik der beiden Prozeßarten wenden.

A. Natürliche Prozesse, die auch als positive bezeichnet werden, besitzen vor den anderen einen sonderbaren, auf den ersten Blick unverständlichen, doch zweifellos vorhandenen Vorzug. Der berühmte deutsche Forscher Planck (geb. 1858) sagt, daß die Natur solche Prozesse liebt und ihnen stets den Vorzug gibt. Der große Vorzug der natürlichen Prozesse besteht darin, daß sie, wie wir kurz sagen wollen, „von selbst“ verlaufen. Diese Worte bedürfen einer Erklärung. Erstens kann man sie wörtlich auffassen: Solche Prozesse entstehen ununterbrochen und verlaufen von selbst ohne Einmischung des Menschen und ohne, daß andere Begleitprozesse erforderlich wären. Zweitens bedeuten die Worte „von selbst“, daß ein natürlicher Prozeß sich als einziges Resultat der Gesamtheit einer ganzen Reihe von gleichzeitig oder aufeinanderfolgend verlaufenden verschiedenen Prozessen erweisen kann. Diesen Vorzug kann man kurz so ausdrücken, daß natürliche Prozesse „solo“ verlaufen können, d. h. ohne daß gleichzeitig irgendwelche Veränderungen in Körpern auftreten, die an dem Prozeß nicht beteiligt sind. Um in der Folge Material zur Hand zu haben, wollen wir vier natürliche Prozesse anführen.

Zu den natürlichen Prozessen gehören:

1. Wärmeübergang von einem wärmeren auf einen kälteren Körper.
2. Übergang von Arbeit in Wärme.
3. Gegenseitige Diffusion zweier Stoffe, z. B. zweier Flüssigkeiten oder zweier Gase.

4. Ausbreitung des Gases in ein Vakuum (S. 201) oder überhaupt Übergang eines Teiles desselben aus einem Raum, in dem ein höherer Druck herrscht, in einen Raum, wo er geringer ist (ohne Temperaturänderung des Gases).

B. Unnatürliche Prozesse, die wir auch als negative bezeichnen wollen, sind die den natürlichen entgegengesetzten Prozesse. Zweifellos sind sie alle möglich, doch verlaufen sie niemals „von selbst“, d. h. „solo“. Das bedeutet nicht nur, daß sie niemals selbständig entstehen und verlaufen, ohne andere Prozesse im Gefolge zu haben. Die Worte haben einen viel tieferen Sinn: Niemals wird es gelingen, eine solche Kombination von Prozessen zu erdenken, daß sie als einziges Resultat einen unnatürlichen Prozeß ergäbe.

Ein solcher Prozeß ist, wie gesagt, möglich, doch muß er stets von irgendwelchen anderen Prozessen begleitet sein, wobei außer der Veränderung, die das Wesen des betrachteten unnatürlichen Prozesses ausmacht, auch unbedingt Veränderungen in anderen Körpern als weitere Resultate der Gesamtheit der verlaufenden Prozesse auftreten. Ein unnatürlicher Prozeß kann niemals „solo“, im erweiterten Sinne des Wortes, auftreten.

Zu den unnatürlichen Prozessen gehören solche, die den oben angeführten natürlichen Prozessen entgegengesetzt sind, und zwar:

1. Wärmeübergang von einem kälteren auf einen wärmeren Körper.
2. Übergang von Wärme in Arbeit.
3. Trennung in Bestandteile einer Mischung von zwei gegenseitig diffundierten Stoffen, z. B. von zwei Flüssigkeiten oder zwei Gasen.
4. Verkleinerung des Volumens einer gegebenen Gasmenge (ohne Temperaturänderung).

Alle diese Prozesse sind möglich, doch ist ihre Wirklichung nicht leicht und hat unbedingt irgendwelche Nebenprozesse im Gefolge. Über den vierten Prozeß ist bereits auf S. 201, 202 gesprochen worden. Wir wollen einen charakteristischen Umstand hervorheben, der sich auf die unter Nummer 2 angeführten natürlichen und unnatürlichen Prozesse bezieht. Man verstand es im Altertum und heute verstehen es noch unkultivierte Völker-

schaften, Wärme auf Kosten einer geleisteten Arbeit zu gewinnen. Man denke nur an die Verwendung des Feuersteins und besonders an die Feuergewinnung durch Aneinanderreiben von zwei trockenen Holzstücken. Im Laufe von vielen Jahrtausenden jedoch, in Zeiten einer hohen Kulturblüte kannte die Menschheit keine praktisch verwertbare Methode, um durch Wärmearbeit zu gewinnen, und erst die Erfindung der Dampfmaschine gab ihr die Möglichkeit, den unnatürlichen Prozeß des Überganges von Wärme in Arbeit zu verwirklichen.

Wir hatten gesagt, daß die Veränderung, die einem unnatürlichen Prozeß entspricht, niemals das einzige Resultat der Gesamtheit von irgendwelchen Prozessen sein kann. Es darf das durchaus nicht so aufgefaßt werden, als hätten wir es bis jetzt nicht vermocht, praktisch ein solches Resultat zu erzielen, als reiche unser Verstand oder unsere Experimentierkunst dazu nicht aus. Diese Worte sollen bedeuten, daß es ohne Zweifel objektiv unmöglich ist, daß ein gegebener Prozeß „solo“ auftritt, ohne von irgendwelchen anderen Prozessen begleitet zu sein. Diese Unmöglichkeit ist bedingungslos und ist von den subjektiven Eigenschaften des Experimentators unabhängig.

Diese Ausführungen geben uns das Recht, einen sehr wichtigen Gedanken, wenn auch noch nicht in einer endgültigen Form, auszusprechen. Jeder Prozeß kann in zwei, einander entgegengesetzten Richtungen verlaufen. Es erweist sich jedoch, daß diese beiden Richtungen sozusagen nicht gleichwertig sind. Von den zwei Prozessen, die den beiden Richtungen entsprechen, ist der eine ein natürlicher, der andere ein unnatürlicher, und es besteht zwischen ihnen ein gewaltiger Unterschied, der, wenn auch in allgemeinen Zügen, genügend besprochen worden ist. Sind für jeden Prozeß beide Richtungen gleich denkbar und erweist es sich, daß von diesen Richtungen die eine stets einen Vorzug vor der anderen besitzt, so drängt sich unwillkürlich der Gedanke auf, daß in den, in der Welt vorkommenden Erscheinungen, d. h. in unserer astronomischen Welt (S. 197), irgend eine Tendenz herrscht, irgend ein stetiges Bestreben eine bestimmte Richtung innezuhalten, die aus unbekanntem Gründen vor der ihr entgegengesetzten einen gewaltigen Vorzug besitzt. Wir begnügen uns mit dieser vorläufigen Andeutung.

**§ 4. Die Kompensation der unnatürlichen Prozesse.** Als wir die unnatürlichen Prozesse erwähnten, wiesen wir darauf hin, daß ihre Verwirklichung auf bedeutende Schwierigkeiten stößt und daß sie vor allem nicht „solo“ verlaufen können, sondern stets irgendwelche andere Prozesse im Gefolge haben müssen, so daß außer den Veränderungen, die ihnen entsprechen, solche unbedingt auch in anderen, an diesen Prozessen beteiligten Körpern stattfinden. Wir stellen nun eine grundlegende Frage: Was sind es denn für Prozesse, die einen unnatürlichen Prozeß begleiten müssen, um seinen Verlauf möglich zu machen? Eine allseitige und sorgfältige Erforschung der uns umgebenden physikalischen Erscheinungen gibt auf diese Frage eine erschöpfende Antwort. Es erweist sich, daß ein unnatürlicher oder negativer Prozeß nur dann möglich ist, wenn er einen natürlichen oder positiven im Gefolge hat. Mithin kann ein natürlicher Prozeß „solo“ verlaufen, ein unnatürlicher dagegen nur in Begleitung eines natürlichen. Hat sich im Endresultat der Gesamtheit einer beliebigen Anzahl von beliebigen Prozessen eine Veränderung eingestellt, die einem unnatürlichen Prozeß entspricht, so muß auch unbedingt eine Veränderung vorhanden sein, die von einem natürlichen Prozeß herrührt. Wir wollen besonders bei Umwandlungen von Arbeit in Wärme und von Wärme in Arbeit verweilen, um an diesem historisch sehr wichtigen Beispiel unsere Ausführungen zu illustrieren.

Der natürliche Prozeß eines Arbeitsaufwandes und des Entstehens von Wärme vollzieht sich ununterbrochen „von selbst“ bei einem Stoß, bei Reibung, bei Erwärmung durch elektrischen Strom (Arbeit der elektrischen Kräfte), bei vielen chemischen Reaktionen (Arbeit der chemischen Verwandtschaftskräfte), bei Kompression, z. B. eines Gases, usw. Das Beispiel eines unnatürlichen Prozesses von Wärmearbeit zur Gewinnung von Arbeit sehen wir in der Dampfmaschine. Sadi Carnot (1824) überlegte sich als erster die Bedingungen, unter denen die Dampfmaschine arbeitet, und kam zu folgendem bemerkenswerten Resultat. In jeder Dampfmaschine muß bekanntlich ein stark erwärmter Kessel vorhanden sein und außerdem ein bedeutend kühlerer Raum, in den die Wasserdämpfe nach der Arbeitsleistung treten. Bezeichnen wir diesen Raum allgemein als Kühlraum. Als

solcher kann die Luft dienen oder ein besonderes Gefäß, in das die Dämpfe aus dem Zylinder treten und durch kaltes Wasser abgekühlt werden. Im Kühlraum geben die Dämpfe den Rest der Wärme ab, die sie aus dem Kessel mitführten.

Indem Sadi Carnot nach den Bedingungen suchte, unter denen die Wärme in der Dampfmaschine Arbeit leisten kann, fand er, daß diese Bedingungen durch den Kessel und den Kühlraum gegeben sind, d. h. durch zwei Körper, deren Temperaturen unbedingt verschieden sein müssen. Es ist in der Tat leicht zu verstehen, daß eine Dampfmaschine aufhört Arbeit zu leisten, wenn der Kühlraum auf die Temperatur des Kessels erwärmt wird. Es ist mithin der Temperaturunterschied oder, wie man zu sagen pflegt, das Temperaturgefälle, beim Übergang vom Kessel zum Kühlraum die zur Arbeit der Dampfmaschine unumgängliche Bedingung. Um die weiteren interessanten, jedoch, wie wir sehen werden, irrtümlichen Gedanken von Carnot verstehen zu können, muß man in Betracht ziehen, daß er (1824) vom Wärmearaufwand zur Gewinnung von Arbeit noch nichts wußte und die Wärme selbst für einen unvernichtbaren „Wärmestoff“ (S. 89) hielt. Daher glaubte er, daß die Wärme, die durch den Dampf dem Kessel entzogen wird, als Ganzes in den Kühlraum gelangt, wenn man natürlich zufällige Verluste durch die Wärmeleitfähigkeit, die Abkühlung der Maschinenteile in der kalten Luft usw. vernachlässigt.

Carnot glaubte, daß das „Wärmestoffgefälle“ von der Kesseltemperatur auf die Temperatur des Kühlraumes die Bedingung darstellt, unter welcher der Wärmestoff Arbeit leistet, analog wie Wasser arbeitet, indem es von einem höheren Niveau auf ein tieferes fällt, ohne sich zu verausgaben, d. h. ohne daß es aufhört, Wasser zu sein. Das Wassergefälle von oben nach unten und das Wärmestoffgefälle, gleichfalls von oben nach unten, d. h. von der höheren Kesseltemperatur auf die tiefere des Kühlraumes, schienen Carnot Erscheinungen von tiefer Analogie zu sein. Das ganze Bild ist, wie wir jetzt wissen, auf einer irrtümlichen Grundlage aufgebaut. Denn erstens leistet Wasser Arbeit, indem es die potentielle Energie eines gehobenen Körpers verausgabt (S. 71, 72). Zweitens existiert der Wärmestoff nicht, sondern die Wärme ist selbst eine Energieform, die auf-

gewandt wird, d. h. als Wärme zu existieren aufhört, wenn auf ihre Kosten Arbeit geleistet wird. Und dennoch hatte der geniale Carnot das Wesen der ganzen Sache richtig erfaßt: der natürliche Prozeß des Wärmeüberganges vom wärmeren Kessel zum kälteren Kühlraum muß den unnatürlichen Prozeß der Verwandlung von Wärme in Arbeit begleiten, damit dieser letztere Prozeß sich als möglich erweist. Carnots Fehler läßt sich also auf folgendes zurückführen: Er glaubte, daß die dem Kessel entzogene Wärme als Ganzes dem Kühlraum zugeführt wird. In Wirklichkeit aber wird ein Teil der Kesselwärme zur Arbeitsleistung verwandt und verschwindet, während ein anderer Teil derselben in den Kühlraum gelangt.

In diesem Beispiel sehen wir eine Bestätigung unseres allgemeinen Satzes, daß ein unnatürlicher Prozeß (Übergang von Wärme in Arbeit) nur in Begleitung eines natürlichen Prozesses (Wärmeübergang von einem wärmeren Körper zu einem kälteren) erfolgen kann.

Macht das Vorhandensein eines natürlichen Prozesses das Auftreten eines unnatürlichen möglich, so sagt man, daß der erstere die Unnatürlichkeit des zweiten kompensiert. In der Dampfmaschine wird die unnatürliche Verwandlung einer gewissen Wärmemenge in Arbeit durch den gleichzeitigen Übergang einer gewissen anderen Wärmemenge vom Kessel zum Kühlraum kompensiert.

Es ist leicht zu verstehen, daß eine solche Kompensation durch bestimmte quantitative Gesetze geregelt sein muß. In der Tat können Prozesse dieser Art sich voneinander quantitativ unterscheiden, und unwillkürlich bezeichnen wir den einen als groß, einen anderen als klein, oder schreiben dem einen Prozeß eine geringe, einem anderen eine sehr bedeutende Intensität zu. Betrachten wir z. B. den Prozeß des Wärmeüberganges von einem Körper von hoher zu einem Körper von niedrigerer Temperatur. Geht das erstemal eine Kalorie von  $20^{\circ}$  auf  $15^{\circ}$  über, ein anderesmal aber 100 Kalorien von  $150^{\circ}$  auf  $0^{\circ}$ , so sagen wir, daß der zweite Prozeß intensiver ist als der erste. Überhaupt müssen wir einem solchen Prozeß um so größere Intensität zuschreiben, je größer die übergegangene Wärmemenge und je höher ihr „Gefälle“ ist, d. h. die Temperaturdifferenz zwischen zwei Körpern, in denen der

Wärmeübergang stattfindet. Desgleichen erscheint uns der Prozeß der Wandlung von Wärme in Arbeit um so intensiver, je größer die Wärmemenge ist, die zur Arbeitsleistung verwandt wurde, und je höher ihre Temperatur, d. h. die Temperatur des Körpers, dem diese Wärme entzogen wird, z. B. die Kesseltemperatur einer Dampfmaschine. Wir kehren zur Kompensationsfrage zurück. Es ist nicht gut möglich, daß zur Kompensation eines „großen“, d. h. sehr intensiven unnatürlichen Prozesses ein „winziger“, d. h. wenig intensiver natürlicher Prozeß genügen könnte. Es ist klar, daß die Kompensation bestimmten quantitativen Gesetzen unterliegen muß. Das bedeutet, daß ein natürlicher Prozeß eine ganz bestimmte minimale Intensität besitzen muß, um einen gegebenen unnatürlichen Prozeß kompensieren zu können.

So ist es z. B. selbstverständlich, daß der „große“ unnatürliche Prozeß der Wandlung in Arbeit von 1000 Kalorien, die einem Körper entzogen werden, dessen Temperatur  $120^{\circ}$  beträgt, wohl kaum durch einen „kleinen“ natürlichen Prozeß des Überganges einer Kalorie von einem Körper von  $30^{\circ}$  zu einem solchen von  $25^{\circ}$  kompensiert wird. Die Wissenschaft hat sich in dieser Frage vollkommen zurechtgefunden und hat die quantitativen Gesetze entdeckt, welche die Kompensation von unnatürlichen Prozessen durch natürliche regeln. Es ist uns nicht möglich, hier in weitere Einzelheiten einzudringen, doch können wir uns eine klare Vorstellung von dem besonders wichtigen und interessanten Kompensationsfall bilden, den wir in der soeben betrachteten Dampfmaschine vor uns haben. In dieser wird der unnatürliche Übergang einer Wärmemenge in Arbeit durch den natürlichen Übergang einer anderen Wärmemenge vom Kessel in den Kühlraum kompensiert. In diesem Falle werden beide Wärmemengen einer und derselben Quelle, nämlich dem Kessel, entzogen. Diese ganze Menge wollen wir als verbrauchte Wärme bezeichnen. Sie besteht aus der nutzbar verbrauchten, d. h. zur Arbeitsleistung aufgewandten, und aus der übergebenen (in den Kühlraum) Wärme, die offenbar nutzlos verbraucht wird. Nehmen wir an, die Temperaturen des Kessels und des Kühlraumes seien bekannt. Der Kessel habe beispielsweise eine Temperatur von  $100^{\circ}$  C, der Kühlraum dagegen  $0^{\circ}$ . Weiterhin nehmen wir an, daß wir eine gewisse Arbeit leisten wollen, die 1000 Kalorien

äquivalent wäre, so daß die nutzbar verbrauchte Wärme eben 1000 Kalorien betragen müßte. Der unnatürliche Prozeß des Überganges von 1000 Kalorien Wärme in Arbeit bedarf jedoch zu seiner Verwirklichung als Kompensation eines gleichzeitigen natürlichen Prozesses des Überganges einer gewissen Wärmemenge vom Kessel in den Kühlraum. Es stellt das zwar einen vollständig nutzlosen, doch leider unvermeidlichen Wärmeverbrauch dar. Es fragt sich nun, welche Wärmemenge vom Kessel ( $100^{\circ}$ ) in den Kühlraum ( $0^{\circ}$ ) übergehen muß, damit der unnatürliche Übergang in Arbeit von 1000 demselben Kessel ( $100^{\circ}$ ) entnommenen Kalorien kompensiert wird. Eine Antwort auf diese Frage gibt folgendes Gesetz, das sich überhaupt auf Fälle bezieht, in denen beide Wärmemengen, die nutzbar zu verwendende und die nutzlos übergehende einer und derselben Wärmequelle, wie z. B. dem Kessel im Falle der Dampfmaschine, entnommen werden.

Dieses Gesetz lautet folgendermaßen: Im vorliegenden Falle verhält sich die ganze dem Kessel entnommene und aufgewandte Wärmemenge zu der nutzlos verbrauchten, in den Kühlraum übergegangenen Menge, wie sich die absolute Temperatur (S. 98) des Kessels zu der absoluten Temperatur des Kühlraumes verhält.

Wir wollen uns in Erinnerung rufen, daß die absolute Temperatur gleich ist der Temperatur nach Celsius, vermehrt um die Zahl 273. Dieses Gesetz löst alle Fragen bezüglich der Kompensation des unnatürlichen Überganges von Wärme in Arbeit. Die absolute Temperatur des Kessels ( $100^{\circ}$  C) beträgt  $373^{\circ}$ , die des Kühlraums ( $0^{\circ}$  C)  $273^{\circ}$ . Unser Gesetz besagt, daß die nutzlos übergegangene Wärme  $\frac{273}{373}$ , d. h. fast  $\frac{3}{4}$  der ganzen dem Kessel entnommenen Wärme ausmacht. Es folgt daraus, daß die zur Arbeitsleistung nutzbar verbrauchte Wärme nur  $\frac{100}{373}$ , d. h. etwas über ein Viertel (0,27) des ganzen Wärmeverbrauches beträgt. In dem vorhin angeführten Zahlenbeispiel, wo wir 1000 Kalorien nutzbar verwenden müssen, haben wir im ganzen 3730 Kalorien zu verbrauchen, von denen 2730 nutzlos in den Kühlraum übergehen. Dieser natürliche, für uns jedoch nutzlose Übergang von 2730 Kalorien aus dem Kessel in den Kühlraum kompensiert den unnatürlichen Übergang von 1000 Kalorien in Arbeit.

Um das Unnatürliche immerhin möglich zu machen, müssen wir fast  $3\frac{3}{4}$ mal soviel Wärme verbrauchen, als wir zur Arbeitsleistung nötig haben, so daß fast  $2\frac{3}{4}$ mal soviel Wärme, als wir ihrer bedürfen, nutzlos verbraucht wird.

2730 Kalorien müssen wir opfern, um die von uns erstrebte Arbeit von 1000 Kalorien zu gewinnen. Das Verhältnis der nutzbar verwandten Wärme zum ganzen Verbrauch und zu der nutzlos übergegangenen hängt nur von den „äußersten“ Temperaturen (des Kessels und des Kühlraumes) ab, wie das auch unser Gesetz zum Ausdruck bringt. Betragen diese Temperaturen  $100^{\circ}$  und  $0^{\circ}$ , so gehen fast drei Viertel (0,73) des ganzen Wärmeverbrauchs nutzlos verloren und nur etwas über ein Viertel (0,27) geht in Arbeit über.

Das Verhältnis der nutzbar verbrauchten Wärme zum ganzen Verbrauch nennt man den Wirkungsgrad der betreffenden Maschine. Würde man in einer Dampfmaschine dem Kessel nur die zur Arbeitsleistung erforderliche und die zur Kompensation gesetzmäßig unbedingt nötige Wärme entnehmen, so würde der Wirkungsgrad einer Maschine, die zwischen  $100^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$  arbeitet, 0,27 betragen. Schon dieses Ergebnis würde uns davon überzeugen, daß die Dampfmaschine, die im Leben der Menschheit eine so gewaltige Rolle spielt, sich als höchst unvorteilhaft erweist, da sie drei Viertel der ihr zur Verfügung gestellten Wärmeenergie verbraucht, ohne daraus Nutzen zu ziehen. In Wirklichkeit jedoch ist es damit noch viel schlimmer bestellt, und zwar aus folgendem Grunde. Das vorhin angeführte Gesetz bestimmt das Minimum an Wärme, deren Übergang vom Kessel in den Kühlraum unbedingt erforderlich ist, um als Kompensation eines gleichzeitigen unnatürlichen Überganges von Wärme in Arbeit dienen zu können. Außerdem aber kann der Wärmeübergang vom Kessel in den Kühlraum noch in beliebigen Mengen erfolgen, wobei natürlich der Gesamtverbrauch größer wird und der Wirkungsgrad abnimmt. Die Zahl 0,27 muß man als eine ideelle betrachten, die sich auf einen Fall bezieht, in dem außer dem zur Kompensation erforderlichen kein weiterer Wärmeverlust eintritt. In Wirklichkeit aber erhält in den Dampfmaschinen der Kühlraum mehr Wärme, als zur Kompensation nötig ist, und außerdem geht eine bedeutende dem Kessel entnommene Wärme-

menge nutzlos „unterwegs“ verloren, und zwar durch Wärmeleitfähigkeit, Abkühlung der verschiedenen Maschinenteile durch die Luft usw. Daher ist der Wirkungsgrad der Dampfmaschinen noch bedeutend kleiner als die sich aus unserem Gesetz ergebende Zahl, und wollen wir 1000 Kalorien zur Arbeitsleistung verwenden, so müssen wir dem Kessel im ganzen weit mehr als 3730 Kalorien entnehmen.

Wir sind hier auf einen Fall der Kompensation eines unnatürlichen Prozesses durch einen natürlichen ausführlich eingegangen. Man überzeugt sich leicht, daß auch die anderen auf S. 204 angeführten unnatürlichen Prozesse unter der Bedingung, daß sie durch einen natürlichen Prozeß kompensiert werden, möglich sind. Man kann Wärme von einem kälteren Körper auf einen wärmeren übertragen, wenn man unter Zuhilfenahme von äußeren Kräften in der Dampfmaschine Kolbenbewegungen erzeugt, die den gewöhnlichen entgegengesetzt verlaufen. Der Kolben wird die Dämpfe dem Kühlraum entziehen und sie in den Kessel jagen, alles wird in umgekehrter Richtung verlaufen, und im Resultat erhält der heiße Kessel die dem Kühlraum entzogene Wärme, zuzüglich der Wärme, die durch Kompression des Dampfes als Resultat der beim Hineinpressen desselben in den Kessel geleisteten Arbeit entsteht. Es ist einleuchtend, daß der unnatürliche Prozeß einer Wärmeübertragung von einem kälteren Körper auf einen wärmeren hier durch den natürlichen Prozeß der Verwandlung von Arbeit in Wärme kompensiert wird.

Zwei gegenseitig diffundierte Stoffe zu trennen, ist natürlich möglich, es bedarf aber einer ganzen Reihe von komplizierten physikalischen und chemischen Prozessen. Betrachtet man sie genauer, so findet man stets, daß sie durch natürliche Prozesse kompensiert werden müssen. Viele Forscher waren bestrebt, solche Kombinationen von verschiedenen Prozessen zu erdenken, als deren Resultat nur eine einzige Veränderung auftreten würde, die einem der unnatürlichen Prozesse entspräche, z. B. nur einem Übergang von Wärme in Arbeit. Alle diese Versuche haben jedoch zu nichts geführt, und an der unbedingten Gültigkeit dessen, was über die Kompensation der unnatürlichen Prozesse durch natürliche gesagt worden ist, kann nicht gezweifelt werden.

Einen unnatürlichen und einen ihn gerade noch kompensierenden natürlichen Prozeß wollen wir als äquivalente Prozesse bezeichnen und sie als gleich intensiv betrachten. In diesem Falle können wir das von uns erhaltene Ergebnis folgendermaßen formulieren:

Ein unnatürlicher Prozeß kann nur dann stattfinden, wenn er von einem ihn kompensierenden natürlichen Prozeß begleitet wird, dessen Intensität gleich oder größer ist, als die des unnatürlichen Prozesses.

Die Worte „gleich oder größer“ sind für die hier zu betrachtenden Fragen charakteristisch: größer — nach Belieben!, in keinem Fall jedoch kleiner. Die Kompensation muß gedeckt sein, außerdem kann aber der natürliche Prozeß mit einer beliebigen größeren Intensität verlaufen.

**§ 5. Der zweite Hauptsatz. Die Energiestreuung.** Von zwei einander entgegengesetzt gerichteten Prozessen entsteht und verläuft der eine stets und überall ohne besondere Schwierigkeiten, solo und mit einer durch nichts begrenzten Intensität. Der andere dagegen entsteht nie solo. Sein Entstehen ist mit der Erfüllung von besonderen schwierigen Bedingungen verbunden, er muß irgend einen natürlichen Prozeß im Gefolge haben, der eine zu seiner Kompensation ausreichende Intensität besitzt. Die Prozesse der ersten Art haben einen Vorzug, die Natur liebt sie, während die anderen sozusagen nur bedingt geduldet werden. Am Ende des § 2 hatten wir bereits angedeutet, daß in alledem die Existenz einer eigenartigen Tendenz in der unserer Beobachtung zugänglichen Welt klar zum Ausdruck kommt, das Bestreben, irgend eine bestimmte Richtung innezuhalten. Wir wollen jeden natürlichen Prozeß als einen Schritt nach vorwärts in dieser Richtung betrachten, jeden unnatürlichen Prozeß dagegen als einen Schritt nach rückwärts und wollen sagen, daß die Größen der beiden Schritte einander gleich seien, wenn die beiden Prozesse über gleiche Intensität verfügen, d. h. einander äquivalent sind, so daß der natürliche Prozeß den unnatürlichen gerade noch kompensiert. Führen wir dieses Bild ein, so erhalten wir folgendes Resultat: In unserer Welt werden ununterbrochen und überall

Schritte nach vorwärts getan; niemals und unter keinen Bedingungen kann ein Rückschritt erfolgen.

Im äußersten Falle könnte man einen Rückschritt haben und gleichzeitig einen ihm der Größe nach gleichen Fortschritt, wenn der unnatürliche Prozeß durch den natürlichen gerade noch kompensiert wird. Ihre Gesamtheit bedeutet dann einen Stillstand. Jedoch haben wir an dem Beispiel der Dampfmaschine bereits gesehen, daß die Intensität des natürlichen Prozesses größer sein kann, als es zur Kompensation erforderlich ist. Der Fortschritt ist größer als der Rückschritt, so daß man sogar bei der Verwirklichung eines unnatürlichen Prozesses doch einen Fortschritt in Richtung jener Welttendenz zu verzeichnen hat. Bis jetzt haben wir noch keine klare Formulierung der Richtung und des allgemeinen Charakters dieser Tendenz gegeben. Doch sie ist vorhanden: Unsere Welt entwickelt sich unentwegt in irgend einer bestimmten Richtung, in der sie stets nach vorwärts schreitet, niemals jedoch nach rückwärts.

Diese Tendenz, diese Evolution unserer Welt stellt eben das Wesen dessen dar, wovon uns der zweite Hauptsatz erzählt. Es gibt verschiedene Formulierungen, auf die wir später eingehen werden. Doch schon jetzt können wir einen Gedanken aussprechen, der das Resultat einer Gegenüberstellung der beiden Hauptsätze bildet.

Der erste Hauptsatz lehrt uns, daß die Welt kein Chaos ist, daß die in ihr auftretenden Erscheinungen bestimmten quantitativen Gesetzen unterworfen sind und daß es eine Weltordnung gibt.

Der zweite Hauptsatz besagt, daß unsere Welt ein Organismus ist, der sich in einer streng bestimmten Richtung entwickelt; daß sie dem ewigen Gesetz der Evolution unterliegt.

Man kann sagen, daß in diesen Worten die allgemeinste Formulierung des zweiten Hauptsatzes liegt, obwohl noch sehr unklar und verschwommen. Es ist nicht zu ersehen, wie der allgemeine Charakter dieser Tendenz beschaffen ist, wohin die Evolution unsere Welt führt und, was das Interessanteste ist, wo die Urquelle der Evolution und die Triebfedern zu suchen sind, welche die Prozesse zwingen, eine bestimmte Richtung innezuhalten. Viele

Forscher haben es versucht, das Wesen dieser Tendenz zu enträtseln und ihrem Charakter entsprechend eine Formulierung des zweiten Hauptsatzes zu geben. Solcher Formulierungen sind ziemlich viele in Vorschlag gebracht worden. Sie alle sind dem Wesen nach einander äquivalent und entsprechen verschiedenen Standpunkten oder verschiedenen Seiten und Äußerungen stets derselben Welttendenz. Doch einige dieser Formulierungen besitzen nicht die erwünschte allumfassende Allgemeinheit und beziehen sich auf speziellere Fälle, in denen diese Tendenz zum Ausdruck kommt, z. B. auf die Tatsache, daß die Umwandlung von Wärme in Arbeit und der Wärmeübergang von einem kälteren Körper auf einen wärmeren unnatürliche Prozesse sind, die einer Kompensation bedürfen.

W. Thomson (Lord Kelvin) hat im Jahre 1851 den zweiten Hauptsatz folgendermaßen formuliert: Es ist unmöglich, von einem beliebigen Teil der Materie Arbeit zu gewinnen, wenn man sie unter die Temperatur des kältesten aller umgebenden Körper abkühlt.

Das ist verständlich, denn einen gleichzeitigen kompensierenden Wärmeübergang von demselben Teil der Materie auf noch kältere Körper kann es unter den vorliegenden Bedingungen nicht geben. Würde die Wärme von den umgebenden Körpern auf den betrachteten kältesten Körper übergehen, so würde die Arbeit offenbar auf Kosten eben dieser dem wärmeren Körper entzogenen Wärme, wie sie z. B. in der Dampfmaschine dem Kessel entnommen wird, geleistet werden.

Diese Formulierung kann jedoch durch eine andere, sehr interessante ersetzt werden. Da Wärme als Arbeitsquelle dienen kann, so haben alle Vorräte an Wärmeenergie offenbar einen bestimmten Wert. Wir sind aber auf der Erdoberfläche von ungeheuren Wärmevorräten umgeben, die sich in der Luft, in der Erdkruste und im Wasser der Flüsse, Seen und Meere befinden. Könnten wir es zustande bringen, der an uns vorbeistreichenden Luft, den Flüssen und Meeren auch nur einen ganz geringen Teil ihrer Wärme zu entziehen, indem wir sie um einige Grade abkühlen, und die so gewonnene Wärme zur Arbeitsleistung zu verwenden, so würde diese Arbeit aus dem uns überall umgebenden Material umsonst gewonnen werden. Eine Maschine, die ausschließlich

auf Kosten der Wärme der Luft, des Wassers und der Erdkruste arbeiten könnte, nennt man ein Perpetuum mobile zweiter Art, im Gegensatz zum Perpetuum mobile erster Art (S. 79), das ohne jede Energiezufuhr arbeiten soll.

Das Perpetuum mobile zweiter Art widerspricht nicht dem ersten Hauptsatz, d. h. dem Prinzip von der Erhaltung der Energie und speziell der Äquivalenz von Wärme und Arbeit, denn es leistet Arbeit nicht aus nichts, sondern auf Kosten der vorhandenen Vorräte an Wärmeenergie. Man könnte deshalb glauben, daß unsere technische Ungeschicklichkeit und ein Mangel an Findigkeit die Schuld daran trügen, daß ein Perpetuum mobile zweiter Art bis jetzt noch nicht konstruiert worden ist. Man könnte glauben, daß mit der Zeit irgend ein genialer Erfinder die Menschheit mit einer derartigen Maschine beglücken wird.

Das zweite Prinzip lehrt uns, daß dieses nie der Fall sein wird. Der unnatürliche Prozeß eines Wärmeverbrauchs zur Arbeitsleistung bedarf zu seiner Kompensation eines natürlichen Prozesses, dessen Verwirklichung jedoch in dem zur Kompensation erforderlichen Umfange unter den Bedingungen auf unserer Erdoberfläche unmöglich ist. Es müßte gleichzeitig eine ungeheure Wärmemenge (vgl. das Zahlenbeispiel auf S. 210) von einem Körper auf einen anderen, bedeutend kälteren übergehen.

Auf der Erdoberfläche haben wir nicht die nötigen Temperaturdifferenzen, und diejenigen, welche man nebeneinander antrifft, sind viel zu gering, als daß eine Kompensation ermöglicht werden könnte. Könnte man eine Maschine bauen, in welcher der dem Kessel einer Dampfmaschine entsprechende Teil sich auf dem Äquator befände, während der Teil, der die Rolle des Kühlraums spielen müßte, in polaren Gegenden aufgestellt wäre, so könnte man einen Teil der äquatorialen Wärme zur Arbeit verwenden, indem man gleichzeitig etwa dreimal soviel Wärme vom Äquator nach den polaren Gegenden zu übertragen hätte.

Der erste Hauptsatz lehrt uns, daß ein Perpetuum mobile der ersten Art unmöglich ist. Der zweite Hauptsatz zeigt, daß auch ein Perpetuum mobile der zweiten Art unausführbar ist. Jede dieser beiden Maschinen verspricht der Menschheit ein goldenes Zeitalter. Die beiden Hauptsätze

besagen, daß das Glück eines goldenen Zeitalters unerreichbar ist. Und das ist gut!

Wir wenden uns nun der populärsten und gebräuchlichsten Formulierung des zweiten Hauptsatzes zu, die gleichfalls von W. Thomson (Lord Kelvin) aus dem Jahre 1852 stammt. In dieser Formulierung ist der zweite Hauptsatz unter dem Namen Prinzip der Energiestreuung bekannt. Betrachtet man etwas genauer die verschiedenartigsten natürlichen Prozesse, welche die Richtung der Tendenz, die die Evolution unserer Welt bedingt, bestimmen, so ersieht man folgendes: Alle Energiearten streben einer gleichmäßigen Verteilung zu, einer Nivellierung der bestehenden Intensitätsunterschiede (Temperaturdifferenzen, Unterschiede im Grade der Elektrisierung, im Niveau der Flüssigkeiten usw.). Gleichzeitig gehen alle Energiearten ununterbrochen in Wärmeenergie über, die auch eine gleichmäßige Verteilung erstrebt und schließlich als Strahlungsenergie in den Weltraum ausgesandt wird. Alle diese Betrachtungen führen zu der berühmten Formulierung des zweiten Hauptsatzes, als eines Prinzips der Energiestreuung: Die in unserer Welt vorhandene Energie strebt einer Zerstreuung zu, d. h. einem Übergang in gleichmäßig verteilte Wärmeenergie und darauf in Strahlungsenergie, die sich im Weltraum zerstreut. Die große Überzahl der natürlichen Prozesse entspricht tatsächlich dieser Formulierung. Es gibt aber auch zweifellos natürliche Prozesse, die in das Schema der Energiestreuung sich nicht hineinzwängen lassen. Hierher gehört z. B. die gegenseitige Diffusion von Stoffen, die gleiche Temperatur besitzen.

Der Wert der Energie liegt für uns in ihrem Vermögen, uns nützlich zu sein, als Arbeitsquelle zu dienen. Das Bestreben der Energie, sich zu zerstreuen und sich gleichmäßig zu verteilen, vermindert für uns ihren Wert. Auf dieser Grundlage hat Pfaundler (geb. 1839) dem Gedanken Ausdruck gegeben, daß die Materie als Energieträger sich entwertet und die Energie selbst ausartet.

Von allen bis jetzt angeführten Formulierungen des zweiten Hauptsatzes jedoch ist die beste diejenige, die einen einfachen Hinweis darauf enthält, daß in unserer Welt eine bestimmte Tendenz vorherrscht. Ihre Richtung wird durch die natürlichen Prozesse

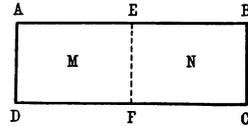
charakterisiert, die solo verlaufen können, während die ihnen entgegengesetzten unnatürlichen Prozesse nur in Begleitung eines zu ihrer Kompensation ausreichenden natürlichen Prozesses stattfinden können.

**§ 6. Der zweite Hauptsatz und die Wahrscheinlichkeit des Zustandes.** Das unsterbliche Verdienst des österreichischen Forschers L. Boltzmann besteht darin, daß er nicht nur das Wesen der Welttendenz, die wir in diesem Kapitel kennengelernt haben, geklärt hat, sondern auch die Urquelle derselben entdeckte. Als solche erscheint der molekulare Aufbau der Materie. Es ist uns leider nicht möglich, die Grundgedanken von Boltzmann, seine geistreichen Überlegungen und die Resultate, zu denen er gelangt, näher zu betrachten. Immerhin sollen die wesentlichsten Züge der Boltzmannschen Theorie geklärt werden.

Wir wissen bereits, daß sogar ein ganz kleiner, im gewöhnlichen Sinne des Wortes, Teil der Materie eine ungeheure Anzahl von Teilchen enthält, die sich in fortwährender Bewegung befinden. Die Gesamtheit einer enormen Anzahl von Teilchen wollen wir als System bezeichnen. Den Zustand eines Systems zu einer gegebenen Zeit bestimmen wir erstens daraus, wie in diesem Augenblick die Teilchen im Raume verteilt sind, zweitens aber durch die Größe und Richtung ihrer Geschwindigkeiten. Sind in einem gegebenen Raum eine Million Teilchen vorhanden, so können sie offenbar auf sehr verschiedene Art verteilt sein. Auch die Verteilung der verschiedenen möglichen Geschwindigkeiten nach Größe und Richtung kann man in Gedanken auf unzählige Arten durchführen. Jede bestimmte Verteilung der Teilchen zusammen mit einer bestimmten Verteilung ihrer Geschwindigkeiten charakterisiert den Zustand des Systems. Wir sagen, daß der Zustand des Systems sich geändert hat, wenn irgend eine Veränderung in der Verteilung oder Bewegung der Teilchen eingetreten ist. Wir setzen voraus, daß die Teilchen sehr oft miteinander zusammenstoßen. Infolge der Bewegung und der Zusammenstöße der Teilchen müssen sowohl ihre Verteilung als auch die Bewegungsgeschwindigkeiten, mit anderen Worten, der Zustand des Systems, fortwährenden Änderungen unterworfen sein. Es ist nicht unbedingt erforderlich, sich auf komplizierte mathe-

matische Betrachtungen einzulassen, um zu verstehen, daß die verschiedenen Zustände eines Systems nicht die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzen. In vielen Fällen sagt uns ein inneres Gefühl, daß der eine oder der andere Zustand eines Systems sehr wenig wahrscheinlich ist und daher entweder gar nicht, oder doch äußerst selten auftreten kann. Zufällig kann jeder Zustand eintreten, doch ist die Wahrscheinlichkeit der Verwirklichung für verschiedene Zustände sehr verschieden. Um diese Ausführungen übersichtlicher zu gestalten, betrachten wir zuerst die Frage nach den möglichen Verteilungen der Teilchen im Raume, den das System einnimmt. Der Einfachheit halber nehmen wir zuerst an, daß das System aus einer geringen Anzahl, z. B. aus 20 Teilchen besteht. Sie mögen sich in einem vollkommen geschlossenen Gefäß  $ABCD$  (Fig. 30) befinden, in dem sie sich bewegen, zusammenstoßen und gegen die Gefäßwände anprallen. Denken wir uns das Gefäß in zwei gleiche Teile  $M$  und  $N$  getrennt. Die Scheidewand  $EF$  ist nur eine gedachte, in Wirklichkeit ist sie nicht vorhanden. Indem die 20 Teilchen sich in

Fig. 30.



allen möglichen Richtungen bewegen, miteinander zusammenstoßen und von den Wänden abprallen, ändern sie fortwährend ihre Lage im Gefäß. Es fragt sich nun, ob alle möglichen Lagen gleich wahrscheinlich sind und gleich oft vorkommen werden. Möglich sind folgende 28 Verteilungen: In  $M$  alle 20 Teilchen, in  $N$  kein einziges; in  $M$  19, in  $N$  1; in  $M$  18, in  $N$  2; in  $M$  17, in  $N$  3; in  $M$  16, in  $N$  4; in  $M$  15, in  $N$  5; in  $M$  14, in  $N$  6; in  $M$  13, in  $N$  7; in  $M$  12, in  $N$  8; in  $M$  11, in  $N$  9 usw.; endlich in  $M$  3, in  $N$  17; in  $M$  2, in  $N$  18; in  $M$  1, in  $N$  19; in  $M$  kein einziges, in  $N$  alle 20.

Es ist uns klar bewußt, daß diese möglichen Verteilungen bei weitem nicht gleich wahrscheinlich sind und dementsprechend nicht gleich oft auftreten werden. Am unwahrscheinlichsten sind die beiden äußersten Fälle, in denen alle Teilchen sich zufällig in einer Hälfte zusammenfinden. Durchschreitet man die Reihe der 28 Verteilungen von den Enden aus nach der Mitte zu, so wächst die Wahrscheinlichkeit und am wahrscheinlichsten erscheinen uns die mittleren Fälle, in denen die Mengen der Teilchen

in  $M$  und  $N$  nur wenig voneinander abweichen. Solche Fälle werden am häufigsten eintreten, während ziemlich selten sich alle 20 Teilchen in einer Hälfte des Gefäßes versammeln dürften. Wenden wir dieselben Überlegungen auf ein System an, das aus einer Million Teilchen besteht. Hier tritt der Unterschied zwischen den Wahrscheinlichkeitsgraden der einzelnen Verteilungen noch klarer zutage. Ein jeder versteht, oder fühlt vielmehr, wie ungeheuer gering die Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Ansammlung aller Teilchen in einer Gefäßhälfte ist. Sogar eine Ansammlung von drei Vierteln, zwei Dritteln, drei Fünfteln (600 000 Teilchen in der einen, 400 000 in der anderen Hälfte), elf Zwanzigstel (550 000 und 450 000 Teilchen) erscheint als wenig wahrscheinlich und wir sind überzeugt, daß am häufigsten solche Verteilungen eintreten werden, bei denen die Mengen der Teilchen in  $M$  und  $N$  nur wenig voneinander abweichen.

Denken wir uns jetzt, daß  $EF$  (Fig. 30) wirklich eine Scheidewand darstellt und daß wir zuerst in  $M$  und  $N$  ungleiche Mengen von Teilchen untergebracht haben, z. B. 700 000 in  $M$  und 300 000 in  $N$ . Entfernen wir jetzt die Scheidewand, so haben wir im Gefäß eine sehr wenig wahrscheinliche Verteilung, die sich nicht erhalten wird, sondern „von selbst“ und sehr rasch in eine wahrscheinlichere übergehen wird. Es wird sich die Tendenz äußern, von einem wenig wahrscheinlichen Zustand in einen viel wahrscheinlicheren überzugehen, bei dem die Mengen der Teilchen in  $M$  und  $N$  einander fast gleich sind.

Betrachten wir jetzt die Frage nach der Verteilung der Bewegungsgeschwindigkeiten der Teilchen. Diese Frage beruht auf folgendem. Es ist auf S. 106, 107 bereits gesagt worden, daß die Geschwindigkeiten der Gasteilchen zu einer gegebenen Zeit nicht gleich sind, und daß die Gastemperatur durch einen gewissen Mittelwert dieser Geschwindigkeiten bestimmt wird. Wenden wir uns wieder der Fig. 30 zu, in welcher  $EF$  nur eine gedachte Scheidewand darstellt. Es fragt sich nun, wo sich die Teilchen mit großen und wo sich die mit geringen Geschwindigkeiten befinden. Nehmen wir an, alle schnellen Teilchen hätten sich in  $M$  und alle langsamen in  $N$  angesammelt. Jeder fühlt, daß eine derartige Verteilung bei einer größeren Anzahl von Teilchen sehr wenig wahrscheinlich ist und wohl kaum jemals zufällig

eintritt. Infolge von gegenseitigen Zusammenstößen ändert sich fortwährend die Geschwindigkeit eines jeden einzelnen Teilchens. Die schnelleren übergeben einen Teil ihrer Geschwindigkeit den langsamen und die von uns angenommene Verteilung wird sich nicht erhalten. Denken wir uns wieder, daß  $EF$  eine wirkliche Scheidewand darstellt und daß  $M$  und  $N$  Gas unter gleichem, z. B. unter Atmosphärendruck, enthalten, daß aber die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen in  $M$  größer ist als in  $N$ . Das bedeutet, daß die Temperatur des Gases in  $M$  höher ist als in  $N$ .

Nehmen wir an, das Gefäß sei vertikal aufgestellt, so daß  $M$  sich über  $N$  befindet. Entfernen wir die Scheidewand, so wird sich das Gas des ganzen Gefäßes in einem wenig wahrscheinlichen Zustande befinden und wird in einem solchen nicht verbleiben. Indem die schnellen Teilchen von  $M$  nach  $N$  gelangen, geben sie den Teilchen in  $N$  einen Teil ihrer Geschwindigkeit ab. Die Geschwindigkeiten der Teilchen in  $N$  werden allmählich zunehmen, d. h. die Temperatur in  $N$  wird steigen. Die Wärme wird von  $M$  nach  $N$  dringen. Darin äußert sich eine Erscheinung, die man als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. Wann ist denn eine solche Zustandsänderung des Systems beendet? Offenbar, wenn die Verteilung der Geschwindigkeiten in allen Teilen des Gefäßes  $ABCD$  die gleiche ist. Das will sagen, daß die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen in allen Teilen des Gefäßes fast dieselbe sein wird, wobei aber jeder Teil dennoch eine große Anzahl von Teilchen enthalten wird. Das bezieht sich nicht nur auf Gase, sondern auch auf Flüssigkeiten und auf feste Körper. Wir sehen, daß auch in diesem Falle das System die Tendenz hat, von einem wenig wahrscheinlichen Zustand von selbst in einen wahrscheinlicheren überzugehen.

Wir wenden uns jetzt dem wichtigsten und interessantesten Teil der Frage nach den verschiedenen Zuständen eines Systems zu, eines Systems, das aus einer ungeheuer großen Zahl von bewegten Teilchen besteht. Die Bewegung der Teilchen kann ordnungslos oder geregelt sein. Eine Bewegung heißt ordnungslos, wenn sie keine Spur von irgendwelcher Ordnung aufweist. Das will sagen, daß die Geschwindigkeiten von einander benachbarten Teilchen keineswegs irgendwie

zusammenhängen, so daß über die Größe und Richtung der Bewegung eines Teilchens nichts ausgesagt werden kann, wenn auch die Größe und Richtung der Bewegung eines benachbarten Teilchens bekannt sind. Außerdem kommen alle Bewegungsrichtungen gleich oft vor, keine Richtung kann sich irgend eines Vorzugs vor einer anderen rühmen. Die Bewegung eines Systems heißt gleichmäßig ordnungslos, wenn die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen in allen Teilen des Systems die gleiche ist. Es wird dabei vorausgesetzt, daß diese Teile nicht zu klein gewählt sind, so daß ein jeder eine große Anzahl von Teilchen enthält. Das 5. Kapitel lehrt uns, daß die Wärmebewegung eine vollkommen ordnungslose Bewegung ist. Sie ist gleichmäßig ordnungslos, wenn die Temperatur in allen Teilen des Systems die gleiche ist.

Die Bewegung der Teilchen eines Systems ist geregelt, wenn die Größe und Richtung der Geschwindigkeit irgend eines einzelnen Teilchens nicht beliebig sein können, sondern mit den Größen und Richtungen der Geschwindigkeiten der benachbarten Teilchen zusammenhängen, oder wenn die Bewegungen irgend einem Gesetz folgen. Den vorhin betrachteten Fall, in dem die Teilchen von großen Geschwindigkeiten in  $M$  (Fig. 30), die langsamen aber in  $N$  versammelt sind, kann man schon nicht als einen vollkommen ordnungslosen ansehen, denn eine derartige Verteilung der Teilchen zeigt offenbar eine bestimmte Ordnung, sozusagen eine bestimmte Vorschrift: Die schnellen Teilchen in  $M$ , die langsamen in  $N$ ! Wir wollen einige Beispiele für geregelte Bewegung anführen. Eine solche haben wir stets vor uns, wenn das System, d. h. ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein fester Körper, sich als Ganzes bewegt. Hierher gehört die geradlinige Bewegung eines Systems, wenn alle Teilchen der Größe und Richtung nach vollkommen gleiche Geschwindigkeiten besitzen (mit Ausnahme der ordnungslosen Wärmebewegung, die wir vorläufig außer acht lassen); weiterhin die Rotationsbewegung sowie jede andere kompliziertere Bewegung des Systems als eines Ganzen. Es ist leicht zu ersehen, in wie hohem Maße in diesen Fällen die Bewegungen von benachbarten Teilchen miteinander zusammenhängen und überhaupt geregelt sind. Andere Beispiele bilden die Bewegungen der Teilchen einer schwingenden Saite, die Be-

wegungen der Teilchen der Oberflächenschicht einer Flüssigkeit, wenn dieselbe Wellen bildet usw.

Jetzt stellen wir uns die fundamentale Frage, welche Bewegung eines Systems von Teilchen wahrscheinlicher ist, eine ordnungslose oder eine geregelte.

Es ist nicht schwer, diese Frage zu beantworten, wenn man in Betracht zieht, daß wir als wahrscheinlich einen solchen Zustand bezeichnen wollen, der leicht und häufig auftritt und insbesondere aus einem weniger wahrscheinlichen entsteht, der seltener vorkommt und einer besonderen Kombination von Bedingungen bedarf. Ein wahrscheinlicherer Zustand entsteht leicht von selbst aus einem weniger wahrscheinlichen, nicht aber umgekehrt. Daher fragen wir uns, welcher Übergang leichter vor sich geht: Von einer geregelten Bewegung zu einer ordnungslosen, oder umgekehrt? Einem jeden ist es klar, daß eine geregelte Bewegung sehr leicht zu einer ordnungslosen gemacht werden kann; die Ordnung aber wieder herzustellen, wo Trillionen von Teilchen sich ordnungslos bewegen, ist entschieden keine leichte Aufgabe.

Es ist wohl überflüssig, auf die Analogie mit einer Menschenmenge einzugehen. Die geregelten Bewegungen von mehreren Regimentern werden durch ein Komandowort, das jedem das Recht erteilt, zu gehen, wohin er will, rasch aufgehoben. Umgekehrt ist eine Regelung nur unter ausschließlichen Bedingungen möglich, wie Autorität des Kommandierenden, das Gefühl der Pflicht oder der Furcht bei den einzelnen „Teilchen“ der Menge usw. Hier wirken jedoch ganz eigenartige biologische Elemente mit, die der Welt der toten Materie, mit der sich die Physik befaßt, vollkommen fremd sind. Die Frage, die wir uns gestellt haben, müssen wir folgendermaßen beantworten:

**Eine ordnungslose Bewegung ist bei weitem wahrscheinlicher als eine geregelte; erstere entsteht leicht aus der zweiten; die zweite aus der ersten dagegen nur unter irgendwelchen ausschließlichen Bedingungen.**

Vergleicht man das damit, was über die Wärmebewegung gesagt worden ist, so gelangt man zu folgendem Resultat:

**Von allen möglichen Bewegungen eines Systems von materiellen Teilchen ist die gleichmäßig ordnungslose Wärmebewegung am wahrscheinlichsten.**

Nun ist es wohl nicht mehr schwer, den Grundgedanken der genialen Theorie von Boltzmann zu verstehen, die uns die Welttendenz, von der der zweite Hauptsatz spricht, erläutert. Sie kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

**Die Tendenz, die in den Erscheinungen unserer Welt zutage tritt und auf die der zweite Hauptsatz hinweist, läßt sich auf ein ununterbrochenes Bestreben eines Systems von materiellen Teilchen, von einem weniger wahrscheinlichen Zustand in einen wahrscheinlicheren überzugehen, zurückführen.** Darin besteht eben das Wesen jener Evolution unserer Welt, die uns veranlaßt, diese Welt als einen Organismus anzusehen, der sich in einer bestimmten Richtung entwickelt. Es stimmt damit auch die Formulierung (S. 85) überein, die von einem ununterbrochenen Übergang aller Energieformen in Wärmeenergie und von dem Bestreben der letzteren sich gleichmäßig zu verteilen spricht. Das ist auch verständlich, denn die gleichmäßig ordnungslose Bewegung der gleichmäßig verteilten Wärmeenergie ist der wahrscheinlichste Zustand eines Systems von Teilchen. Wenn ein bewegter Körper gegen ein Hindernis (Wand, Erde) stößt und stehen bleibt, so haben wir den Übergang einer wenig wahrscheinlichen geregelten Bewegung eines Systems von Teilchen in die bei weitem wahrscheinlichere ordnungslose Wärmebewegung vor uns. Dasselbe tritt ein, wenn die Bewegung eines Körpers infolge von Reibung in Wärmeenergie übergeht. Wir können jeden beliebigen natürlichen Prozeß herausgreifen, stets finden wir, daß er sich auf den Übergang eines Systems von Teilchen von einem geregelteren Zustand in einen weniger geregelten, d. h. von einem weniger wahrscheinlichen in einen wahrscheinlicheren, zurückführen läßt. Nehmen wir z. B. den natürlichen Prozeß der gegenseitigen Diffusion zweier Gase. Befinden sich in einem Gefäß alle Sauerstoffmoleküle in der unteren, alle Wasserstoffmoleküle dagegen in der oberen Hälfte, so ist eine solche Verteilung offenbar in einem gewissen Grade geregelt, und der Zustand des ganzen Systems ist nicht so wahrscheinlich, als wie er es bei einer gleichmäßigen Vermischung der Sauerstoff-

und Wasserstoffmoleküle gewesen wäre; zu diesem Zustande führt aber der Diffusionsprozeß dieser beiden Gase.

Unnatürliche Prozesse stellen einen Übergang von einem weniger geregelten in einen geregelteren oder von einem wahrscheinlicheren in einen weniger wahrscheinlichen Zustand dar.

So geht in der Dampfmaschine die vollkommen ordnungslose und wahrscheinlichste Wärmebewegung der Dampfteilchen in die geregelte Bewegung des Kolbens, der Räder usw. über. Wir sehen jedoch, daß ein unnatürlicher Prozeß durch einen natürlichen kompensiert werden muß, bei dem die Wahrscheinlichkeit des Zustandes eines anderen Systems von Teilchen größer wird. Die Regelung des einen Systems wird dadurch kompensiert, daß im anderen die Ordnung geringer wird. Denkt man sich alle an den beiden Prozessen beteiligten Teilchen in ein System vereinigt, so zeigt es sich, daß in diesem System der Grad der Regelung und folglich auch die Wahrscheinlichkeit seines Zustandes unverändert bleiben, wenn der natürliche Prozeß dem unnatürlichen äquivalent ist, d. h. diesen gerade noch kompensiert. Wir sahen jedoch, daß die Intensität des natürlichen Prozesses faktisch stets größer ist, als es die Kompensierung erfordert; so wird dem Kessel einer Dampfmaschine bedeutend mehr Wärme entzogen, als es zur Kompensation notwendig ist (S. 210). Es folgt daraus, daß auch in einer Dampfmaschine, in welcher der unnatürliche Übergang von Wärme in Arbeit vor sich geht, schließlich doch ein Übergang in einen weniger geregelten, d. h. in einen wahrscheinlicheren Zustand des Systems von materiellen Teilchen zu erblicken ist.

Ein besonderer Abschnitt der Mathematik, die Theorie der Wahrscheinlichkeit, gibt uns die Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit des Zustandes eines Systems von Teilchen zu berechnen, wenn die Verteilung und die Bewegungen dieser Teilchen bekannt sind. Wir können jetzt dem zweiten Hauptsatz folgende eigenartige Formulierung geben: Die Wahrscheinlichkeit des Zustandes unserer Welt wächst ununterbrochen; sie nimmt niemals ab.

In der komplizierten Wissenschaft, die sich speziell mit den zwei Hauptsätzen befaßt und als Thermodynamik bezeichnet wird, spielt eine besondere Größe, die man die Entropie eines

Systems von Teilchen nennt, eine große Rolle. Diese Größe hängt von der Zustandswahrscheinlichkeit des Systems in einfacher Weise ab. Die Entropie und die Wahrscheinlichkeit nehmen gleichzeitig zu und ab (für diejenigen Leser, welche mathematische Kenntnisse besitzen, sei bemerkt, daß die Entropie dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit proportional ist).

Clausius sagt: Die Energie der Welt ist konstant, die Entropie der Welt strebt ihrem Höchstwert zu. Richtiger wäre es, „unserer Welt“ zu sagen, d. h. desjenigen Teiles des Weltalls, der unserer Beobachtung zugänglich ist.

**§ 7. Unsere Welt als Organismus.** Im vorhergehenden haben wir erwiesen, daß in allen Erscheinungen der uns umgebenden und unserer Beobachtung zugänglichen Welt eine bestimmte Tendenz vorhanden ist, der man es zu verdanken hat, daß die Welt sich in einer bestimmten Richtung ununterbrochen entwickelt. Weiterhin haben wir die Ideen von Boltzmann kennengelernt, der uns zeigt, daß diese Evolution sich auf einen Übergang von einem wenig wahrscheinlichen Zustand eines Systems von Teilchen in einen wahrscheinlicheren, oder, was dem Wesen nach dasselbe ist, auf ein ununterbrochenes Anwachsen der Entropie zurückführen läßt. Der wahrscheinlichste Zustand eines Systems von Molekülen (als ein solches erscheint uns unsere Welt) ist der Zustand der gleichmäßig ordnungslosen Bewegung, d. h. der Wärmebewegung ohne Temperaturunterschiede.

Wir haben somit den Charakter jener Tendenz beleuchtet, die in unserer Welt vorhanden ist und, wie wir uns ausgedrückt haben, uns diese Welt als einen Organismus betrachten läßt, der sich in einer bestimmten Richtung entwickelt. Die ununterbrochene Evolution der Welt ist das Bild, das unser Verstand uns zeichnet. Im engsten Zusammenhang mit diesem Bilde entsteht jedoch eine lange Reihe von tiefgreifenden Fragen, die nicht nur die Aufmerksamkeit der Physiker, sondern auch der Philosophen auf sich gelenkt haben. Vor allem müssen wir fragen: Wenn eine Evolution vor sich geht, wo liegt denn ihr Anfang und wo ist ihr Ende? Wie war der Urzustand beschaffen, von dem die Evolution ausging und zu welchem Endzustand führt sie unsere Welt?

In ihrer furchtbaren Größe erstet vor uns die Frage nach dem Schicksal der Welt, und wir werden sehen, wie eng sie mit anderen ewigen Fragen zusammenhängt, die der Mensch wohl nie zu lösen imstande sein wird. Es ist hier an die Frage nach der Endlichkeit oder Unendlichkeit des Raumes und der Zeit gedacht.

Beantworten wir zuerst die Frage nach dem Ende, zu dem die in unserer Welt vorhandene Tendenz führen muß. Einfach und vollkommen klar löst sich diese Frage für jedes „geschlossene System“, welches mit den übrigen Teilen des Weltalls weder Materie noch Energie austauscht. In einem solchen System muß die Entropie ununterbrochen anwachsen; d. h. aber, daß der Zustand des Systems sich dem wahrscheinlichsten Zustand nähern muß, bei dem alle Energiearten in Wärmeenergie übergegangen sind, die sich auf alle Teile des Systems gleichmäßig verteilt, d. h. nach Pfaundler vollkommen „ausgeartet“ ist und für Arbeitsleistungen nicht mehr verwandt werden kann. Der Grenzzustand wird charakterisiert durch einen vollkommenen Stillstand, bei dem das Entstehen von irgendwelchen Prozessen und folglich das Auftreten von physikalischen Erscheinungen ausgeschlossen ist. Einen solchen Endzustand, dem ein geschlossenes System nicht entgehen kann und der dem Tode eines lebendigen Organismus gleicht, nennt man den Wärmetod. Diesem Verhängnis führt der zweite Hauptsatz jedes geschlossene System entgegen. Es darf jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß ein System, welches sich dem Grenzzustand nähert, diesen doch nie völlig erreicht. In der Tat, je geringer z. B. die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Teilen des Systems sind, desto langsamer geht der Ausgleich vor sich. Je kleiner die Geschwindigkeiten der Teile eines Systems sind, desto schwächer ist die sie begleitende Reibung und desto langsamer geht die kinetische Bewegungsenergie in Wärmeenergie über. Sind aber die Dimensionen eines Systems klein, so wird verhältnismäßig bald ein Zustand erreicht, der sich vom Grenzzustand, d. h. vom Wärmetod fast gar nicht mehr unterscheidet und praktisch mit diesem identisch ist. Für ein umfangreiches System, wie es unsere ganze astronomische Welt darstellt, d. h. für den unserer Beobachtung zugänglichen Teil des Weltalls, muß eine ungeheuer lange Zeit ver-

gehen, bis er vom heutigen Zustand in einen solchen übergeht, der dem Endzustand, d. h. dem Wärmetod fast gleich kommt. Vorläufig lassen wir die Tatsache außer acht, daß unsere Welt kein geschlossenes System darstellt.

Betrachtet man so ungeheuer große Systeme, wie unsere Welt eines ist, so drängt sich sofort eine der größten Fragen auf, die vorläufig noch jenseits der Grenzen unserer Erkenntnis und unseres Verstehens liegt und vielleicht ewig dort bleiben wird. Es ist das die Frage: Wie lange besteht unsere Welt? Die Wissenschaft kann den Gedanken, daß das Sein unserer Welt einen Anfang hat, nicht zulassen: Man müßte sich dann unter anderem vorstellen, daß diese Welt sich anfangs im Zustand der geringsten Wahrscheinlichkeit befand. Nimmt man andererseits an, daß die Welt unendlich lange besteht, so kommt man unbedingt zum Schluß, daß alle in einer bestimmten Richtung verlaufenden Prozesse beendet sein müßten, daß die Evolution der Welt ihren Abschluß erreicht hätte, denn in einem unendlich großen Zeitabschnitt müßten die Prozesse ihr Ende erreicht haben. Dieses große Dilemma ist mit dem zweiten Hauptsatz, wie es hier dargelegt ist, verknüpft.

Verschiedene Versuche, einen Ausweg aus diesem Dilemma zu finden, haben zu nichts geführt. Sehr häufig ist auf folgenden Ausweg hingewiesen worden: Zwei Gestirne, die nicht nur schon längst erloschen sind, sondern auch ihre ganze Wärmeenergie eingebüßt haben, bewegen sich weiter, stoßen miteinander zusammen und geraten dadurch in solche Glut, daß sie in dampfförmigen Zustand übergehen, in ein Nebelgebilde, ähnlich demjenigen, aus welchem sie durch langsame Verdichtung entstanden. Auf diesen Ausweg haben viele Forscher hingewiesen, unter anderen Haeckel in seinem bekannten Werk „Die Welträtsel“. Die vollkommene Haltlosigkeit dieses Gedankenganges liegt klar auf der Hand. Der neue Nebel ist mit dem ursprünglichen durchaus nicht identisch, denn die unermeßlich großen Energievorräte, die als Strahlungsenergie in den Jahrmillionen, die seit der Bildung des ersten Nebels bis zum Entstehen des zweiten verfließen, sich im Weltraume ausgebreitet haben, sind endgültig verloren, und der neue Nebel kann nur einen verhältnismäßig verschwindend kleinen Rest des Energievorrats des ersten Nebels enthalten, der als

Bewegungsenergie der beiden erloschenen Himmelskörper übrigblieb. Wir gehen noch weiter! Der Zusammenstoß kann die Gestirne nicht nur nicht vor den Folgen des zweiten Hauptsatzes retten, sondern bedeutet einen großen Fortschritt in Richtung der Evolution, die durch diesen Hauptsatz bestimmt wird. In der Tat erfolgt bei einem erloschenen, vollkommen erkalteten Himmelskörper die weitere Energiestreuung nur außerordentlich langsam, ja sie hört überhaupt auf, wenn der Körper sich bewegt, ohne auf irgendwelchen Widerstand des Mediums zu stoßen. In dem durch den Zusammenstoß gebildeten heißen Nebel beginnt von neuem eine rasche Energiestreuung in den Weltraum und ein ihr entsprechendes Anwachsen der Zustandswahrscheinlichkeit. Das Entstehen des neuen Nebels, als glänzendes Beispiel für den Übergang von einer geregelten Bewegung in eine ordnungslose Wärmebewegung, steht mit dem zweiten Hauptsatz vollkommen in Einklang. Man kann noch weiter gehen und die Behauptung aufstellen, daß, im Falle die erloschenen Himmelskörper in ihrer Bewegung auf keinen Widerstand stoßen, nur gegenseitige Kollisionen die Welt zwingen können die durch den zweiten Hauptsatz gewiesene Richtung weiterhin innezuhalten und die zum Stillstand gebrachte Evolution fortzusetzen.

Zusammenstöße zwischen erloschenen Himmelskörpern bedeuten keine Rettung vor dem Wärmetod. Es läßt sich jedoch in einer anderen Richtung die Möglichkeit eines Ausweges erblicken, wenn auch vorläufig noch unklar und nebelhaft. Wir sprechen die ganze Zeit von einem geschlossenen System. Ein solches existiert aber in Wirklichkeit gar nicht. Selbstverständlich stellt unsere Welt kein geschlossenes System dar. Sie ist nur ein Teilchen des Weltalls und hängt mit den anderen Teilen desselben auf eine Weise zusammen, die uns gänzlich unbekannt ist. Hier liegt vor uns ein jungfräuliches Feld für allerlei Hypothesen, die in allen Fällen leider sehr wenig begründet sind. Im engsten Zusammenhang mit ihnen entstehen jedoch die ewigen Fragen nach der Endlichkeit und Unendlichkeit des Raumes und nach der Menge der in ihm enthaltenen Materie.

Vom Weltall wissen wir nichts, aber gerade dieser Umstand müßte uns zwingen, mit größter Vorsicht zu überlegen und ohne etwas zu behaupten, verschiedene Möglichkeiten anzunehmen.

Wir haben nicht das Recht zu behaupten, das Weltall sei gleichartig, d. h. in allen seinen Teilen unserer Welt analog aufgebaut. Nur bei völliger Unkenntnis der Grenzen, die unserem Erkenntnisvermögen gesetzt sind, kann man den Versuch unternehmen, den zweiten Hauptsatz auf das ganze Weltall zu beziehen und von einem Ende der Welt, vielmehr des Weltalls, zu sprechen, das die unvermeidliche Folge der Energiestreuung sein muß. Aus den Eigenschaften der unserer Beobachtung zugänglichen Welt, die nicht einmal ein Atom des Weltalls bildet, falls dieses unendlich ist, kann man nicht auf die Eigenschaften des Weltalls schließen, das unserer Erkenntnis verschlossen bleibt. In seinen anderen Teilen ist es vielleicht unserer Welt ganz unähnlich. Sein Inhalt kann ein gänzlich anderer sein, unserer Vorstellungskraft unfaßbar, und die Gesetze, denen die Erscheinungen gehorchen, brauchen nicht dieselben zu sein, wie sie uns die Betrachtung unserer winzigen Welt lehrt. Möglich, daß in den unbekanntem Eigenschaften der anderen Teile des Weltalls die Ursache solcher Erscheinungen verborgen liegt, die allmählich oder periodisch das Resultat der Evolution, die wir heute in unserer winzigen Welt beobachten, vernichten.

**§ 8. Schlußbetrachtung.** In diesem Kapitel haben wir eine der größten Entdeckungen des menschlichen Geistes kennengelernt, der es vermocht hat, in dem scheinbaren Chaos der uns umgebenden Erscheinungen nicht nur die Gesetze zu finden, die dieselben beherrschen, die quantitativen Gesetze von der Erhaltung der Materie und der Energie, sondern auch das große Gesetz der Weltevolution in der Tendenz, die die qualitative Charakteristik der physikalischen Erscheinungen bestimmt, zu entdecken. Diese Weltevolution eröffnet vor uns weite Horizonte. Wir haben ihre verborgene Urquelle aufgedeckt und haben eingesehen, daß die Frage nach dem Ende, zu dem sie führt, mit den ewigen Fragen nach der Endlichkeit oder Unendlichkeit des Raumes, der Zeit und der Materie verbunden ist. Das grandiose und zugleich kristallklare Bild der Weltevolution schuf uns die Physik. Sie hat uns mit einer Erkenntnis bereichert, die sich der Tiefe ihres Grundgedankens nach wohl mit wenigen anderen vergleichen läßt, sofern solche überhaupt vorhanden sind!

## 8. Kapitel.

### Struktur und Zerfall des Atoms. Radioaktive Erscheinungen.

**§ 1. Einleitung.** In den Kapiteln drei und fünf hatten wir die Atome und Elektronen kennengelernt und hatten gesehen, wie aus den Atomen sich Moleküle aufbauen. Die Wissenschaft, welche uns Kunde über den inneren Aufbau des Stoffes gab, hat es nicht dabei bewenden lassen. Vor einer verhältnismäßig kurzen Zeit hat sie einen weiteren großen Schritt nach vorwärts getan. Sie ist noch tiefer in die Struktur der Materie gedrungen und hat vor uns das Geheimnis des Atomaufbaues aufgedeckt. Diese neue Bereicherung unserer Kenntnisse entstand auf dem Boden der Erforschung von radioaktiven Erscheinungen, die am Ende des vorigen Jahrhunderts (1898) entdeckt worden sind. Die Lehre von der Struktur und dem Zerfall des Atoms dagegen gehört vollkommen dem laufenden, 20. Jahrhundert an. Dabei sind die wichtigsten Teile dieser Lehre erst nach 1910 entstanden, während der Gedanke vom Zerfall des Atoms bereits 1903 ausgesprochen wurde.

Wir haben gesehen, daß Dalton im Jahre 1810 (S. 46) die Atomlehre der Chemie zugrunde gelegt hat. Fast 100 Jahre mußten vergehen, ehe die Wissenschaft den nächsten Schritt tun konnte und von der Frage nach dem Aufbau des Moleküls zu der Frage nach der Struktur des Atoms überging.

**§ 2. Atomzahlen. Ionisation der Gase. Positive Elektrizität.** Bevor wir auf die Betrachtung jener neuen Vertiefung unserer Kenntnisse, von der dieses Kapitel handelt, übergehen, muß einiges über die Atomzahlen (Ordnungs-), die Ionisation der Gase und die positive Elektrizität gesagt werden.

1. Die Atom- oder Ordnungszahlen. Es ist ihrer bereits auf S. 51 Erwähnung getan worden. Wir wollen uns erinnern,

daß man alle Elemente nach anwachsenden Atomgewichten in eine Reihe ordnen kann (S. 51). Dabei kann man sie in dieser Reihe einfach mit laufenden Nummern versehen. Die Nummer des Elementes wird eben als seine Atom- oder Ordnungszahl bezeichnet. Sie laufen von 1 (Wasserstoff) bis 92 (Uran).

In folgender Tabelle sind die Atomzahlen  $N$  und die Atomgewichte  $A$  einiger Elemente angeführt.

	N	A		N	A
Wasserstoff . . . . .	1	1	Kupfer . . . . .	29	63,7
Helium . . . . .	2	4	Zink . . . . .	30	65,4
Lithium . . . . .	3	7	Brom . . . . .	35	79,9
Beryllium . . . . .	4	9,1	Silber . . . . .	47	107,9
Bor . . . . .	5	11	Zinn . . . . .	50	118,7
Kohlenstoff . . . . .	6	12	Jod . . . . .	53	126,9
Stickstoff . . . . .	7	14	Platin . . . . .	78	195,2
Sauerstoff . . . . .	8	16	Gold . . . . .	79	197,2
Natrium . . . . .	11	23	Quecksilber . . . . .	80	200,6
Aluminium . . . . .	13	27,1	Blei . . . . .	82	207,2
Phosphor . . . . .	15	31	Radium . . . . .	88	226,2
Schwefel . . . . .	16	32,1	Thorium . . . . .	90	232,4
Chlor . . . . .	17	35,5	Uran . . . . .	92	238,2
Eisen . . . . .	26	55,8			

In dieser Tabelle sind fast ausschließlich solche Elemente eingetragen worden, die mehr oder weniger allgemein bekannt sind. In der Folge werden Helium, Radium, Thorium und Uran von besonderer Wichtigkeit sein. Das Helium (Ordnungszahl 2) ist ein Gas, welches in verschiedenen Mineralien enthalten ist und aus diesen durch Glühen gewonnen wird. Es ist auch in der Luft vorhanden, jedoch in sehr geringer Menge. Ferner unterliegt es keinem Zweifel, daß es auch einen Bestandteil der Sonne bildet. Es geht mit keinen anderen Elementen chemische Verbindungen ein. Wir werden sehen, welche eine Ausnahmestelle dieses Gas in radioaktiven, oder, was dem Wesen nach dasselbe ist, in den Erscheinungen des Zerfalls von Atomen spielt. Lithium und Beryllium sind Metalle. Bor bildet einen Bestandteil der allgemein bekannten Borsäure. Als Kohlenstoff bezeichnet man das Element, das als Kohle, Graphit und Diamant auftritt. Natrium ist ein Metall, welches in Verbindung mit dem Chlorgas das gewöhnliche

Kochsalz ergibt. Thorium und Uran sind die Metalle mit den größten Atomgewichten; ein Thoriumatom ist 232,4- und ein Uranatom 238,2mal so schwer als ein Wasserstoffatom. Betrachtet man die Tabelle, so merkt man, daß am Anfang derselben (den Wasserstoff ausgenommen) die Atomzahlen ungefähr die Hälfte der Atomgewichte ausmachen und daß beim Ansteigen dieser Zahlen die Abweichungen von dieser einfachen Regel immer größer werden. Das Uran hat als Atomgewicht 238,2, während seine Atomzahl verdoppelt  $92 \times 2 = 184$  ergibt.

2. Die Ionisation der Gase. Gase bei gewöhnlicher Temperatur und gewöhnlichem Druck leiten die Elektrizität nicht. Sie gehören zu den besten Isolatoren, wie man die elektrischen Nichtleiter zu nennen pflegt. Es zeigt sich jedoch, daß unter dem Einfluß von einer Reihe verschiedenartiger Einwirkungen das Gas zum Leiter wird, so daß elektrisierte Körper, die sich in ihm befinden, ihre Ladungen durch das Gas abgeben. Von allen Einwirkungen, die das Gas leitend machen, seien hier nur die Röntgenstrahlen erwähnt. Ein Gas, z. B. Luft, durch welches Röntgenstrahlen gegangen sind, wird zum Leiter der Elektrizität. Das läßt sich auf folgende Art nachweisen.

In ein mit verdünnter Luft gefülltes längliches Glasgefäß (Fig. 31) setzt man zwei Metallplatten *A* und *B*, die an die Pole einer elektrischen Batterie *MN*, z. B. einer Akkumulatoren-

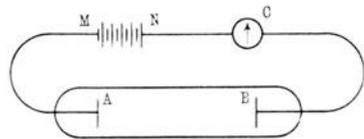


Fig. 31.

batterie, gelegt sind. In die Leitung ist ein Galvanometer *C* eingeschaltet, dessen Magnetnadel unter Einwirkung des elektrischen Stromes, wenn ein solcher durch den geschlossenen Kreis *AMNCBA* und folglich auch durch das Gas zwischen den Platten *A* und *B* fließt, abgelenkt wird. Auf diese Weise zeigt die Bewegung der Magnetnadel im Galvanometer *C*, daß die Luft zwischen *A* und *B* leitend geworden ist. Es erweist sich, daß so oft Röntgenstrahlen durch die Luft gehen, letztere aufhört, ein vollkommener Isolator zu sein, was eben durch das Galvanometer angezeigt wird. Das in Fig. 31 dargestellte Schema ist seiner Einfachheit und Verständlichkeit wegen gewählt worden. In Wirklichkeit benutzt man eine etwas andere Anordnung der Apparate und ersetzt das Galvanometer durch ein anderes Instrument (Elektrometer),

das ebenfalls den Durchgang des elektrischen Stromes durch das Gas anzeigt. Der Unterschied ist für uns unwesentlich; von Wichtigkeit ist es nur, daß ein Apparat vorhanden ist, der stets in Bewegung gerät, wenn das Gas im geschlossenen Gefäß zum Leiter der Elektrizität wird. Es muß noch eine wichtige allgemeine Bemerkung hinzugefügt werden: Wird die Einwirkung auf das Gas, unter deren Einfluß es leitend wurde, eingestellt, so verschwindet nach einiger, zuweilen sehr kurzen Zeit die Leitfähigkeit, und das Gas wird wieder zum Isolator. Je kürzere Zeit die Einwirkung, z. B. mit Röntgenstrahlen, gedauert hat, desto schneller stellt sich allgemein der frühere Zustand wieder her.

Die Frage, was eigentlich mit dem Gase geschieht, wenn es zum Elektrizitätsleiter wird, ist sorgfältig untersucht worden. Es hat sich gezeigt, daß von einigen, doch bei weitem nicht von allen, Gasatomen sich Elektronen lostrennen, kleinste Teilchen der negativen Elektrizität (S. 58). Das Atom, welches ein oder mehrere Elektronen verlor, erscheint als positiv elektrisiert. Auf diese Weise spaltet sozusagen die Einwirkung auf das Gas, z. B. mit Hilfe von Röntgenstrahlen, das Atom in zwei Teile, die man als Ionen bezeichnet. Die negativen Ionen sind nichts anderes als Elektronen, während die positiven Atome oder gar Moleküle darstellen, die ein oder mehrere Elektronen verloren haben. Eine derartige Einwirkung auf das Gas nennt man Ionisation. Wir sagen z. B., daß ein Gas unter Einwirkung von Röntgenstrahlen ionisiert wird. Ein geschlossener Raum, in dem die Ionisation vor sich geht, wird zuweilen als Ionisationskammer bezeichnet. Je stärker die Einwirkung ist, ein desto größerer Prozentsatz von Gasmolekülen wird ionisiert.

Wir haben nur die eine Methode der Gasionisation erwähnt, die mit Hilfe von Röntgenstrahlen durchgeführt wird. Von den vielen anderen Arten sei noch eine, und zwar die Ionisation durch Zusammenstoß, hervorgehoben. Wenn nämlich ein Ion unter Einwirkung von äußeren elektrischen Kräften eine sehr hohe Geschwindigkeit gewinnt, so kann es bei einem Zusammenstoß mit einem Gasmolekül demselben ein Elektron entreißen, d. h. dasselbe in zwei Ionen spalten und so eine Ionisation des Gases hervorrufen, oder diese, falls sie bereits vorhanden war, verstärken. Eine solche Ionisation durch Zusammenstoß können negative

Ionen, d. h. Elektronen bewirken, wenn sie unter Einwirkung von elektrischen Kräften hohe Geschwindigkeiten erlangen.

3. Die positive Elektrizität. Die Existenz einer negativen Elektrizität kann nicht dem geringsten Zweifel unterliegen, und wir wissen bestimmt, daß sie Atomstruktur besitzt, d. h. aus kleinsten Teilchen besteht, die nichts weiter enthalten als eine ganz bestimmte Menge negativer Elektrizität, die ihre Ladung bildet. Diese Teilchen sind die Elektronen. Die Ladung und die Dimensionen der Elektronen sind bereits im 3. Kapitel besprochen worden. Hier hat die Wissenschaft vollkommene Klarheit erlangt und uns ein deutliches, ja in vielen Beziehungen sogar vollendetes Bild gezeichnet. Es ist sehr wesentlich, daß es freie Elektronen gibt, d. h. solche, die nicht an die Materie gebunden sind. Hierher gehören die Elektronen, aus denen die Kathodenstrahlen bestehen und die beim Auftreffen auf die Antikathode Röntgenstrahlen hervorrufen. Ferner Ströme von Elektronen, die sich z. B. im Innern eines Metalldrahtes bewegen und den gewöhnlichen elektrischen Strom bilden, sowie Elektronen, die den Gasatomen durch Ionisation entrissen wurden.

Ganz anders ist es um die Frage nach der positiven Elektrizität bestellt. Es gibt keine einzige Erscheinung, welche die Existenz einer freien positiven Elektrizität, die denselben Gesetzen wie die negative gehorcht, jedoch in entgegengesetzter Richtung wirkt, klar und unmittelbar bewiesen hätte. Die entgegengesetzte Richtung ist so aufzufassen, daß die positive Elektrizität das anzieht, was die negative abstößt, und umgekehrt.

Die Existenz einer positiven Elektrizität glattweg zu verneinen ist unmöglich, denn ein neutrales nichtionisiertes Atom weist keine elektrischen Kräfte auf, obwohl es zweifellos mindestens ein Elektron enthält, und zwar dasjenige, welches ihm durch Ionisation entrissen wird. Die von diesem Elektron ausgehenden elektrischen Kräfte können nur durch etwas aufgehoben werden, das in entgegengesetzter Richtung wirkt, und dieses „etwas“ nennen wir positive Elektrizität. Wir sind also gezwungen anzunehmen, daß im Atom außer den Elektronen noch eine gewisse Menge positiver Elektrizität vorhanden ist. Als Elementarquantum der positiven Elektrizität wollen wir eine solche Elektrizitätsmenge bezeichnen, die mit derselben

Kraft wie ein Elektron wirkt, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Es wäre nicht angängig, dieses Elementarquantum als „positives Elektron“ zu bezeichnen, denn mit dem Begriff des Elektrons ist die Vorstellung von einer freien Existenz verbunden. Dagegen kann man sagen, daß das Elektron ein Elementarquantum der negativen Elektrizität enthält. Es ist klar, daß wenn im Bestande eines (neutralen) Atoms eine gewisse Anzahl, z. B. fünf Elektronen vorhanden sind, in ihm eine gleiche Anzahl, d. h. fünf Elementarquanta der positiven Elektrizität enthalten sein müssen.

**§ 3. Die Struktur des Atoms.** Im Laufe des ganzen 19. Jahrhunderts hat man die Atome der verschiedenen Elemente als kleinste Körnchen des Stoffes betrachtet, den der Name des betreffenden Elementes bestimmt. Der Einfachheit halber stellte man diese Körnchen zuweilen als winzige Kugeln dar. Der Unterschied zwischen den Atomen der Elemente schien tief zu sein, denn er bezog sich auf ihr Wesen selbst. Die Atome des Sauerstoffs, des Phosphors, des Eisens, des Schwefels usw. unterschieden sich in erster Linie dadurch, daß sie eben Körnchen des Sauerstoffs, des Phosphors, des Eisens, des Schwefels usw. darstellten. Ihre ungleichen Dimensionen und Massen kamen erst in zweiter Linie. Der Hauptunterschied bezog sich jedoch auf den Stoff, aus dem sie bestehen. Der Gedanke, daß es möglich sein könnte, ein Element in ein anderes zu verwandeln, eine Idee, die einst die Alchimisten hegten, erschien als zweifellos unausführbar, eben, weil die Atome der verschiedenen Elemente dem Wesen und dem Stoff nach verschieden sind. Die Atome der verschiedenen Stoffe hatten miteinander nichts Gemeinsames und von der Verwandlung eines Atoms eines Stoffes in ein solches eines anderen konnte keine Rede sein. Ferner wurde jeder Gedanke an irgendwelche Veränderungen, die in den Atomen vor sich gehen könnten, um so mehr an einen Zerfall in irgendwelche Bestandteile verworfen. Die Atome galten als unteilbar, wie das ja auch ihr dem Griechischen entnommener Name besagt. In allen möglichen physikalischen, besonders aber in chemischen Erscheinungen wechseln die Atome lediglich ihren Platz. Es treten Veränderungen in ihrer Gruppierung auf, aber jedes Atom bleibt ewig das unveränderte kleinste Körnchen eines der vielen einfachen Stoffe, d. h. Elemente.

Dieses Bild, das, wie gesagt, das vergangene Jahrhundert beherrschte, wurde einer tiefgehenden Änderung unterworfen, als die Elektronenlehre entstand und in alle Gebiete der Physik eindrang. Es konnte anfangs scheinen, daß das eine das andere nicht ausschließt, daß die Atome „der gewöhnlichen Materie“, wie man sich häufig ausdrückte, und die Elektronen beide für sich existieren. Eine gründliche und allseitige Erforschung der Erscheinungen, die beim Durchgang des elektrischen Stromes in Gasen auftreten, führte zur Lehre von der Gasionisation, die wir im vorhergehenden Paragraphen kurz betrachtet haben. Es konnte nicht mehr bezweifelt werden, daß die negativen Ionen, d. h. die Elektronen, ein Produkt des Atomzerfalls sind, daß die Elektronen dem Atom unter Einwirkung von elektrischen Kräften, die eine ausreichende Spannung besitzen, entrissen werden. Solche Kräfte entstehen z. B. bei Zusammenstößen von Atomen mit Elektronen, deren Geschwindigkeit groß genug ist. Offenbar muß ein neutrales, d. h. nichtionisiertes Atom so viel Elementarquanten der positiven Elektrizität enthalten, wieviel Elektronen es besitzt. Die Entdeckung und Erforschung der radioaktiven Erscheinungen hat neue Fälle von tiefgreifenden Veränderungen gewiesen, die im Bestande eines Atoms auftreten können. Davon soll in § 6 die Rede sein. Alle diese sowie auch andere Entdeckungen, auf die wir nicht näher eingehen, haben viele Forscher veranlaßt, Versuche zu unternehmen, um ein „Atommodell“ darzustellen, d. h. die Atomstruktur so zu beschreiben, daß sie alle von dieser Struktur sowie von den Veränderungen derselben abhängenden Erscheinungen erklären könnte. Wir halten uns bei den Versuchen, die heute nur noch historischen Wert besitzen, nicht auf, sondern gehen zu dem Atommodell über, welches der englische Forscher Rutherford (geb. 1871) 1911 gegeben hat. Rutherford ging von Erscheinungen aus, die man beobachtet, wenn Elektronen oder positiv elektrisierte  $\alpha$ -Teilchen, die in § 6 erwähnt werden sollen, durch dünne Schichten von verschiedenen Stoffen, insbesondere von Metallen gehen. Der dänische Forscher Bohr hat im Jahre 1913 das Modell von Rutherford weiter entwickelt und gezeigt, unter welchen Bedingungen das Atom Strahlungsenergie aussendet und wodurch die Schwingungszahl der von ihm ausgesandten Strahlen bestimmt wird. Es zeigte

sich, daß die Voraussagungen der Bohrschen Theorie mit den Resultaten der experimentellen Erforschung der Strahlungsenergie, die von verschiedenen Stoffen ausgesandt wird, bis in die kleinsten Einzelheiten übereinstimmen. Weitere experimentelle und theoretische Forschungen seitens vieler Forscher haben gezeigt, daß das Modell von Rutherford und Bohr zweifellos der Wirklichkeit entspricht und daß das Geheimnis der Atomstruktur in ihren Grundzügen als gelöst betrachtet werden kann. Wir wollen nun die Bohrsche Theorie zuerst in derjenigen Form darstellen, in welcher sie in den ersten Arbeiten dieses Forschers enthalten ist. In ihren Grundzügen sollte die Atomstruktur folgendermaßen beschaffen sein:

1. Das Atom besitzt im Mittelpunkt einen Kern, der positive Elektrizität enthält und um den, wie die Planeten um die Sonne, Elektronen kreisen.

2. Die Anzahl der Elektronen ist gleich der Atom- oder Ordnungszahl (S. 231) des entsprechenden Elementes.

3. Der Kern enthält mindestens so viel Elementarquanten der positiven Elektrizität, wieviel Elektronen ihn umkreisen. Also ist die Zahl dieser Elementarquanten gleich der Atomzahl des entsprechenden Elementes.

Die Elektronen bewegen sich auf konzentrischen Kreisen, in deren Mittelpunkt sich der Kern des Atoms befindet. Auf ein und demselben Kreise oder, wie man sagt, auf einer Kreisbahn können sich gleichzeitig mehrere Elektronen bewegen. Die Elektronen befinden sich auf dieser Bahn in gleichen Entfernungen voneinander und sie bilden den sogenannten „Elektronenring“. Je näher zum Kern, desto rascher kreist der Ring. Außer den Elektronen, die zu den Ringen gehören, kann es auch einzelne Elektronen geben, deren jedes sich auf seiner Bahn bewegt. Diese Bahnen umfassen die Elektronenringe, d. h. sind weiter vom Kern entfernt als die Ringe. Wir haben gesehen (S. 59), daß die Masse des Elektrons sehr gering ist; sie ist etwa 1840mal kleiner als die Masse eines Wasserstoffatoms. Damit erhält man folgendes Resultat:

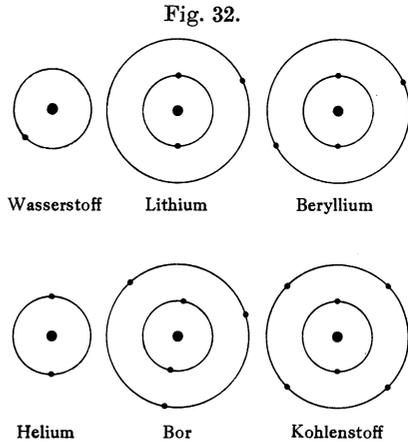
4. Fast die ganze Masse des Atoms ist in seinem Kern konzentriert. Vorläufig können wir noch nicht erklären, wie im Kern die Masse entsteht, deren Definition auf S. 237 gegeben wurde.

Bezüglich des Kerns läßt sich noch folgendes sagen:

5. Die Dimensionen des Kerns sind in einigen Elementen kleiner, in anderen nur wenig größer als die des Elektrons.

6. Bei Elementen, deren Ordnungszahl nicht sehr klein ist, enthält der Kern im Innern eine gewisse Anzahl von Elektronen und, diesen entsprechend, eine größere Anzahl von Elementarquanta der positiven Elektrizität.

Betrachten wir die Tabelle auf S. 232 und wenden wir auf die in derselben angeführten Elemente den zweiten und den dritten Punkt an. Die Anzahl der Elektronen im Atom ist gleich der Ordnungszahl  $N$  in der ersten Rubrik. Es folgt daraus, daß ein Wasserstoffatom nur ein einziges Elektron enthält, das Heliumatom zwei Elektronen, das Lithiumatom drei, das Boratom fünf, das Kohlenstoffatom sechs, das Natriumatom elf, das Eisenatom 26, das Silberatom 47, das Goldatom 79 und schließlich das Uranatom 92 Elektronen. Dieselben Zahlen geben auch die Elementarquanta der positiven Elektrizität an, die jedenfalls in den Kernen der genannten Elemente enthalten sind. Auf Grund des sechsten Punktes kann man die Annahme machen, daß bei den meisten Elementen der Kern in seinem



Innern Elektronen enthält und dementsprechend eine größere positive Ladung besitzt. Für die Atome von einigen Elementen läßt sich die Verteilung der Elektronen auf verschiedenen Bahnen mit Genauigkeit angeben. In Fig. 32 ist die Atomstruktur der ersten sechs Elemente dargestellt. Im Mittelpunkt befindet sich der Kern, der durch einen Punkt kenntlich gemacht ist. Wir erinnern daran, daß unsere Darstellung, also auch die Fig. 32, der Bohr'schen Theorie in ihrer anfänglichen Form entspricht.

Das Wasserstoffatom besteht aus einem Kern mit einem Elementarquantum der positiven Elektrizität; um den Kern kreist ein Elektron. Im Heliumatom enthält der Kern zwei Elementarquanta; um den Kern kreisen auf einer gemeinsamen Kreisbahn zwei Elektronen, die sich diametral gegenüber liegen.

Die Atomkerne des Lithiums, Berylliums, des Bors und des Kohlenstoffs enthalten entsprechend drei, vier, fünf und sechs Elementarquanta der positiven Elektrizität, und ebensoviel Elektronen umkreisen diese Kerne. In allen vier Atomen kreisen zwei Elektronen wie im Heliumatom auf einem dem Kern am nächsten gelegenen Kreise, auf der äußeren Bahn dagegen bewegen sich im Lithiumatom ein, im Beryllium zwei, im Bor drei und im Kohlenstoff vier Elektronen. Über die Verteilung der Elektronen in den Atomen der übrigen Elemente auf verschiedene Bahnen läßt sich nichts Bestimmtes sagen. Eine Ausnahme bildet das Natriumatom, um dessen Kern sich, wie man aus der Tabelle auf S. 232 ersehen kann, elf Elektronen bewegen. Es ist sehr wahrscheinlich, daß sie auf drei Bahnen verteilt sind, und es unterliegt keinem Zweifel, daß auf der äußeren Bahn nur ein einziges Elektron kreist. Auf der inneren, dem Kern zunächst gelegenen Bahn bewegen sich zwei oder drei Elektronen, auf der mittleren also entsprechend acht oder sieben.

Es ist noch nichts über den Radius der Bahnen, auf denen sich die Elektronen bewegen, gesagt worden. Diese Frage ist in den unsterblichen Arbeiten von Bohr im Jahre 1913 in den einfachsten Fällen vollständig gelöst worden. Es ist uns nicht möglich, die Grundlagen, von denen die Bohrsche Theorie ausgeht, näher zu betrachten, und wir müssen uns mit der Darlegung nur eines Resultates begnügen, das wir auf ein Wasserstoffatom, um dessen Kern ein Elektron kreist, anwenden wollen. Die Bohrsche Theorie hat gezeigt, daß dieses Elektron sich nur auf irgend einer von einer Reihe ganz bestimmter Bahnen, die wir als mögliche Bahnen bezeichnen wollen, bewegen kann. Die Radien dieser Bahnen verhalten sich untereinander wie die Quadrate von ganzen Zahlen, d. h. wie eins zu vier, zu neun, zu 16 usw. Der Radius der ersten, dem Kern zunächst gelegenen Bahn hat eine Länge, die ungefähr ein Zwanzigmillionstel Millimeter (genauer 0,56 Zehnmillionstel) beträgt. Der Radius der zweiten möglichen Bahn ist viermal, der der dritten neun-

mal größer usw. Der Radius der zehnten möglichen Bahn ist bereits 100mal so groß und beträgt ungefähr ein Zweihunderttausendstel Millimeter. Alle übrigen Bahnen, deren Radien Zwischenwerte besitzen, sind nicht möglich; auf ihnen kann kein Elektron kreisen.

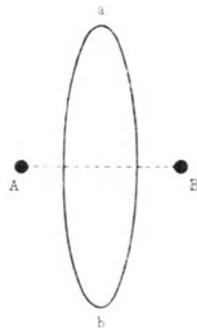
Die Theorie gibt nicht nur die Radien der möglichen Bahnen an, sondern auch die sekundliche Umdrehungszahl des Elektrons um den Kern. Es erweist sich, daß ein Elektron auf der dem Kern des Wasserstoffatoms zunächst gelegenen Bahn in einer Sekunde  $6,2 \cdot 10^{15}$ , d. h. 6200 Billionen (Millionen Millionen) Umdrehungen ausführt. Bewegt es sich auf der zweiten Bahn, deren Radius viermal so groß ist als der der ersten, so ist die Zahl der Umdrehungen pro Sekunde  $2 \times 2 \times 2 = 8$ mal kleiner als auf der ersten Bahn. Auf der dritten ist sie schon  $3 \times 3 \times 3 = 27$ mal, auf der zehnten  $10 \times 10 \times 10 = 1000$ mal kleiner als auf der ersten.

Um den Kern eines Heliumatoms kreisen zwei Elektronen (Fig. 32). Der Radius ihrer Bahn beträgt 0,57 des Halbmessers der ersten Bahn im Wasserstoffatom (s. oben) und die Umdrehungszahl pro Sekunde ist dreimal so groß als die des Elektrons auf dieser Bahn, beträgt also  $18,6 \cdot 10^{15}$ .

Es ist bis jetzt nur von Atomen die Rede gewesen.

Die Struktur eines Wasserstoffmoleküls, das aus zwei miteinander verbundenen Wasserstoffatomen (S. 50) besteht, ist von Bohr in folgender Form aufgebaut worden. Ein solches Molekül muß offenbar zwei Kerne mit je einem Elementarquantum der positiven Elektrizität und zwei Elektronen enthalten. Die zwei Kerne *A* und *B* (Fig. 33) befinden sich voneinander auf einer Entfernung, die ein Sechzehnmillionstel Millimeter beträgt. Die beiden Elektronen bewegen sich auf einer Kreisbahn in einer Ebene senkrecht zur Geraden *AB*. Das Zentrum des Kreises befindet sich gerade in der Mitte zwischen *A* und *B* und sein Durchmesser ist etwas größer als ein Zehnmillionstel Millimeter. Die Elektronen befinden sich stets an den Enden des Bahndurchmessers. Sie führen in der Sekunde etwas mehr (um 10 Proz. mehr) Umdrehungen aus, als das Elektron in einem einzelnen Wasserstoffatom.

Fig. 33.



Das bisher Dargelegte entspricht, wie gesagt, der ursprünglichen Bohrschen Theorie. Wir wollen nun angeben, welche Veränderungen diese Theorie allmählich durchgemacht hat. Bereits 1916 zeigte A. Sommerfeld, daß die Elektronen sich hauptsächlich nicht auf kreisförmigen, sondern auf elliptischen Bahnen bewegen, wie es ja auch bei der Bewegung der Planeten um die Sonne der Fall ist. Doch sind auch kreisförmige Bahnen als Spezialfälle möglich. Jedes Elektron hat seine eigene Bahn und es können sich niemals zwei oder noch mehr Elektronen auf einer und derselben Bahn bewegen. Die Idee der Elektronenringe mußte aufgegeben werden. Sämtliche Elektronenbahnen sind in Gruppen geordnet, die als Schalen bezeichnet werden. Die Bahnebenen der Elektronen können die verschiedensten Richtungen im Raume besitzen. In der dem Kern zunächst gelegenen Schale kreisen nur zwei Elektronen, in der zweiten acht. In der dritten kann die Zahl der Elektronen bei schweren Atomen bis auf 18, in der vierten sogar bis auf 32 steigen. Auch die oben beschriebene Struktur des Wasserstoffmoleküls kann, wie man sich überzeugt hat, nicht genau der Wirklichkeit entsprechen. Der wirklich wesentliche Inhalt der Bohrschen Theorie ist aber durch diese Änderungen unberührt geblieben.

**§ 4. Die Ionisation der Gase. Die Emission der Strahlungsenergie.** Im zweiten Paragraphen haben wir die Erscheinung der Gasionisation kennengelernt, die darin besteht, daß die Atome des betreffenden Gases in zwei Teile gespaltet werden, von denen der eine sich als ein Elektron, der andere aber als ein positiv elektrisiertes Restatom erweist. Die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Atomstruktur gibt eine einfache und vollkommen übersichtliche Erklärung der Ionisation. Wir haben gesehen, daß in einem neutralen Atom die positive Ladung des Kerns gleich der Summe der negativen Ladungen aller Elektronen ist, die um den Kern kreisen, so daß die vom Kern und den Elektronen ausgehenden elektrischen Kräfte sich gerade im Gleichgewicht befinden und das ganze Atom in Punkten, die ihm nicht zu nahe liegen, keinerlei elektrische Wirkung ausübt. Unter Einwirkung von ausreichend intensiven elektrischen Kräften kann es geschehen,

daß ein oder auch mehrere Elektronen dem Atom entrissen werden. Es ist klar, daß das übrigbleibende Restatom als positiv elektrisiert erscheint, denn der positive Kern überwiegt nun die negativen Elektronen. Stellen die Kräfte, welche die Ionisation bewirkten, ihre Tätigkeit ein, so verschwindet die Ionisation ziemlich rasch, denn die Elektronen begegnen den positiven Ionen, vereinigen sich wieder mit ihnen und bilden neutrale Atome. Die Theorie von Bohr gibt die Möglichkeit, in einigen Fällen die Einzelheiten der Struktur eines ionisierten Atoms festzustellen.

Wir wollen zwei Beispiele betrachten. Entreißt man einem Heliumatom das eine der beiden Elektronen, so bleibt ein Kern übrig, um den nur noch ein Elektron kreist, d. h. ein Etwas, das sich von einem Wasserstoffatom dadurch unterscheidet, daß die Ladung seines Kerns zweimal so groß ist als die des Wasserstoffatoms. Die dem Kern zunächst gelegene mögliche Bahn dieses Elektrons hat einen Radius, der nur die Hälfte des Radius der ersten Bahn im Wasserstoffatom beträgt, die Umdrehungszahl pro Sekunde ist dagegen viermal so groß als die im Wasserstoffatom. Die gleiche Struktur hat ein Lithiumatom, dem man zwei Elektronen entreißt, in diesem Falle jedoch ist im Vergleich zum Wasserstoffatom der Radius der ersten Bahn dreimal kleiner und die Umdrehungszahl neunmal größer.

Die Ausführungen des vorhergehenden Paragraphen könnten den Eindruck einer phantastischen Hypothese hervorrufen, die auf keiner festen Grundlage ruht. In Wirklichkeit gibt es jedoch wenig Hypothesen, die so fest und so überzeugend begründet wären, wie die von Rutherford in ihrer von Bohr gegebenen Form. Es unterliegt keinem Zweifel, daß das „Atommodell“, wie es uns auf Grund der Bohrschen Theorie erscheint, in den wesentlichsten Zügen der Wirklichkeit entspricht, obwohl verschiedene Einzelheiten einer weiteren Ausarbeitung unterworfen werden müssen. So ist z. B. die Frage nach der Struktur des Atomkerns noch nicht berührt worden. Schon jetzt aber gibt uns die Beschreibung der Atomstruktur die Möglichkeit, nicht nur eine Reihe von verschiedenartigen Erscheinungen, die vor der Bohrschen Theorie sich wissenschaftlich befriedigend nicht deuten ließen, zu erklären, sondern auch eine klare Rechenschaft über die quantitative Seite dieser Erscheinungen abzulegen und, was die Hauptsache ist,

neue Erscheinungen vorherzusagen, die sich bei der experimentellen Nachprüfung in der Tat als richtig erwiesen haben. Es ist nicht notwendig, alle hierher gehörenden Fragen zu berühren, da dieses Buch kein Lehrbuch sein soll, sondern den Lesern nur die Resultate vorführen will, zu denen die Physik gelangt ist und die zu einer erstaunlichen Entwicklung unserer Kenntnisse geführt haben.

Auf das hauptsächlichste, erstaunlichste Ergebnis müssen wir jedoch näher eingehen. Es bezieht sich auf die Emission der Strahlungsenergie durch leuchtende Gase.

Wenn man z. B. mit Hilfe eines Prismas (S. 137) das von leuchtenden Gasen ausgehende Licht zerlegt, so erhält man ein Spektrum, das nicht aus einem kontinuierlichen Streifen besteht, sondern auf dem gemeinsamen dunklen Hintergrund eine Reihe von einzelnen hellen Linien zeigt. Diese Linien sind im Spektrum natürlich quer gelegen, wobei jede einzelne diejenige Farbe aufweist, die dem Platze, den die Linie im Spektrum einnimmt, entspricht. Das zeigt, daß die leuchtenden Gase nicht etwa Strahlen von verschiedenen Wellenlängen aussenden, sondern nur einzelne, für das betreffende Gas charakteristische Strahlen von ganz bestimmter Wellenlänge. So ergibt z. B. leuchtender Wasserstoff ein Spektrum, das in seinem sichtbaren Teil aus fünf hellen Linien besteht: einer roten, einer grünen, einer blauen und zwei violetten. Außerdem besitzt es im ultravioletten Teil (S. 150) eine Unmenge von Linien. Kupferdämpfe liefern ein Spektrum, das aus einer großen Anzahl von Linien besteht, unter denen zwei gelbe, zwei orangefarbene und drei grüne besonders stark hervortreten. Viele Elemente haben Spektren, die aus einer ungeheuren Zahl von Linien bestehen. So enthält z. B. das Spektrum der Eisendämpfe etwa 5000 Linien. Es ist schon längst bemerkt worden, daß die Verteilung der Linien einer besonderen Gesetzmäßigkeit unterworfen ist, die infolge ihrer Kompliziertheit nur schwer ergründet werden konnte. Es ist außerdem erwiesen worden, daß manche Spektrallinien komplizierten Aufbau besitzen. Obwohl diese Linien als einzelne dünne Striche erscheinen, bestehen sie doch in Wirklichkeit aus mehreren einzelnen Linien, die einander außerordentlich nahe liegen, so daß sie durch gewöhnliche Methoden, z. B. durch ein Prisma, nicht getrennt werden

können. Gewöhnlich ist eine von ihnen, die Hauptlinie, sehr grell, während die übrigen verhältnismäßig viel schwächer sind. In diesem Falle sagt man, daß die Spektrallinie Trabanten oder Satelliten besitzt. Die Anzahl der Trabanten erreicht zuweilen zehn, doch gibt es auch nicht wenig Spektrallinien, die überhaupt keine Trabanten haben.

Vor dem Erscheinen der Bohrschen Lehre von der Atomstruktur stellte dies ganze Gebiet der Spektralerscheinungen in allen Beziehungen ein vollkommenes Rätsel dar. Man wußte nicht, wie die Emission der Strahlungsenergie durch die Gasatome vor sich geht. Ungeachtet der Versuche von verschiedenen Forschern gelang es nicht, die komplizierten Gesetzmäßigkeiten in der vorhin erwähnten Verteilung der Spektrallinien zu deuten. Als vollständig unerklärlich erschien das Auftreten von Trabanten, d. h. eine gleichzeitige Aussendung von einer Reihe verschiedener Strahlen, deren Schwingungszahlen sich kaum voneinander unterscheiden. Die Bohrsche Lehre hat mit einem Schlage fast alle hierher gehörenden Fragen gelöst. Sie hat die Bedingungen gezeigt, unter denen die Aussendung der Strahlungsenergie erfolgt, und den Ursprung dieser Energie nachgewiesen. Sie hat die Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der Spektrallinien bis in die kleinsten Einzelheiten erklärt. Sie hat die Ursache des Auftretens von Trabanten gefunden. Endlich vermochte sie neue Tatsachen vorherzusagen, die bei einer experimentellen Nachprüfung sich als der Wirklichkeit entsprechend erwiesen. Wir müssen uns mit einer kurzen Andeutung der ersten Frage begnügen: Unter welchen Bedingungen erfolgt eine Aussendung von Strahlungsenergie und wo kommt die Energie her?

Der Einfachheit halber nehmen wir ein Wasserstoffatom, um dessen Kern sich ein Elektron auf einer der möglichen Bahnen bewegt, deren Halbmesser, wie wir gesehen haben, sich untereinander wie die Zahlen 1, 4, 9, 16, 25 usw. verhalten. Die dem Kern zunächst gelegene Bahn wollen wir als erste, die nächste als zweite usw. bezeichnen. Der positive Kern und das negative Elektron ziehen sich gegenseitig an und besitzen folglich als Ganzes einen gewissen Vorrat an potentieller Energie (S. 69). Dieselbe nimmt ab, wenn das Elektron sich dem Kern nähert, d. h. von einer der möglichen Bahnen auf eine andere, dem Kern nähere,

überspringt. Bei diesem Sprung nimmt aber die kinetische Bewegungsenergie des Elektrons zu, denn die Bewegungsgeschwindigkeit des Elektrons ist um so größer, je näher es dem Kern ist. Eine genaue Berechnung zeigt jedoch, daß die Abnahme der potentiellen Energie größer ist als die Zunahme der kinetischen, so daß der ganze im Atom enthaltene Energievorrat kleiner wird, wenn ein Elektron von einer der möglichen Bahnen auf eine andere dem Kern näher gelegene überspringt. Diese verlorene Energie geht eben in Strahlungsenergie über. Bohr hat gezeigt, wie die Wellenlänge von Strahlen, die beim Übergang eines Elektrons von einer Bahn auf eine andere entstehen, berechnet werden kann. Wir haben erwähnt daß im sichtbaren Teil des Wasserstoffspektrums fünf helle Linien vorhanden sind. Alle ihnen entsprechenden Wellenlängen erhält man mit einer für physikalische Theorien noch nicht dagewesenen Genauigkeit, wenn man die Berechnung in der Annahme durchführt, daß solche Strahlen dann entstehen, wenn ein Elektron auf die zweite Bahn von der dritten, vierten, fünften, sechsten und siebenten überspringt. Weiterhin aber zeigten sich im ultravioletten Teil des Spektrums noch 24 Linien, die beim Sprung eines Elektrons auf dieselbe zweite Bahn von der achten, neunten usw. bis zur 31. möglichen Bahn entstehen. Im äußersten ultravioletten Teil des Spektrums fand man (1916) drei Wasserstofflinien, die wiederum entstehen, wenn ein Elektron von der zweiten, dritten und vierten möglichen Bahn auf die erste überspringt. Endlich entdeckte man im infraroten Teil des Spektrums zwei Linien, die beim Sprung eines Elektrons von der vierten und fünften der möglichen Bahnen auf die dritte entstehen. Eine gleiche Übereinstimmung der Theorie mit den Beobachtungen trat auch in den Spektra von anderen Stoffen, vor allem des Heliums und Lithiums zutage.

In Elementen von einer hohen Ordnungszahl, die also eine große Anzahl von Elektronen enthalten, hat man eine Reihe von inneren Elektronenschalen (S. 239). Unter dem Einfluß von äußerst intensiven Einwirkungen kann einer solchen Schale ein Elektron entrissen werden. Das erfolgt z. B. beim Auftreffen von sehr rasch bewegten Elektronen auf die Atome eines Stoffes, mit dem die Antikathode (S. 175) einer Röntgenröhre bedeckt ist. Dabei geschieht es,

daß die Elektronen aus diesen Elektronenschalen herausgeschleudert werden, wodurch Röntgenstrahlen hervorgerufen werden. Der junge englische Forscher H. G. S. Moseley (1892 bis 1915), der auf der Halbinsel Gallipoli gefallen ist, hat gezeigt, auf welche Weise die Bohrsche Theorie auf die Röntgenstrahlen angewandt werden muß. Das Auftreten von Trabanten der Spektrallinien hat Sommerfeld (1916) erklärt, indem er die auf S. 242 erwähnten elliptischen Bahnen betrachtete. Auf weitere Einzelheiten können wir nicht eingehen, wir brauchen sie auch nicht. Es genügt, wenn wir wiederholen, daß die Bohrsche Theorie die Entstehung der Strahlungsenergie bis in die kleinsten Einzelheiten erklärt und fast alle Gesetzmäßigkeiten ergründet hat, welchen die Spektre der leuchtenden Gase unterworfen sind.

Auf S. 238 ist es bereits gesagt worden, daß das Entstehen der Strahlungsenergie eine von den Erscheinungen darstellt, welche in der Theorie von Bohr ihre Erklärung finden. Es gibt aber noch eine ganze Reihe von anderen Erscheinungen, deren Auftreten uns auf Grund dieser Theorie verständlich wird. Zu gleicher Zeit sagt aber die Theorie auch die Gesetze voraus, denen diese Erscheinungen gehorchen müssen. Wir werden sehen, daß hierher auch die radioaktiven Erscheinungen gehören.

**§ 5. Die Umwandlung der Elemente. Die Struktur der Materie. Die Durchdringbarkeit der Atome.** Betrachten wir eine Reihe von Schlußfolgerungen, die sich aus dem Vorhergehenden ziehen lassen. Das Atom besitzt einen Kern, der aus positiver Elektrizität besteht und um den Elektronen kreisen. Die Zahl der letzteren kann 92 erreichen. Die Atome der verschiedenen Elemente unterscheiden sich voneinander erstens durch die Zahl dieser Elektronen, die der Ordnungszahl des Elementes gleich ist, und zweitens durch die entsprechende Kernladung. Ein gewisser Unterschied ist auch hinsichtlich der Verteilung der Elektronen nach den einzelnen Schalen möglich. Wir sehen vor allem, daß die beschriebene Atomstruktur der früheren Anschauung von den Atomen der verschiedenen Elemente, wie wir sie am Anfang des § 3 charakterisiert haben, vollkommen widerspricht. Es wurde angenommen, daß diese Atome dem Wesen, dem Material nach, aus dem sie bestehen, verschieden sind, daß die Atome der verschiedenen

Elemente nichts Gemeinsames haben. Daher konnte natürlich von der Umwandlung des Atoms eines Elementes in ein Atom eines anderen keine Rede sein. Die neue Lehre gibt uns ein ganz anderes Bild: Die Atome aller Elemente sind nach einem und demselben Schema aufgebaut und bestehen aus gleichen Urteilchen, nämlich aus Elektronen und aus positiver Elektrizität, die einen Bestandteil des Atomkerns bildet. Der Unterschied zwischen den Elementen beruht nicht auf ihrem Wesen, sondern ist rein quantitativer Natur. Sieben Elektronen und ein Kern aus sieben Elementarquanta der positiven Elektrizität bilden ein Stickstoffatom, während acht Elektronen und acht Elementarquanta ein Sauerstoffatom ergeben. Sechs von jedem bilden ein Kohlenstoffatom. Beträgt aber die Zahl derselben 29, so haben wir ein Kupferatom vor uns, und bei 30 entsteht ein Zinkatom. Außer diesem rein quantitativen Unterschied kann ein solcher nur in der Verschiedenheit der Rahmen und in der Verteilung der Elektronen nach den einzelnen Schalen auftreten. Die Umwandlung eines Elementes in ein anderes erscheint nicht mehr als unmöglich. Würde man ein Mittel finden, einem Atom ein oder mehrere Elektronen sowie dem Kern ebensoviel Elementarquanta der positiven Elektrizität zu entreißen, so würde sich ein Element in ein anderes verwandeln. Eine Umgruppierung der Elektronen, sofern eine solche notwendig ist, würde dabei zweifellos von selbst erfolgen. Könnte man einem Quecksilberatom (80 Elektronen) ein Elektron und dem Kern ein Elementarquantum entreißen, so würde es sich in ein Goldatom (79 Elektronen) verwandeln. Und würde man ein Bleiatom (82 Elektronen) um drei Elektronen und den Kern um drei Elementarquanta Elektrizität berauben, so würde sich auch Blei in Gold wandeln.

Die Umwandlung eines Elementes in ein anderes könnte auch dadurch erfolgen, daß dem Atom neue Elektronen und dem Kern neue Elementarquanta der positiven Elektrizität bei einer entsprechenden Umgruppierung der Elektronen einverleibt werden. Weiter unten werden wir Fälle kennenlernen, in denen sich tatsächlich ein Element in ein anderes verwandelt. Übrigens muß in Betracht gezogen werden, daß in den Kernen der verschiedenen Elemente eine ungleiche Zahl von Zusatzelektronen und eine ihnen

entsprechende Menge positiver Elektrizität enthalten sein kann. Dieser Umstand macht die Frage nach der Umwandlung eines Elementes in ein anderes verwickelter.

Ein anderer Gedanke, zu dem die von Rutherford und Bohr aufgestellte Lehre über den Bau des Atoms führt, besteht in folgendem:

Diese Lehre verneint vollkommen die Existenz irgendwelcher Materien, die eine selbständige Grundlage alles dessen, was uns umgibt, bilden könnten. Solcher Grundlagen gibt es nur zwei: negative Elektronen und positive Elektrizität. Aus ihnen bestehen die Atome der sogenannten Materie. Alles was uns umgibt, alle Körper, die ganze unserer Beobachtung zugängliche Welt — alles besteht aus Elektrizität. Das ist das überraschende Resultat, zu dem wir gelangen! Es ist nicht leicht, sich an diesen Gedanken zu gewöhnen, doch viel schwerer, ja sogar unmöglich wäre es, sich heute von der Bohrschen Lehre loszusagen. Sollte denn überhaupt eine Rückkehr zur alten Vorstellung von der Materie erwünscht sein? Daß eine komplizierte Vorstellung durch eine viel einfachere ersetzt worden ist, entspricht doch unzweifelhaft unseren Wünschen und den Erwartungen, die wir auf die Wissenschaft und auf die Vertiefung unserer Kenntnisse setzen. 92 dem Wesen nach ganz verschiedene Stoffe (rechnet man die radioaktiven Elemente mit, so sind es ihrer etwa 136) ist etwas sehr Kompliziertes. Ihre Ersetzung durch nur zwei Stoffe ist ein großer Schritt auf dem Wege zur Vereinfachung unserer Weltauffassung, ein grandioser Sieg der Wissenschaft und des menschlichen Geistes. Übrigens darf nicht vergessen werden, daß damit doch nicht alles erschöpft ist, was zur vollständigen Weltauffassung erforderlich ist. Außer den zwei Elektrizitäten, aus denen die Atome bestehen, muß noch etwas vorhanden sein, was für uns vorläufig noch in Dunkel gehüllt ist: Die elektromagnetische Strahlungsenergie, die auf S. 181 erwähnt worden ist und die auf eine uns unverständliche Art entsteht, wenn ein Elektron von einer der möglichen Bahnen auf eine andere, dem Kern nähere, überspringt, wobei das Atom einen Teil seines Energievorrats verliert. Möglich, daß hier die Frage nach der inneren Struktur des Raumes die Hauptrolle spielt und daß das Geheimnis der Strahlungsenergie

gelüftet sein wird, wenn die Wissenschaft der Lösung dieser Frage näher kommt.

In zwei anderen Richtungen unterscheidet sich noch die neue Vorstellung vom Atom von der früheren. Sprach die alte Theorie von den Dimensionen des Atoms, die auf verschiedenen Wegen festgestellt werden konnten, so nahm sie an, daß das ganze Volumen des Atoms vom entsprechenden Stoff ausgefüllt ist und etwas zweifellos Undurchdringliches darstellt. Ganz anders erscheint uns das Atom in der Theorie von Rutherford und Bohr. Der Kern und die ihn umkreisenden Elektronen nehmen einen ebenso winzigen Teil des Atomvolumens ein, wie die Sonne und die Planeten einen verschwindenden Teil der gewaltigen Kugel beanspruchen, die unser Sonnensystem umfaßt. Etwas Analoges läßt sich auch von der Durchdringbarkeit des Atoms sagen. Denken wir uns, daß sich unserem Sonnensystem von irgendwo ein Körper nähern würde, dessen Dimensionen etwa den mittleren Dimensionen unserer Planeten gleichkämen. Um die Analogie auch im weiteren vollständig zu gestalten, wollen wir annehmen, daß dieser Körper von den Planeten abgestoßen, von der Sonne dagegen angezogen wird. Denken wir uns zuerst, daß der Körper sich langsam bewegt. In diesem Falle ist das Sonnensystem für ihn undurchdringlich. In der Tat, führt ihn sein Weg weit von der Sonne, so wird er von den ihm zunächst gelegenen Planeten abgestoßen, ist er aber der Sonne nahe, so wird ihn diese zwingen, seine Bewegungsrichtung zu ändern, die Sonne zu umgehen, wie das die Kometen tun, und in der Richtung, aus der er kam, zurückzukehren. Es kann sogar vorkommen, daß die Sonne ihn anzieht und verschlingt; der Körper kann durch das Sonnensystem nicht hindurchgehen. Denken wir uns jetzt, daß die Geschwindigkeit dieses Körpers größer wird. Bei einer gewissen Geschwindigkeit wird er schon einige Aussicht haben, zwischen den äußersten Planeten durchzukommen, die sehr weit voneinander entfernt sind, so daß ein gewisser Teil des Sonnensystems für den Körper durchdringbar geworden sein wird. Dieser Teil vergrößert sich mit der Zunahme der Geschwindigkeit des Körpers und bald tritt die Wahrscheinlichkeit ein, daß er nicht nur zwischen den äußersten Planeten, sondern auch zwischen den mittleren durchkommt. Bei einer sehr hohen Geschwindigkeit

wird der Körper wohl auch nahe bei der Sonne durch das System gehen können. Weder die Planeten, noch die Sonne selbst werden Zeit haben, ihn abzustoßen oder anzuziehen. Wächst die Geschwindigkeit noch weiter, so wird fast das ganze Sonnensystem für den Körper mehr oder weniger durchdringbar sein und nur der Kern des Systems, d. h. die Sonne selbst, bleibt undurchdringbar.

Ersetzen wir die Sonne durch den Atomkern, die Planeten durch die Elektronen und den fremden Körper durch ein Elektron, das sich von außen her nähert. Denken wir uns weiter, daß wir nicht ein Atom und ein fremdes Elektron haben, sondern eine ungeheuere Anzahl von Atomen, die z. B. eine Schicht irgend eines Stoffes bilden, und eine ungeheure Zahl von Elektronen, deren Strom auf diesen Stoff zu gerichtet ist. Bewegt sich der Elektronenstrom langsam, so ist unsere Schicht für ihn nur sehr wenig durchdringbar. Wenigen Elektronen wird es gelingen, in die Schicht, und auch nur auf eine geringe Tiefe, zu dringen. Je größer aber die Geschwindigkeit des Stromes ist, desto größer sind die Aussichten, daß die Elektronen durch eine Reihe von Atomen gehen, und desto größer wird die Zahl derer sein, denen es gelingt, auf eine gewisse Tiefe in die Schicht zu dringen. Diese Tiefe muß mit der Geschwindigkeit der Elektronen wachsen, und wird folglich die Dicke einer für den Elektronenstrom mehr oder weniger durchdringbaren Schicht zunehmen. Bei einer ungeheuren Geschwindigkeit des Stromes werden die Aussichten des Durchdringens so groß geworden sein, daß es der Mehrzahl der Elektronen gelingen wird, sogar durch eine dicke Schicht irgend eines Stoffes zu gehen. Daraus ersieht man, daß für einen Strom von Elektronen die Durchdringbarkeit der Materie mit der Zunahme der Geschwindigkeit des Stromes wachsen muß.

Versuche beweisen die Richtigkeit dieser Ausführungen. Elektronen, die sich verhältnismäßig langsam bewegen, besitzen ein sehr geringes Vermögen, durch die Materie zu dringen. Übrigens muß in Betracht gezogen werden, daß für ein Elektron eine Geschwindigkeit, die ein Hundertstel der Lichtgeschwindigkeit beträgt, als sehr gering zu bezeichnen ist. Mit der Durchdringbarkeit der Materie für Elektronen, die eine solche Geschwindigkeit besitzen, wollen wir die Durchdringbarkeit für schnellere Elektronen vergleichen. Hat die Geschwindigkeit der Elektronen sich auf das

Zehnfache erhöht, beträgt sie also ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit, so vergrößert sich die Durchdringbarkeit der Materie auf das 30fache. Beträgt die Geschwindigkeit ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit, so steigt die Durchdringbarkeit auf das 5000fache. Endlich nimmt sie bei einer Geschwindigkeit von 0,95 der Lichtgeschwindigkeit auf das  $2\frac{1}{2}$ millionenfache zu. Für so rasch bewegte Elektronen ist nur ein ganz geringer Teil des Atoms, um den Kern herum, undurchdringbar, und ein jedes Elektron hat die Aussicht, auf seinem Wege durch Hunderttausende (fast eine Million) von Atomen zu gehen, bevor eine Begegnung mit einem Kern es zurück oder doch zur Seite schleudert.

Alles, was in diesem Paragraphen ausgeführt worden ist, zeigt, welch tiefgehender Veränderung unsere Vorstellung vom Aufbau der Materie unterworfen wurde. Nochmals wollen wir unterstreichen, daß hier bei weitem nicht alles angeführt worden ist, was zugunsten der Lehre von Rutherford und Bohr spricht und daß es eine ganze Reihe von verschiedenen Erscheinungen gibt, deren Verständnis und Erklärung durch diese geniale Theorie möglich geworden ist.

**§ 6. Die Radioaktivität.** Bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen (1895) bemerkte der französische Physiker Henri Becquerel (1852 bis 1908), als er sich mit den Fragen der Phosphoreszenz (S. 144) befaßte, daß verschiedene chemische Verbindungen des Metalls Uran eine besondere Art von Strahlen aussenden, welche die photographische Platte beeinflussen und durch verschiedene für Licht undurchlässige Stoffe leicht hindurchgehen.

Indem er diese Strahlen, die man eine Zeitlang als Becquerel- oder Uranstrahlen bezeichnete, näher untersuchte, bereitete er den Boden für eine der bemerkenswertesten Entdeckungen, die je gemacht worden sind, die Entdeckung der radioaktiven Erscheinungen. Eine allseitige Untersuchung gerade dieser Erscheinungen hat zu den neuen Anschauungen über den Aufbau des Atoms, wie sie in diesem Kapitel dargelegt worden sind, geführt und wir werden sehen, mit welcher unvermeidlichen, man kann wohl sagen, zwingender Folgerichtigkeit diese neuen Ansichten auf dem Boden der erstaunlichen Tatsachen erstehen

mußten, welche die Erforschung der radioaktiven Erscheinungen der Menschheit gezeigt hat.

Frau Marie Curie (geborene Sklodowska, geb. 1867 in einer Pädagogenfamilie in Warschau, jetzt Professor der Pariser Universität) begann die Uranstrahlen am Uranpecherz aus Joachimstal in Böhmen zu studieren. Sie bemerkte, daß dieses Erz irgendwelche Stoffe enthält, die mit einer bedeutend höheren Intensität die von Becquerel entdeckten Strahlen aussenden, als das Uranerz selbst. Die Ergebnisse waren so interessanter Natur, daß ihr Gatte Pierre Curie (1859 bis 1908, wurde von einem Wagen überfahren), ein hervorragender Professor der Physik, sich an den Untersuchungen beteiligte. Zusammen setzten sie die Versuche fort, dem Uranerz die geheimnisvollen Stoffe zu entziehen, und es gelang ihnen 1898, in fast reinem Zustande chemische Verbindungen zweier Stoffe, die sie mit den Namen Radium und Polonium belegten, zu gewinnen. Diese sowie andere Stoffe von gleichen Eigenschaften bezeichnete man als radioaktive Stoffe und die Gesamtheit ihrer Eigenschaften als Radioaktivität. Im Jahre 1924 waren schon 44 verschiedene radioaktive Elemente bekannt.

Solche Elemente findet man auf der Erdoberfläche mit Ausnahme von Uran und Thorium nur in verschwindend kleinen Mengen. Ihr Vorhandensein hätte mit gewöhnlichen, rein chemischen Mitteln nicht nachgewiesen werden können. Die von ihnen ausgehenden Strahlen liefern jedoch ein solches Mittel zu ihrer Entdeckung und zur Erforschung ihrer Eigenschaften, das bei weitem empfindlicher ist als alle sonstigen Methoden, die dasselbe Ziel verfolgen, z. B. die chemische Methode und die spektroskopische. Diese Strahlen beeinflussen photographische Platten und rufen Fluoreszenz (S. 143) hervor. Ihre wichtigste Wirkung besteht aber darin, daß sie Gase, durch welche sie gehen, ionisieren. Auf welche Weise die Ionisation des Gases nachgewiesen werden kann, haben wir bereits auf S. 233 gesehen.

Die Erforschung der radioaktiven Stoffe hat gezeigt, daß sie drei Arten von Strahlen aussenden, die sich voneinander wesentlich unterscheiden. Sie erhielten ihre Namen nach den drei ersten Buchstaben des griechischen Alphabetes:  $\alpha$ -Strahlen,  $\beta$ -Strahlen und  $\gamma$ -Strahlen. Wir wollen diese Strahlen etwas

näher betrachten, jedoch mit den  $\gamma$ -Strahlen, als den einfachsten, beginnen.

I. Es hat sich erwiesen, daß die  $\gamma$ -Strahlen ihrem Wesen nach mit den Röntgenstrahlen identisch sind, an die sie sich von der Seite der schnelleren Schwingungen anschließen. Jene äußersten Strahlen, die auf S. 178 besprochen worden sind, deren Schwingungszahl pro Sekunde die ungeheure Zahl  $4 \cdot 10^{19}$  erreicht und deren Wellenlänge  $\frac{1}{14}$  Angström beträgt, sind eben  $\gamma$ -Strahlen eines der radioaktiven Stoffe (RaC, s. weiter unten). Es sind die härtesten (S. 177) Röntgenstrahlen, und sie besitzen das größte Vermögen durch allerlei Stoffe hindurchzugehen. Gehen sie durch Gase, so bewirken sie Ionisation.

II. Die  $\beta$ -Strahlen stellen gleichfalls nichts Neues dar. Sie sind ihrem Wesen nach mit den Kathodenstrahlen (S. 175) identisch, sind also nichts anderes, als Ströme von Elektronen, die von den radioaktiven Stoffen ausgeschleudert werden. Die Bewegungsgeschwindigkeit dieser Elektronen kann jedoch die in den Röntgenröhren erreichbare bedeutend übersteigen. Die Geschwindigkeit der Elektronen in den Kathodenstrahlen kann auf ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit gebracht werden, in Ausnahmefällen ist es sogar gelungen, die Hälfte derselben zu erreichen. Die langsamsten Elektronen im Bestande der  $\beta$ -Strahlen haben eine Geschwindigkeit von etwa einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit, während die schnellsten 0,996 derselben erreichen. Die Teilchen, deren Strom die  $\beta$ -Strahlen bildet, werden oft als „ $\beta$ -Teilchen“ bezeichnet. Es darf aber nicht vergessen werden, daß die  $\beta$ -Teilchen dasselbe sind wie die Elektronen. Erstere Bezeichnung ist aber geeigneter, da sie die Quelle der Elektronen angibt und man sofort weiß, daß von den raschesten Elektronen die Rede ist. Entsprechend ihrer ungeheuren Geschwindigkeit besitzen die  $\beta$ -Strahlen ein hohes Durchdringungsvermögen. Indem sie jedoch in die Materie tief eindringen, erleiden sie in derselben eine starke Zerstreuung nach allen Seiten. Gehen sie durch Gase, so rufen sie Ionisation hervor.

Wir wissen, daß Röntgenstrahlen ihren Ursprung den Kathodenstrahlen verdanken. Dementsprechend werden  $\gamma$ -Strahlen hauptsächlich durch  $\beta$ -Strahlen beim Durchgang derselben durch eine

Schicht des radioaktiven Stoffes selbst hervorgerufen. Übrigen bewirken  $\alpha$ -Strahlen, von denen noch die Rede sein wird, gleichfalls, wenn auch eine sehr schwache  $\gamma$ -Strahlung, denn einige radioaktive Stoffe senden keine  $\beta$ -Strahlen aus, sondern nur  $\alpha$ -Strahlen und eine schwache  $\gamma$ -Strahlung.

III. Die  $\alpha$ -Strahlen. Aus unseren Ausführungen geht hervor, daß  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen für uns nichts wesentlich Neues darstellen. Ganz anders ist es um die  $\alpha$ -Strahlen bestellt, deren Entdeckung die Wissenschaft um eine vollkommen neue Erscheinung bereichert hat, denn nichts Ähnliches ist bis dahin bekannt gewesen. Auf eins kann nur hingewiesen werden, nämlich, daß die  $\alpha$ -Strahlen, gleich den  $\beta$ -Strahlen Ströme von rasch dahinfliegenden Teilchen, die wir als  $\alpha$ -Teilchen bezeichnen wollen, darstellen. Diese Teilchen gleichen jedoch den  $\beta$ -Teilchen, d. h. den Elektronen, sehr wenig. Die  $\alpha$ -Teilchen besitzen die Dimensionen von Atomen und ihre Masse übersteigt die des Wasserstoffatoms um das Vierfache, ist also etwa 7200mal so groß als die Masse eines Elektrons (S. 59). Weiterhin sind sie positiv geladen und die Ladung eines jeden  $\alpha$ -Teilchens ist zwei Elementarladungen positiver Elektrizität gleich. Das kann sowohl bedeuten, daß irgend ein neutrales Teilchen diese zwei Elementarquanta erhalten hat oder eine äquivalente Menge negativer Elektrizität, d. h. zwei Elektronen, verlor. Die Geschwindigkeit der  $\alpha$ -Teilchen, wenn sie von einem radioaktiven Stoffe ausgeschleudert werden, beträgt etwa ein Zwanzigstel der Lichtgeschwindigkeit. Die kinetische Energie eines bewegten Körpers ist seiner Masse und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit proportional (S. 68). Wir wollen einen Vergleich zwischen den kinetischen Energien eines  $\alpha$ - und eines  $\beta$ -Teilchens ziehen in der Annahme, daß die Geschwindigkeit des letzteren 0,8 der Lichtgeschwindigkeit beträgt, d. h. 16mal so groß ist als die Geschwindigkeit des  $\alpha$ -Teilchens. Einerseits ist die Energie des  $\alpha$ -Teilchens  $16 \times 16 = 256$ mal kleiner als die Energie des  $\beta$ -Teilchens; andererseits ist sie aber 7200mal größer. Im Resultat erweist es sich, daß die Bewegungsenergie des  $\alpha$ -Teilchens etwa 28mal größer ist, als die des  $\beta$ -Teilchens. Damit erklärt es sich, daß die  $\alpha$ -Teilchen in hohem Maße das Vermögen besitzen, Gas durch

Zusammenstöße (S. 234) zu ionisieren. Ein einziges  $\alpha$ -Teilchen kann eine große Anzahl von Gasatomen zersplittern, d. h. ionisieren, bevor seine Geschwindigkeit sich so verringert hat, daß es das Vermögen, eine weitere Ionisation hervorzurufen, verliert. Die Ionisationswirkung der  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen kann man neben der Wirkung der  $\alpha$ -Strahlen, wenn alle drei Arten von Strahlen durch ein Gas gehen, fast stets vernachlässigen. Das Durchdringungsvermögen der  $\alpha$ -Strahlen ist sehr gering. Ein Aluminium- oder ein Glimmerblättchen, dessen Dicke einige Hundertstel Millimeter beträgt, sowie eine Luftschicht von einigen Zentimetern absorbieren die  $\alpha$ -Strahlen vollständig.

Was stellen denn die  $\alpha$ -Teilchen, deren Charakteristik wir eben gegeben haben, dar? Wir haben gesehen, daß ihre Masse viermal so groß als die eines Wasserstoffatoms, d. h. gerade der Masse eines Heliumatoms gleich ist. Bereits 1903 hatte Rutherford den Gedanken ausgesprochen, daß Helium aus  $\alpha$ -Teilchen entstehen könnte, und 1909 gelang es ihm, eine solche Umwandlung unmittelbar zu beobachten. In einer Röhre, in der sich  $\alpha$ -Teilchen ansammelten, bildete sich allmählich Helium, dessen Anwesenheit dadurch leicht nachgewiesen wurde, daß ein elektrischer Strom durch die Röhre gelassen wurde, wobei man das wohlbekanntes Spektrum des Heliums und vor allem die für dasselbe charakteristische gelbe Linie erhielt. Es konnte nicht der geringste Zweifel mehr aufkommen, daß das  $\alpha$ -Teilchen ein Heliumatom darstellt, das zwei Elementarquanta positiver Elektrizität besitzt oder dem zwei Elektronen entrissen sind. Verlor das  $\alpha$ -Teilchen die positive Ladung oder gewann es zwei Elektronen, was beim Versuch leicht geschehen konnte, so verwandelte es sich in ein Heliumatom.

Wir haben drei Arten von Strahlen, die von radioaktiven Stoffen ausgesandt werden, kennengelernt. Betrachten wir noch einige Sonderheiten der radioaktiven Erscheinungen. Hierher gehört die vollkommene Unabhängigkeit dieser Erscheinungen von irgendwelchen äußeren Bedingungen, vor allem aber vom Druck oder der Temperatur, die ja so oder anders den Verlauf wohl ausnahmslos aller anderen physikalischen Erscheinungen beeinflussen. Wenn sogar ein radioaktives Element eine beliebige chemische Verbindung eingeht, so ist damit nicht die geringste

Veränderung in den Erscheinungen, die von seiner Radioaktivität abhängen, verbunden. Radium ist ein Metall, das in reinem Zustande nur einmal von M. Curie (1910) gewonnen worden ist. Im Handel und in der Praxis gebraucht man nur chemische Verbindungen des Radiums, vor allem Chlor- und Bromradium. Der Kürze halber spricht man häufig von Radium, z. B. vom Einkauf so und so vieler „Milligramm Radium“, wenn in Wirklichkeit z. B. vom Bromradium die Rede ist.

Eine weitere Sonderheit der radioaktiven Stoffe besteht darin, daß sich in ihnen ununterbrochen Wärme ausscheidet. Äußerst genaue Messungen dieser Wärmemenge sind im Jahre 1912 von verschiedenen Forschern ausgeführt worden. Es zeigte sich, daß eine solche Menge einer radioaktiven Radiumverbindung, die 1 g des Elementes Radium enthält, in einer Stunde 132 kleine Kalorien ausscheidet, wenn einige Bedingungen, auf die wir nicht näher eingehen, erfüllt sind. Rutherford fand, daß 92 Proz. der Wärme von den  $\alpha$ -Strahlen herrühren.

**§ 7. Die radioaktiven Umwandlungen und die Lehre vom Zerfall der Atome.** Jede Aussendung von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlen hat eine Umwandlung des emittierenden Stoffes in einen anderen, der sich von ihm häufig wesentlich unterscheidet, im Gefolge. So wandelt sich das Metallradium, indem es  $\alpha$ -Strahlen aussendet, in einen gasförmigen Stoff, der den Namen Radiumemanation oder Niton erhalten hat. Dieses Gas verflüssigt sich bei  $-62^{\circ}\text{C}$  und erstarrt bei  $-71^{\circ}\text{C}$ . Die Radiumemanation sendet gleichfalls  $\alpha$ -Strahlen aus und verwandelt sich in Radium-A. Unter den gleichen Bedingungen geht das Radium-A in Radium-B über, welches seinerseits  $\beta$ -Strahlen aussendet und zu Radium-C wird. Darauf erhält man Radium-D (sendet  $\beta$ -Strahlen aus), Radium-E ( $\beta$ -Strahlen) und Radium-F ( $\alpha$ -Strahlen), das von M. Curie gleichzeitig mit dem Radium entdeckt worden ist und von ihr den Namen Polonium erhielt. Endlich geht das Radium-F in einen Stoff über, der nicht radioaktiv ist, in das stabile Radium-G, das mit Blei identisch ist, von dem es sich seinen chemischen Eigenschaften nach nicht unterscheidet, obwohl sein Atomgewicht von dem des gewöhnlichen Bleis etwas abweicht. So erhält man Reihen von radioaktiven Stoffen, von denen jeder

einzelne aus dem vorhergehenden, der dabei  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlen aussendet, entsteht. Solcher Reihen (oder Familien) von radioaktiven Stoffen gibt es wahrscheinlich nur zwei, und ihren Ursprung nehmen sie in den Metallen Uran (92) und Thorium (90), welche die höchsten, hier eingeklammerten, Ordnungszahlen besitzen. Unter der Nummer 91 ist bis jetzt nur ein radioaktiver Stoff der Uranreihe bekannt. Es gibt noch eine dritte Reihe, deren Urvater, das sogenannte Aktinium, nicht in unmittelbar merkbaren Mengen gewonnen werden kann, während man Uran und Thorium in beliebigen Mengen leicht erhält. Möglich, daß das Aktinium selbst der Uranreihe angehört und daß die ganze Aktiniumreihe nur eine Abzweigung der Uranreihe darstellt. Solcher Abzweigungen begegnet man in den Reihen des Urans und des Thoriums. Sie bilden sich, wenn ein Teil des radioaktiven Stoffes  $\alpha$ -Strahlen und der andere Teil  $\beta$ -Strahlen aussendet, so daß ein Stoff sich gleichzeitig in zwei andere wandelt.

Die Umwandlung eines radioaktiven Stoffes in den nächsten kann äußerst langsam und auch sehr rasch vor sich gehen, je nach der Art des betreffenden Stoffes. Bei einem gegebenen Stoff jedoch kann die Geschwindigkeit der Umwandlung mit keinerlei Mitteln geändert werden. Man ist übereingekommen, dieselbe nach dem Zeitabschnitt zu bemessen, in dessen Verlauf die Hälfte des zur Zeit vorhandenen Stoffes zerfällt, d. h. sich in den nächsten Stoff verwandelt, unter Aussendung von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlen. Diesen Zeitabschnitt bezeichnet man als Periode des betreffenden radioaktiven Stoffes. Des näheren Verständnisses wegen wollen wir ein Zahlenbeispiel betrachten. Angenommen, wir haben zu einer bestimmten Zeit eine gewisse Menge radioaktiven Stoffes, dessen Periode ein Jahr beträgt. In diesem Falle ist nach einem Jahr nur noch die Hälfte desselben vorhanden. Im Verlaufe des zweiten Jahres zerfällt die Hälfte des übriggebliebenen Stoffes, so daß nun ein Viertel der ursprünglichen Menge vorhanden ist. Am Ende des dritten Jahres ist nur noch ein Achtel da, am Ende des vierten ein Sechzehntel usw. Die Periode einiger radioaktiver Stoffe wird nach Milliarden von Jahren, die Periode von anderen wieder nach Bruchteilen einer Sekunde gerechnet.

Wir wollen die bis jetzt entdeckten radioaktiven Stoffe nicht aufzählen und die Aktiniumreihe, deren Glieder sich durch Kurz-

lebigkeit auszeichnen (die größte Periode beträgt 19,5 Tage), ganz unberührt lassen. Wir wollen nur die wichtigsten Glieder der Uran- und der Thoriumreihe bringen und setzen neben die Bezeichnung des Stoffes, zuweilen in Klammern, die Dauer der Periode und die Art der ausgehenden Strahlen.

Die Uranreihe. Das Uran oder seine Verbindungen können in beliebig großen Mengen gewonnen werden. Uran zerfällt sehr langsam und seine Periode beträgt fünf Milliarden Jahre. Es sendet  $\alpha$ -Strahlen aus und verwandelt sich in das Uran-Y (1,5 Tage,  $\beta$ -Strahlen). Die zwei nächsten Glieder besitzen Perioden von 24,6 Tagen und 1,15 Minuten. Es folgen zwei langlebige Stoffe: das Uran II (eine Million Jahre,  $\alpha$ -Strahlen) und das Ionium (200 000 Jahre,  $\alpha$ -Strahlen). Diesen Stoffen schließt sich das Radium an, dessen Periode 1730 Jahre beträgt. Es folgen die schon erwähnten Stoffe: die gasförmige Radiumemanation (Niton, 3,85 Tage,  $\alpha$ -Strahlen), das Radium-A (3 Minuten,  $\alpha$ -Strahlen), das Radium-B (26,7 Minuten,  $\beta$ -Strahlen), das Radium-C, das Radium-D (16,5 Jahre,  $\beta$ -Strahlen), das Radium-E (5 Tage,  $\beta$ -Strahlen) und das Radium-F (136 Tage,  $\alpha$ -Strahlen), das sich in das nicht radioaktive Radium-G (s. oben) wandelt.

Die Thoriumreihe. Das Thorium (18 Milliarden Jahre,  $\alpha$ -Strahlen) geht in das Mesothorium (5,5 Jahre, ohne Strahlung) über. Nach einigen weiteren Umwandlungen ergibt sich die gasförmige Thoriumemanation (54 Sekunden,  $\alpha$ -Strahlen). Am Ende der ganzen Reihe steht ein Stoff, der, gleich dem Radium-G, sich seinen chemischen Eigenschaften nach vom Blei nicht unterscheidet. Sein Atomgewicht weicht jedoch von dem des gewöhnlichen Bleis und des Radium-G etwas ab.

Alles das offenbart uns eine unzweifelhafte Verwirklichung des Traumes der Alchimisten, ein Element in ein anderes zu verwandeln, denn es ist nicht daran zu zweifeln, daß alle Stoffe, die hier aufgezählt worden sind, dem Wesen nach verschiedene Elemente darstellen. Doch fast alle diese Verwandlungen üben auf uns keinen großen Eindruck aus, denn es handelt sich um verschwindend geringe Mengen, deren Vorhandensein nur durch die ionisierende Wirkung der von ihnen ausgehenden Strahlen nachgewiesen werden kann. Es gibt hier jedoch auch einige Ausnahmen. Das Metall Uran, das man in

beliebig großen Mengen erhalten kann, verwandelt sich unzweifelhaft in das Metall Radium, das von M. Curie in merkbareren Mengen gewonnen worden ist und das seinen Eigenschaften und dem Atomgewicht (226,2) nach dem Uran (Atomgewicht 238,2) gar nicht gleicht. Das Radium seinerseits wandelt sich in die gasförmige Emanation, die man auch in Gestalt eines kleinen doch sichtbaren Bläschen erhält und deren Dichte von Ramsay und Gray, wie bereits im 2. Kap. (S. 23) erwähnt wurde, bestimmt worden ist. Die bemerkenswerteste Verwirklichung des Traumes der Alchimisten jedoch muß im Entstehen des Heliums erblickt werden, eines der Zerfallsprodukte einer Reihe von Elementen, die  $\alpha$ -Strahlen aussenden. Hierher gehören die Metalle Uran, Thorium und Radium, sowie die gasförmige Emanation, d. h. vier verschiedene Elemente, die man in reinem Zustande gewinnen und unmittelbar beobachten konnte, die also nicht nur durch ihre ionisierende Wirkung nachgewiesen werden konnten. Schließlich haben wir noch die Verwandlung derselben Elemente in einen Stoff, der sich seinen chemischen Eigenschaften nach vom Blei nicht unterscheidet.

So wurde zur Wirklichkeit, was lange Zeit als unmöglich galt.

Wir haben gesehen, daß die Radioaktivität die Eigenschaft einer bestimmten Gruppe von 44 Elementen ist, die wahrscheinlich sämtlich „Nachkommen“ zweier derselben, der Metalle Uran und Thorium, sind. Es drängt sich jedoch die Frage auf, ob die Radioaktivität nicht auch anderen, ja vielleicht allen Elementen eigen ist, sich aber nur sehr schwach offenbart. Dazu kann folgendes gesagt werden: Die Metalle Kalium und Rubidium besitzen schwache Strahlung, die der  $\beta$ -Strahlung gleicht und in allen chemischen Verbindungen dieser Elemente zutage tritt. Schwache Radioaktivität beobachtet man in allen Gesteinen, aus denen die Erdkruste besteht. Das findet jedoch eine vollkommene Erklärung im Umstand, daß in ihnen Uran, Thorium und Radium enthalten sind, die, wenn auch in sehr geringen Mengen, überall auf der Erde zerstreut sind. Radiumemanation findet man in Fluß- und Meerwasser, sowie in vielen Quellen. Einige Mineral- und Süßwasserquellen enthalten ganz bedeutende Mengen Emanation. In der atmosphärischen Luft ist stets eine gewisse Menge Emanation

vorhanden, die aus dem Erdboden herrührt. Höhlen- und Kellerluft, sowie besonders Erdbodenluft enthalten mehr Emanation, die Luft über der Meeresoberfläche weniger als die über dem Erdboden. Die Radioaktivität der Luft wächst beim Sinken des Barometerdruckes, wenn die Erdbodenluft in die Höhe steigt.

Wir gehen jetzt zu der allgemein angenommenen Erklärung der radioaktiven Erscheinungen über, wie sie die Lehre vom Zerfall der Atome liefert. Die Grundgedanken, auf denen diese Lehre aufgebaut ist, sind von Rutherford und Soddy im Jahre 1903 ausgesprochen worden, d. h. lange vor dem Erscheinen der Lehre von der Atomstruktur, die in § 3 dieses Kapitels dargestellt und von Rutherford 1911 sowie von Bohr 1913 aufgestellt worden ist.

Die Grundidee von Rutherford und Soddy besteht darin, daß in den Atomen eines radioaktiven Stoffes eine Art Explosion stattfindet, wobei das Atom ein  $\alpha$ - oder ein  $\beta$ -Teilchen ausschleudert. Was übrigbleibt, bildet das Atom eines neuen Stoffes, der in der Kette der radioaktiven Stoffe unmittelbar auf den ersten folgt. Eine solche Explosion kann sich in einem und demselben Atom mehrfach wiederholen, bis schließlich ein stabiler nicht radioaktiver Stoff entsteht. Die Ursachen der Explosion, die im Innern des Atoms erfolgt, sind uns bis jetzt unbekannt. Sie weisen scheinbar einen zufälligen Charakter auf, da sie bald in einem, bald in einem anderen Atom auftreten. Bei einer ungeheuren Zahl von Atomen gewinnen diese zufälligen Explosionen in quantitativer Richtung einen vollkommen gesetzmäßigen Charakter. Das bedeutet, daß in einem bestimmten Zeitabschnitt ein ganz bestimmter Teil aller vorhandenen Atome von Explosionen heimgesucht wird. Die Größe dieses Teiles hängt von der Art des Stoffes ab; sie bestimmt die Periode (S. 258) des radioaktiven Stoffes. Eine klarere Beschreibung der Vorgänge beim Zerfall eines Atoms konnten Rutherford und Soddy im Jahre 1903 nicht geben. Eine solche wurde erst möglich, als die Lehre von der Atomstruktur auftrat.

Es sei daran erinnert, daß nach dieser Lehre das Atom aus einem Kern besteht, um den Elektronen kreisen. Die Anzahl der Elektronen ist der Ordnungszahl des Elementes gleich, und ebensoviel Elementarquanta positiver Elektrizität enthält jedenfalls der Kern, der aber darüber hinaus noch eine gewisse Anzahl von

Elektronen und ebensoviel Elementarquanta positiver Elektrizität mehr besitzen kann, als es der Ordnungszahl des Elementes entspricht. Wir wollen hervorheben, daß nur solche Elemente sich als radioaktiv erweisen, deren Ordnungszahlen nicht unter 81 liegen. Die Atome der radioaktiven Elemente enthalten also 81 bis 92 Elektronen. Ihre Kerne besitzen eine entsprechende Menge positiver Elektrizität und außerdem zweifellos noch eine Zusatzmenge, welche die im Kern vorhandenen Elektronen neutralisiert. Es sei noch in Erinnerung gebracht, daß bei der radioaktiven Verwandlung eines Elementes entweder  $\beta$ -Teilchen, die nichts weiter als Elektronen sind, oder  $\alpha$ -Teilchen ausgesandt werden, die mit zwei Elementarquanta positiver Elektrizität versehene oder zweier Elektronen beraubte Heliumatome darstellen.

Erklärt man sich mit der Lehre von Rutherford und Bohr über den Aufbau des Atoms einverstanden, so läßt sich die Frage nach dem Wesen der radioaktiven Verwandlungen glänzend beleuchten. Wir beginnen mit dem  $\alpha$ -Teilchen. Wir haben gesehen (S. 239, Fig. 32), daß ein Heliumatom aus einem Kern besteht, der gerade zwei Elementarquanta Elektrizität enthält; um ihn kreisen zwei Elektronen, und seine Masse ist viermal so groß als die eines Wasserstoffatoms. Die Masse eines  $\alpha$ -Teilchens ist aber, wie wir sahen, ebenfalls der Masse von vier Wasserstoffatomen gleich. Daraus folgt, daß das  $\alpha$ -Teilchen identisch ist mit einem Heliumatom, das seiner zwei Elektronen beraubt ist, d. h. identisch mit dem Kern des Heliumatoms. Das  $\alpha$ -Teilchen enthält einen Überschuß von zwei Elementarteilchen positiver Elektrizität. Gierig ziehen sie die mehr oder weniger überall vorhandenen freien Elektronen an und werden dadurch zu neutralen Heliumatomen.

Wir wenden uns jetzt dem Atom eines radioaktiven Stoffes zu, das bei der Explosion ein  $\alpha$ - oder ein  $\beta$ -Teilchen ausschleudert und sich in ein Atom des folgenden Elementes wandelt. Natürlich kann diese Explosion nur im Kern des Atoms erfolgen. Aus dem Kern wird ein Fetzen positiver Elektrizität ausgeschleudert, das seiner Größe nach zwei negativen Elektronen gleichkommt, wenn das Element  $\alpha$ -Strahlen aussendet. Derselbe Kern schleudert mit einer Geschwindigkeit, die fast

die des Lichtes erreicht, ein Elektron aus, wenn das Element  $\beta$ -Strahlen aussendet.

Die beiden letzten Sätze enthalten die Lehre vom Zerfall der radioaktiven Elemente, die auf der modernen Theorie der Atomstruktur fußt und geben zugleich eine klare Vorstellung vom Wesen der radioaktiven Erscheinungen.

Wir müssen jetzt nochmals auf die bemerkenswerte Arbeit von Ramsay und Gray zurückkommen, in welcher die Dichtebestimmung jenes gasförmigen Stoffes, den man nur in Gestalt eines einzigen Bläschens gewinnen konnte, durchgeführt ist. Diese Arbeit ist bereits auf S. 23 erwähnt worden. Jetzt kann man sagen, daß dieses Bläschen Radiumemanation darstellte, d. h. Niton, das sich nach der hier dargelegten Theorie aus Radium bildet, wenn das Atom des letzteren ein  $\alpha$ -Teilchen, d. h. den Kern des Heliumatoms verliert. Da das Atomgewicht des Heliums gleich 4 ist, so muß das Atomgewicht des Nitons um vier Einheiten geringer sein, als das Atomgewicht des Radiums. Dieses letztere beträgt jedoch nach Bestimmungen von M. Curie und anderen Forschern nahe an 226, so daß das Atomgewicht der Radiumemanation (des Nitons) um 222 liegen muß. Wäre das nicht der Fall, so müßte die ganze Theorie für null und nichtig erklärt werden. Zur Bestimmung des Atomgewichts eines gasförmigen Stoffes genügt es aber, die Dichte desselben festzustellen. Daher hat die Bestimmung der Dichte (des Volumens und des Gewichtes) der Radiumemanation ein so gewaltiges Interesse und mußte von großer wissenschaftlicher Bedeutung sein. Ramsay und Gray haben diese schwierige Aufgabe gelöst. Sie fanden, daß das Atomgewicht des Nitons tatsächlich nahe bei 222 liegt, d. h. um 4 Einheiten kleiner ist als das Atomgewicht des Radiums. Diese Tatsache konnte als wichtige Stütze der Lehre von der Atomstruktur im allgemeinen und vom Atomzerfall der radioaktiven Elemente im speziellen dienen.

**§ 8. Schlußbetrachtung.** In den sechs letzten Kapiteln haben wir Skizzen gebracht, die sich auf verschiedene Gebiete der Physik beziehen. Es ist wohl nicht nötig, eine Übersicht über alle in diesen Skizzen berührten Fragen zu geben und nochmals auf alles hinzuweisen, was die Wissenschaft uns offenbart hat. Wir haben

versucht, in diesen Skizzen die wichtigsten und gleichzeitig dem Charakter nach möglichst verschiedenartigen Eroberungen der Physik darzulegen. Sie haben unsere Kenntnisse erweitert und in unzähligen Hinsichten uns das Verstehen möglich gemacht. Im 1. Kapitel ist auf die zwei Ziele hingewiesen worden, nach denen die Menschheit strebt: Auf die Erkenntnis und auf die Bequemlichkeit. Die Physik hat der Menschheit tiefe Kenntnisse von dem Teil der Welt gegeben, der den Gegenstand ihrer ununterbrochenen Forschung bildet und den man als tote unorganisierte Natur zu bezeichnen pflegt. Hier ist sie die Herrscherin, während sie alles, was mit biologischen Erscheinungen, Erscheinungen des Lebens zusammenhängt, anderen Wissenschaften überläßt. Sie darf stolz sein auf alles, was sie auf diesem von ihr eroberten Gebiete geleistet hat, und die dankbare Menschheit wird die Namen der selbstlosen Forscher, dieser Priester im Tempel der Wissenschaft, die in mühevoller Arbeit unsere Kenntnisse erweitert und vertieft haben, die die Wahrheit suchten und ihr allmählich näher kamen, nie vergessen. Tatsächlich ist ihnen ein ewiges Gedenken sicher und spätere Generationen von Forschern werden bestrebt sein, es ihnen gleichzutun. Stets wird sie die helleuchtende Fackel der Wissenschaft locken und den langen dornenvollen Weg beleuchten, der zur Wahrheit und zur Quelle der Erkenntnis führt.

## 9. Kapitel.

### Die Physik und das Streben der Menschen nach Bequemlichkeit.

**§ 1. Einleitung.** Im 1. Kapitel haben wir gezeigt, daß die zwei Hauptziele, nach denen die Menschen streben und auf die sie fast ihre ganze Tätigkeit einstellen, mit den Worten charakterisiert werden können: Erkenntnis und Bequemlichkeit. Das erstere der beiden Ziele lockt sehr viele an, es interessieren sich für dasselbe alle Menschen, die alles, was sie umgibt, bewußt betrachten und Antwort auf unzählige vor ihnen erstehende Fragen suchen. Doch nur wenige arbeiten selbst an der Lösung dieser Fragen mit und versuchen, die Menschheit der Wahrheit näher zu bringen.

Nach Bequemlichkeit dagegen streben ausnahmslos alle Menschen, wenn man dem Wortbegriff „Bequemlichkeit“ jene erweiterte Bedeutung verleiht, die im 1. Kapitel eingehend besprochen worden ist. Umfaßt man in Gedanken alles, was die Menschheit im Kampfe um die Bequemlichkeit erreicht hat, so erblickt man das Bild alles dessen, was man Zivilisation nennt und was die Kulturvölker von den Wilden unterscheidet.

In dem 3. bis 7. Kapitel haben wir an einer Reihe von Beispielen gezeigt, wieviel die Physik getan hat, um unsere Kenntnisse zu erweitern und zu vertiefen, um Antwort zu finden auf Fragen, die den Menschen, der die Erscheinungen der ihn umgebenden Welt bewußt wahrnimmt, quälen. Wir müssen jetzt zur nächsten, bedeutend einfacheren Aufgabe übergehen, und zwar wollen wir zeigen, was die Physik zur Erreichung des zweiten Zieles der Menschheit geleistet, in welchem Maße sie zur Entwicklung der Zivilisation beigetragen hat, welche „Bequemlichkeiten“ man ausschließlich der Arbeit von Forschern zu verdanken hat, die ihr Leben der Physik gewidmet haben, mit dem einzigen, doch selbstlosen Ziele, Kenntnisse zu erlangen, ohne danach zu fragen, welchen Nutzen ihre, teilweise in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Entdeckungen bringen können. Dieser Nutzen, diese Anwendung der neuen Entdeckungen auf die Vergrößerung der Bequemlichkeiten des Lebens, dieses Wachsen der Zivilisation, sind sozusagen von selbst erschienen. Als reife Frucht sind sie der Menschheit in Gestalt von unzähligen Erfindungen, die nur auf dem Boden der neuen Entdeckungen, die ihnen als Fundament dienten, erstehen konnten, in den Schoß gefallen. Was die Physik in dieser zweiten Richtung geleistet hat, ist nicht weniger großartig als das, was wir in den früheren Kapiteln gesehen haben. Es ist aber bedeutend augenfälliger, von allen Seiten und bei jedem Schritt macht es sich bemerkbar. Wir sehen diese Früchte, wohin wir auch blicken, wir bedienen uns ihrer beständig, sie erfüllen unser ganzes Leben und ohne sie läßt sich unsere Existenz schwer denken. Wir können sagen, daß das Verdienst der Physik in beiden Richtungen gleich groß ist. Es ist wohl kaum nötig, alles, was in den Hauptzügen allgemein bekannt ist und dessen sich wohl alle bedienen, ausführlich zu beschreiben. Die großen Erfindungen, die der Menschheit die Zivilisation gegeben haben, sind allen be-

kannt. Es genügt bloß, an sie zu erinnern, ja man könnte sich auf eine einfache Aufzählung beschränken. Sie gehören alle mehr oder weniger einem Gebiet an, das man mit dem Namen Technik bezeichnet. In diesem Buche sollen technische Fragen nicht berührt werden. Unsere Aufgabe besteht lediglich darin, zu zeigen, wie die Erfindungen mit den Entdeckungen, mit denen die Physik die Menschheit bereichert hat, zusammenhängen.

Wir könnten uns sogar mit wenigen Zeilen begnügen und unseren Lesern vorschlagen, um sich zu schauen, die besonders hervortretenden Merkmale der Zivilisation zu finden und sich zu fragen, woher sie stammen und welcher Boden sie hervorgebracht hat. Die Leser würden bald zu der Überzeugung gelangen, daß dieser Boden, die Urquelle der Zivilisation, die Physik ist. Als wir im 4. Kapitel (S. 81) die Umwandlungen einer Energieform in eine andere betrachteten, hatten wir die Frage nach der Urquelle aller Energieformen auf der Erdoberfläche gestellt. Wir kamen zum Resultat, daß man als solche, unter verschwindenden Ausnahmen, die Strahlungsenergie zu betrachten hat, deren lebenspendender Strom sich ununterbrochen von der Sonne auf die Erde ergießt. Als solche Sonne erscheint für die Zivilisation die Physik, deren Entdeckungen sich auf uns ergießen und sich sozusagen in Erfindungen wandeln, deren Ausnutzung die Grundlage der Zivilisation, die Gewährleistung der wahren Kultur bildet. Wir wollen uns jedoch nicht darauf beschränken, unsere Leser aufzufordern, sich von der Richtigkeit unserer Worte selbst zu überzeugen. Wir wollen ihnen helfen, indem wir die Erfindungen kurz aufzählen und zeigen, inwiefern sie mit den Entdeckungen der Physik zusammenhängen. Ohne auf Kleinigkeiten einzugehen, erwähnen wir nur die wichtigsten Erfindungen, die allen ins Auge fallen, allen bekannt sind und deren sich alle bedienen.

Wir werden mit Fragen der Technik in Berührung kommen, die größtenteils ihr Entstehen der Physik verdankt. Es wäre jedoch ungerecht und einseitig, wenn wir verschweigen wollten, daß, wenn auch einerseits die Technik dank dem belebenden Einfluß der Physik wächst und erstarkt, doch auch die Physik in vielem der Technik Dank schuldet. Indem nämlich die Technik sich entwickelt und nach neuen Zielen strebt, stellt sie die

Wissenschaft vor neue Aufgaben, an welche diese gern herangeht. Die Lösung derselben wird nicht selten zur Quelle einer weiteren Entwicklung der Wissenschaft, neuer Siege, neuer Entdeckungen und neuer Gebiete, die sich aufschließen. Im 2. Kapitel haben wir auf die Bedeutung der Physik für die anderen Wissenschaften hingewiesen. Diesen Gedanken wollen wir hier nicht weiter entwickeln. Erwähnen wollen wir nur ihre Anwendung in der Medizin. Diese Wissenschaft steht uns aus begreiflichen Gründen allen nahe, wir haben alle mit ihr zu tun und ist es daher von Interesse, auf Fälle hinzuweisen, in welchen sie nur aus der wissenschaftlichen Schatzkammer der Physik schöpfend der Menschheit Dienste leisten kann.

**§ 2. Die Elektrotechnik.** Wir beginnen mit demjenigen Teil der von uns gestellten Frage, der in ihr an erster Stelle steht, mit der Elektrotechnik. Das verflossene 19. Jahrhundert hat man mit Recht das Jahrhundert des Dampfes genannt. Mit demselben Recht wird man das 20. das Jahrhundert der Elektrizität benennen können. Im täglichen Leben gewinnt die Elektrotechnik mit jedem Tage immer größere und größere Bedeutung. Einerseits erobert sie sich neue Gebiete, indem sie die unmittelbare Arbeitsleistung der Dampftechnik abnimmt. Andererseits aber entstehen in ihr immer neue Kapitel dank den neuen Entdeckungen auf dem Gebiete der physikalischen Erscheinungen. Als Beispiel kann der drahtlose Telegraph dienen, der nach der Entdeckung der Hertz'schen Strahlen erfunden worden ist (S. 171). Es fragt sich nun: Woher stammt die Elektrotechnik, auf welchem Boden erstand dieser unermeßliche Zweig der Technik, der auf speziellen Hochschulen studiert wird, die ihrerseits in zahlreiche Abteilungen oder Fakultäten zerfallen, da es einem einzelnen Menschen bereits unmöglich ist, die gesamte Elektrotechnik gründlich zu erlernen? Darauf kann ohne Zaudern die Antwort gegeben werden: Die ganze Elektrotechnik ist auf dem Boden jener Entdeckungen auf dem Gebiete der elektrischen Erscheinungen erstanden, die in der Geschichte der Physik des 19. Jahrhunderts eines der interessantesten Kapitel bilden.

Es liegt nicht in unserer Absicht, auf Einzelheiten einzugehen, die sich auf die Geschichte dieser Entdeckungen beziehen: bei

den Zwecken, die wir verfolgen, spielen sie keine Rolle. Wir wollen uns darauf beschränken, die Daten der wichtigsten Entdeckungen anzugeben, die ausnahmslos einem einzigen Jahrhundert angehören.

Gerade auf der Schwelle eines neuen Jahrhunderts, im Jahre 1800 konstruierte Volta seine Säule (die Voltasäule) und die erste Batterie aus einfachen galvanischen Elementen, wodurch er der Menschheit den elektrischen Strom in einer für Forschungen und Anwendungen bequemen Form zum Geschenk machte. In demselben Jahre bemerkte Anthony Carlisle (1768 bis 1840) und William Nicholson (1753 bis 1815) in England, daß sich in einem Wassertröpfchen, durch das ein elektrischer Strom hindurchgeht, Wasserstoffbläschen ausscheiden: damit entdeckten sie die Erscheinung der Elektrolyse, d. h. die chemischen Wirkungen des Stromes. Die Gesetze, denen die Wirkungen unterworfen sind, fand darauf Faraday im Jahre 1833. Die Erwärmung von stromdurchflossenen Drähten beobachteten bald nach 1800 P. Simon (1767 bis 1815), C. Pfaff (1773 bis 1852) und van Marum (1750 bis 1837); auf dieser Erwärmung beruht die elektrische Beleuchtung. Im Jahre 1820 bemerkte Oerstedt, daß der elektrische Strom eine Magnethnadel beeinflußt. In demselben Jahre entdeckte und erforschte Ampère die gegenseitige Anziehung und Abstoßung von stromdurchflossenen Leitern. Einige Jahre später sind die ersten Elektromagneten konstruiert worden (unbekannt von wem). Im Jahre 1831 entdeckte Faraday die Erscheinung der Strominduktion durch Ströme und Magnete, die Grundlage der modernen Elektrotechnik. Die Hertzschen Strahlen sind im Jahre 1887, die Röntgenstrahlen 1895 und die Radioaktivität 1898 entdeckt worden.

Mit dieser kurzen Aufzählung erschöpft sich das Verzeichnis der wichtigsten großen Entdeckungen, die zu den Erfindungen geführt haben, auf denen die moderne Elektrotechnik aufgebaut ist. In der friedlichen Stille der physikalischen Laboratorien arbeiteten die Forscher. Indem sie die elektrischen Erscheinungen untersuchten, strebten sie nur nach Erkenntnis der Wahrheit, wollten sie nur diese Erscheinungen entdecken und untersuchen und die Gesetze erfassen, denen sie gehorchen müssen. Der Gedanke an den praktischen Nutzen, den ihre Entdeckungen bringen konnten, lag

ihnen ferne. Ein selbstloses Dienen der reinen Wissenschaft war die Devise ihrer Tätigkeit. Wir wollen nun sehen, welche Früchte, außer der Erkenntnis, ihre Tätigkeit gebracht hat, welchen Nutzen die Menschheit aus derselben ziehen konnte und in welchem Maße sie zur Vergrößerung jener Bequemlichkeiten im weiten Sinne dieses Wortes, nach denen die Menschheit strebt, beitragen konnte. Eine Darlegung der Geschichte der Erfindungen liegt außerhalb unserer Aufgabe und wir begnügen uns daher fast nur mit einer einfachen Aufzählung, wobei wir in einigen Fällen darauf hinweisen, auf welcher der angeführten Entdeckungen die betreffende Erfindung beruht. Selbstverständlich beschränken wir uns auf eine Aufzählung derjenigen Erfindungen, die allen bekannt sind und deren sich alle bedienen. Außer ihnen gibt es noch Tausende von anderen, deren Bedeutung sich in der bestimmten engen Sphäre ihrer Anwendung konzentriert und die gleichfalls auf Entdeckungen auf dem Gebiete der elektrischen Erscheinungen beruhen.

Eine wichtige allgemeine Bemerkung wollen wir unserer Aufzählung vorausschicken. Wir wissen, daß die praktischen Anwendungen der Elektrizität von Tag zu Tag wachsen, daß sie in vielen Fällen die Dampfmaschinen als unmittelbare Arbeitserzeuger verdrängen, und wir lesen, daß weite Territorien, ja ganze Staaten „elektrifiziert“ werden, d. h. ein Netz von elektrischen Zentralstationen einführen, deren jede ein weites Gebiet von Hunderten von Kilometern im Durchmesser mit elektrischer Energie versorgt. Allmählich werden auch die Dampfisenbahnen durch elektrische Bahnen ersetzt. Unwillkürlich drängt sich die Frage auf: Worin liegt denn der Vorzug der Elektrizität vor dem Dampfe, worauf beruht ihre Kraft? Was zwingt uns, eine „Elektrifizierung“ alles dessen, was der Wirkung der Elektrizität zugänglich ist, anzustreben? Die Antwort lautet einfach: Der elektrische Strom hat die kostbare, durch nichts zu ersetzende Eigenschaft, daß er seine Wirkung auf großen Entfernungen von dem Orte seines Entstehens ausüben kann, d. h. von einem Orte, wo entweder Vorräte an potentieller (Brennmaterialien) oder kinetischer (Wasserfälle) Energie vorhanden sind, die man ausnutzen kann, indem man sie in elektrische Energie wandelt. Hier haben wir es mit einer sogenannten Arbeitsübertragung auf

Entfernungen zu tun. Die unmittelbare Wirkung einer Dampf- oder Wassermaschine kann man dagegen durch Riemen nur auf ganz kurze Entfernungen übertragen.

Der elektrische Telegraph (vordem gab es einen optischen) in seiner ersten Form beruhte auf der Ablenkung der Magnethöhle unter Einwirkung des elektrischen Stromes. Darauf erschienen Telegraphen, deren Hauptteil aus einem Elektromagneten bestand, d. h. aus einem hufeisenförmigen weichen Stück Eisen, das mit einem isolierten Draht umwickelt ist und das zum Magneten wird, sobald der Draht von Strom durchflossen wird. Wird auf einer von zwei durch Drähte verbundenen Stationen der Stromkreis geschlossen, so wird der Elektromagnet auf der anderen Station magnetisiert und tritt in Tätigkeit. Der zweite Draht, der den Strom zurückleiten soll, wird bekanntlich durch die Erde ersetzt. Über die Bedeutung des Telegraphen braucht wohl kaum etwas gesagt zu werden. Die Weltgeschichte schreitet schneller fort, seit jedes Ereignis, wo es auch stattfinden möge, nach einigen Stunden in allen zivilisierten Ländern bekannt wird. Wenn man es wünscht, kann man aus den entferntesten Ländern nach einigen Minuten Antwort auf seine Fragen erhalten, während man früher Wochen und Monate dazu brauchte. Die Bedeutung des Telegraphen für den Handel, die Industrie und im Privatleben ist allen bekannt.

Der drahtlose Telegraph beruht auf den theoretischen Arbeiten von Maxwell und auf den Versuchen von Hertz, welcher die elektrischen Strahlen entdeckt hat. Auf die kolossalen Vorzüge und die nicht weniger bedeutenden Mängel des drahtlosen Telegraphen gehen wir nicht weiter ein. Wir wollen nur bemerken, daß er einen Verkehr mit isolierten Orten (Schiffe auf hoher See) und eine Nachrichtenverbreitung gleichzeitig nach vielen, ja sogar allen Richtungen ermöglicht, sowie Orte, die keinen Drahttelegraphen besitzen, miteinander verbindet.

Das Telephon im Verein mit dem Mikrophon beruht auf einer physikalischen Entdeckung: die Stärke eines Stromes der durch die Kontaktstelle von zwei Körpern fließt, verändert sich mit dem Druck, den die beiden Körper aufeinander ausüben. Die weite Verbreitung dieses Apparates und der Ärger, den wir bei einer Störung empfinden, zeigen zur Genüge, wie groß die Be-

quemlichkeit ist, die mit dem Telephon verbunden ist und wie sehr wir uns an dasselbe gewöhnt haben.

Dynamoelektrische Maschinen oder einfach „Dynamos“ für Gleich- und Wechselstrom beruhen vollkommen auf den Erscheinungen der Strominduktion. Sie ersetzen die früher benutzten sehr unbequemen Batterien aus Elementen mit Flüssigkeiten (Danielelemente, Bunsenelemente u. a.) und geben die Möglichkeit, Ströme von gewaltiger Stärke zu erhalten. Ohne diese Maschinen könnte sich die moderne Elektrotechnik in den wichtigsten Richtungen nicht weiter entwickeln.

Die elektrische Beleuchtung durch den Lichtbogen und Glühbirnen beruht auf der Erwärmung von stromdurchflossenen Leitern, d. h. auf der Verwandlung der elektrischen Stromenergie zuerst in Wärmeenergie und dann in sichtbare Strahlungsenergie. Einen Lichtbogen erhielt zum ersten Male Prof. Petroff (1802) in Petersburg und darauf Davy (1778 bis 1829). Die Vorzüge der elektrischen Beleuchtung vor den anderen (Kerzen, Petroleum- und Öllampen, Gaslicht) sind allen verständlich. Es genügt, auf die bequeme Art des Anzündens und Auslöschens hinzuweisen, sowie auf die Möglichkeit, die Lichtstärke durch einen einfachen Austausch der Birne in weiten Grenzen zu ändern. Auch wird bei der elektrischen Beleuchtung die Luft in den Wohnräumen nicht verdorben. Eine rein wissenschaftliche Untersuchung der Strahlungsgesetze führte dazu, daß die Kohlenfaden in den Birnen durch Metallfaden ersetzt wurden, die, wie die Theorie es voraussah, sich als bedeutend ökonomischer erwiesen, als die Kohlenfaden. Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes benutzt man nicht nur in der Beleuchtung. Sehr verbreitet sind elektrische Kochapparate, Öfen usw. Man bedient sich des elektrischen Stromes, um Minen zu sprengen, indem man den Stromkreis an einem sicheren Orte, weit von der Mine schließt.

Die Elektromotoren sind Maschinen, in denen die elektrische Stromenergie zur Gewinnung von mechanischer Arbeit verbraucht wird, wobei sie vor allem in kinetische Bewegungsenergie der Maschinenteile übergeht, z. B. Räder in Bewegung setzt. Elektromotoren können in großen Mengen und an verschiedenen Orten im Umkreise der Zentralstation aufgestellt

werden, die die betreffenden Orte und damit die Motoren mit Strom versorgt. Diese Motoren setzen aller Art Werkbänke, verschiedene Maschinen, z. B. Pumpen, Buchdruckpressen, Nähmaschinen usw. in Bewegung. Die große Bequemlichkeit, die gerade auf dieser Anwendung der elektrischen Energie beruht, ist eine der Hauptursachen des bereits erwähnten Bestrebens, weite Territorien zu elektrifizieren. Den bekanntesten Fall einer Arbeitsübertragung auf Entfernung stellt die elektrische Straßenbahn dar, die fast überall die Pferdebahn verdrängt hat. Von den unzähligen weiteren Anwendungen der Elektrizität seien noch als allgemein bekannt die Netze von elektrischen Uhren erwähnt, die an verschiedenen Stellen einer Stadt angebracht und durch eine gut regulierte Zentraluhr in Bewegung erhalten werden, so daß alle Uhren ganz gleichmäßig gehen.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes benutzt man zu vielen verschiedenartigen Zwecken. Es seien einige davon genannt. Die Galvanostegie befaßt sich mit dem Überziehen der Oberflächen von verschiedenen Körpern mit einer dünnen Schicht irgend eines Metalles, wie z. B. Nickel (Vernickeln), Gold, Kupfer usw. Die Galvanoplastik ist die Kunst, Abdrücke von reliefartigen Gegenständen, wie Medaillen, Münzen usw. zu erhalten. Stereotype zum Drucken von Büchern, Zeitungen usw. gewinnt man auch auf galvanischem Wege. Übrigens rechnet man oft fälschlicherweise alles, was zur Galvanostegie gehören müßte, zur Galvanoplastik. Der chemischen Wirkung des Stromes bedient man sich zur Gewinnung von verschiedenen Stoffen, zur Bearbeitung von Erzen, zum Reinigen (Raffinieren) von Metallen und in letzter Zeit auch, um den zum Düngen des Bodens notwendigen Stickstoff direkt aus der Luft zu gewinnen. Unter Einwirkung eines starken Lichtbogens verbindet sich in der Luft der Stickstoff mit dem Sauerstoff.

In vielen Fällen bedient sich die Medizin der Elektrizität. Zu unmittelbaren Heilzwecken verwendet sie sowohl Gleichströme als auch Induktionsströme. Mit Strom erhitzte Drähte benutzt man zum Ausbrennen (Galvanokaustik), elektrische Lämpchen zum Beleuchten der inneren Höhlungen des menschlichen Körpers. Die Röntgenstrahlen dienen zur Untersuchung von krankhaften Neubildungen, und um Fremdkörper im Innern

des Menschen (Metallsplitter) sowie Verletzungen der Knochen (Brüche, Verrenkungen) nachzuweisen. Auch verwendet die Medizin die Röntgenstrahlen zu unmittelbaren Heilzwecken. Es werden Versuche gemacht, auch die radioaktive Strahlung denselben Zielen dienstbar zu machen.

**§ 3. Wärmetechnik. Optotechnik. Mechanik.** Die Wärmetechnik, welche Dampf-, Gas- und andere Maschinen anwendet, ist vollkommen auf der Ausnutzung von bestimmten physikalischen Erscheinungen aufgebaut, vor allem auf der Tatsache, daß die Wärme eine Energieform darstellt und folglich Arbeit zu leisten vermag. Natürlich haben wir es hier nicht wie in der Elektrotechnik mit der Ausnutzung einer oder mehrerer Entdeckungen zu tun, die man bestimmten Forschern zuschreiben könnte. Andererseits hätte aber die Dampftechnik nicht die hohe Entwicklung erreichen können, die der Geschichte der Zivilisation des 19. Jahrhunderts ihren Stempel aufgedrückt hat, wenn nicht die experimentellen, von vielen Forschern durchgeführten Untersuchungen mit der notwendigen größten Ausführlichkeit die physikalischen Eigenschaften des Wasserdampfes geklärt und so den Boden geschaffen hätten, auf dem die spezielle Theorie der Dampfmaschinen entstehen konnte. Dasselbe bezieht sich auch auf andere Motoren, wie z. B. Gas- und Benzinmotoren. In § 3, siebentes Kapitel, haben wir gesehen, daß nur dank der Entdeckung des zweiten Prinzips das Wesen der Vorgänge in einer Dampfmaschine richtig verstanden werden konnte. Ohne eine beständige, planmäßige Mitarbeit der reinen Wissenschaft hätte die Dampftechnik sich nicht entwickeln können. Man braucht nur an Fabriken, Eisenbahnen und Dampfschiffe zu denken, um sich über die Bedeutung der Dampftechnik für die Menschheit im klaren zu sein. Wie groß auch die Verdienste der reinen Technik sind, nie hätte sie solche Resultate erzielt, wenn sie nicht stets auf die Hilfe der reinen Wissenschaft hätte rechnen können.

Auf Arbeiten und Versuchen von Physikern beruht die Möglichkeit, Luft und andere Gase zu verflüssigen und außerordentlich niedrige Temperaturen zu erreichen. Dem holländischen Forscher Kamerlingh-Onnes ist es gelungen, bis zu der Temperatur von  $-272,1^{\circ}\text{C}$  zu kommen.

Mit dem Namen Optotechnik bezeichnet man denjenigen Teil der Technik, der sich speziell mit der Herstellung von optischen Apparaten und Instrumenten befaßt. Solcher Apparate gibt es sehr viel, man kann aber sagen, daß sie zum großen Teil nicht allgemein bekannt sind, da die Zwecke, denen sie dienen, zu spezieller Natur sind. Es gehören hierher auch solche Apparate, die man bei bestimmten Untersuchungen auf dem Gebiete der physikalischen Erscheinungen benutzt, wie z. B. die verschiedenen Spektroskope, die bei Spektralstudien der verschiedenen Quellen der Strahlungsenergie verwandt werden. Die Einrichtung der optischen Apparate beruht vollkommen auf den Gesetzen der Lichterscheinungen, die von Forschern entdeckt worden sind, sowie auf rein mathematischen Untersuchungen, welche die Bedingungen klären, unter denen der betreffende Apparat seinen Zweck am besten erfüllt. So müssen z. B. viele optische Apparate, wie das Mikroskop, das Objektiv eines photographischen Apparates usw. Abbildungen von verschiedenen Gegenständen ergeben. Die auf den Gesetzen der physikalischen Erscheinungen beruhende Theorie stellt die Bedingungen fest, unter denen die Abbildungen klar und vor allem der Wirklichkeit entsprechend, also nicht verzerrt ausfallen. Neben komplizierten mathematischen Berechnungen müssen hier sorgfältige und allseitige Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften jener Glasarten, zuweilen auch anderer durchsichtiger Stoffe (z. B. Quarz) experimentell ausgeführt werden, aus denen Bestandteile der optischen Apparate hergestellt werden sollen. Hier hängt die Technik vollkommen von den Mitteilungen ab, die ihr die reine Wissenschaft als Resultat ihrer experimentellen und theoretischen (mathematischen) Untersuchungen liefert.

Von den allgemein bekannten und weitverbreiteten optischen Apparaten erwähnen wir die Brille, Fernrohre; Ferngläser, astronomische Teleskope, Lupen, Mikroskope, photographische Objektive und Projektionsapparate. Aus der enormen Zahl der weniger bekannten, jedoch auch sehr verbreiteten, nennen wir den Augenspiegel, der zur Untersuchung der inneren Teile des Auges dient und das Saccharimeter, mit dem man den prozentualen Gehalt an Zucker in einer beliebigen Flüssigkeit feststellen kann.

Auf den chemischen Wirkungen des Lichtes (S. 142), die wiederum von der reinen Wissenschaft entdeckt und erforscht wurden, beruht die Photographie und die sehr populäre Kinematographie, deren Bedeutung viel größer ist als man glaubt, indem man ihr nur Vergnügungszwecke zuschreibt. Mit jedem Tage wächst ihr Anwendungsgebiet als Lehrmethode, und außerdem spielt der Kinematograph die Rolle eines rein wissenschaftlichen Apparates, indem er zur Zergliederung und Detaillierung von Erscheinungen dient, die zu schnell verlaufen, als daß sie in allen ihren Phasen unmittelbar beobachtet und erforscht werden könnten. In dieser Hinsicht hat der Kinematograph bereits die wertvollsten Dienste geleistet.

Auf der Mechanik, in etwas erweitertem Sinne des Wortes, ist ein großer Teil der Technik, besonders wenn man zu derselben auch die Baukunst zählt, begründet. Hier ebnet die reine Wissenschaft in zwei Richtungen den Boden, auf dem die Technik fußt. Erstens hat sie die Gesetze der Mechanik der festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe entdeckt und gezeigt, wie sie anzuwenden sind. Diese Gesetze verwendet die Technik fortwährend, sei es bei der Konstruktion von allerlei Maschinen oder beim Bau von Eisenbahnstrecken (besonders in gebirgigen Gegenden), Schiffen, Luftschiffen, Flugzeugen usw. Nicht weniger wichtig ist die zweite Richtung. Die Physik hat Methoden ausgearbeitet, nach denen eine sorgfältige und allseitige Untersuchung der Eigenschaften von verschiedenen Stoffen oder, wie man sagt, Materialien, die von der Technik und der Baukunst verwandt werden, ermöglicht wird. Hierher gehört die besonders wichtige Untersuchung des Widerstandes, den die Materialien der Wirkung von verschiedenen äußeren Kräften entgegensetzen. Solchen Kräften sind Materialien unterworfen, aus denen Maschinen und allerlei Gebäude gebaut werden. Es ist unbedingt erforderlich, daß die Formänderungen, wie z. B. Verbiegung, Dehnung und Verdrehung, denen die Teile einer Maschine, einer Brücke oder einer anderen Baulichkeit unterliegen, gewisse Grenzen nicht überschreiten und die Maschine, Brücke usw. nicht der Gefahr aussetzen, daß sie bei einer längeren Einwirkung von Kräften, denen sie ja unterworfen sind, sofern sie ihren Zweck erfüllen sollen, der Zerstörung anheimfallen.

Zum Schluß erwähnen wir noch zwei Apparate, die allen bekannt sind: das Thermometer und das Barometer. Zur genauen Messung von sehr hohen Temperaturen benutzt man die Pyrometer, von denen die besonders wichtigen auf Resultaten beruhen, welche die Untersuchung der Strahlung stark erhitzter Körper liefert. Die Pyrometrie spielt auf vielen Gebieten der Technik eine große Rolle. Dazu kann man vielleicht auch das weniger verbreitete, doch sehr wichtige Hygrometer zählen, mit dem der Feuchtigkeitsgrad der Luft bestimmt wird.

**§ 4. Schlußbetrachtung.** Auf die Frage, was denn die Physik der Menschheit in ihrem Streben nach Bequemlichkeit gegeben hat, antworten wir kurz: fast alles, was die Grundlage der modernen Zivilisation bildet. Zur Bekräftigung dieser Worte nennen wir nochmals die Errungenschaften derselben. Der gewöhnliche Telegraph, der drahtlose Telegraph, das Telephon und das Mikrophon, die Dynamomaschinen, die elektrische Beleuchtung, die Elektromotoren, die elektrische Straßenbahn, die Galvanostegie und Galvanoplastik, Bearbeitung von Erzen, Reinigung von Metallen, Gewinnung von Stickstoffprodukten aus der Luft, Dampf-, Gas- und Benzinmotoren, moderne Eisenbahnen und Dampfschiffe, Brillen, Fernrohre, Ferngläser, Teleskope, Lupen, Mikroskope, die Photographie, der Kinematograph, die Mechanik, der größte Teil der Technik und der Baukunst, die Untersuchung der Eigenschaften von verschiedenen Stoffen, darunter die des Widerstandes der Materialien, das Thermometer und das Barometer, ganz zu schweigen von kleineren Erfindungen, die gleichfalls auf Entdeckungen der Physik beruhen.

## Schluß.

Was hat die Physik der Menschheit gegeben und was gibt sie ihr noch ? Unter ihrer kraftvollen Führung schreitet die Menschheit vorwärts auf dem Wege, der zu den zwei ersehnten Zielen führt, zur Erkenntnis und zu der Bequemlichkeit im weiten Sinne des Wortes, die heute als Grundlage und Unterpfand der Kultur dient. Indem sie alles umfaßt, was zur unbelebten Natur gehört, hat die Physik ihre Aufgabe glänzend gelöst, indem sie die Menschheit mit Kenntnissen auf dem Gebiete des Seins und Geschehens, die unseren Sinnesorganen unzugänglich sind, bereicherte. Ganz allmählich lüftet sie den Schleier vor der Wahrheit, sie nähert sich derselben immer mehr, mit immer sichererer Hand zeichnet sie ihre Konturen und tritt auch an die Einzelheiten heran. Aus ihrer reichen Schatzkammer schöpfen die anderen Wissenschaften und finden in ihr fertige Waffen zum Kampfe um die Wahrheit und die Erkenntnis. Als kostbare Früchte erstehen auf dem Boden ihrer Entdeckungen unzählige Erfindungen, die der Menschheit jene Bequemlichkeiten verleihen, welche zur Höhe der modernen Kultur geführt haben.

Auf dem stolz wehenden Banner, das die Physik hochhält, indem sie im Vertrauen auf ihre Kraft auf dem Wege zur Wahrheit vorwärtsschreitet, steht das Wort ihrer Sehnsucht: „Erkenntnis“. In ihren Fußtapfen aber schreitet die Technik, die ihre Entdeckungen ausnutzt und der Menschheit die Erfindungen und Bequemlichkeiten schenkt, ohne die sie nicht mehr leben kann. Als ihre Urquelle ist mithin die Physik zu betrachten.

**Entdeckungen und Erfindungen, Erkenntnis und Bequemlichkeit** — das sind die Gaben, die die Physik der dankbaren Menschheit darbringt.

Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig

# Lehrbuch der Physik

Von

Prof. O. D. Chwolson

Zweite verbesserte und vermehrte Auflage

Herausgegeben von

Prof. Dr. Gerhard Schmidt

Münster i. W.

- I. Band, 1. Abteilung. Mechanik und Meßmethoden.  
Mit 185 Abbildungen. XII, 384 S. gr. 8°. 1918.  
*ℳ* 12,50, geb. *ℳ* 14,50.
- I. Band, 2. Abteilung. Die Lehre von den gasförmigen, flüssigen und festen Körpern. Mit 180 Abbildungen. X, 424 S. gr. 8°. 1918.  
*ℳ* 14,—, geb. *ℳ* 16,—.
- II. Band, 1. Abteilung. Die Lehre vom Schall. Mit 93 Abbildungen. IX, 154 S. gr. 8°. 1919.  
*ℳ* 6,—, geb. *ℳ* 7,50.
- II. Band, 2. Abteilung. Die Lehre von der strahlenden Energie. Mit 498 Abbildungen. XV, 894 S. gr. 8°. 1922.  
*ℳ* 30,—, geb. *ℳ* 34,—.
- III. Band, 1. Abteilung. Die Lehre von der Wärme. Mit 105 Abbildungen. VIII, 450 S. gr. 8°. 1922.  
*ℳ* 15,—, geb. *ℳ* 17,50.
- III. Band, 2. Abteilung. Die Lehre von der Wärme. Mit 110 Abbildungen. VII, 460 S. gr. 8°. 1923.  
*ℳ* 15,50, geb. *ℳ* 18,—.

Der Schlußband IV ist in Vorbereitung