

Die Physik und ihre Bedeutung für die Menschheit

von

Professor O. D. Chwolson

Aus dem Russischen übersetzt von Georg Kluge

Mit 33 Abbildungen. VII, 277 gr. 8^o. 1924

ℳ 10,80, gebunden ℳ 12,50

- Angerer**, Dr. Ernst v., **Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen.** Mit 11 Abbildungen. VIII, 116 S. 8^o. 1924. (*Sammlung Vieweg, Heft 71.*) ℳ 4,—.
- Becker**, Dr.-Ing. Karl und Fritz **Ebert**, **Metallröntgenröhren** (Wirkungsweise — Anlage — Betrieb). Mit 34 Abbildungen. V, 62 S. 8^o. 1925. (*Sammlung Vieweg, Heft 75.*) ℳ 3,60.
- Berger**, Dr. Franz, **Das Gesetz des Kraftverlaufs beim Stoß.** Untersuchungen über die gesetzmäßigen Beziehungen beim Stoß elastischer Körper. Mit 67 Abbildungen. VII, 92 S. 8^o. 1924. ℳ 9,—, geb. ℳ 12,—.
- Berndt**, Prof. Dr. G., **Radioaktive Leuchtfarben.** Mit 28 Abbildungen im Text und auf einer Tafel. IV, 108 S. 8^o. 1920. (*Sammlung Vieweg, Heft 47.*) ℳ 4,—.
- Bohr**, Prof. Niels, **Abhandlungen über Atombau aus den Jahren 1913 bis 1916.** Autorisierte deutsche Übersetzung mit einem Geleitwort von N. Bohr von Dr. Hugo Stintzing. XIX, 156 S. 8^o. 1921. ℳ 6,—.
- **Über die Quantentheorie der Linienspektren.** Übersetzt von P. Hertz. Mit einem Vorwort des Verfassers. IV, 167 S. 8^o. 1923. ℳ 5,—.
- **Drei Aufsätze über Spektren und Atombau.** 2. Auflage. Mit 13 Abbildungen. VI, 150 S. 8^o. 1924. (*Sammlung Vieweg, Heft 56.*) ℳ 5,—.
- Buchwald**, Prof. Dr. E., **Das Korrespondenzprinzip.** Mit 28 Abbildungen. VI, 127 S. 8^o. 1923. (*Sammlung Vieweg, Heft 67.*) ℳ 5,50.
- Eddington**, A. S., **Raum, Zeit und Schwere.** Ein Umriß der allgemeinen Relativitätstheorie. Ins Deutsche übertragen von W. Gordon. Mit 19 Abbildungen. VII, 204 S. 8^o. 1923. (*Die Wissenschaft, Band 70.*) ℳ 6,50, geb. ℳ 8,—.
- Einstein**, Prof. Dr. A., **Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie.** Gemeinverständlich. 14. Auflage. Mit 4 Abbildungen. IV, 91 S. 8^o. 1922. (*Sammlung Vieweg, Heft 38.*) ℳ 3,—.
- Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie, gehalten im Mai 1921 an der Universität Princeton. 2. Auflage. Mit 4 Abbild. 70 S. gr. 8^o. 1923. ℳ 2,50.
- Fürth**, Dr. Reinhold, **Schwankungserscheinungen in der Physik.** Mit 5 Figuren. VIII, 93 S. 8^o. 1920. (*Sammlung Vieweg, Heft 48.*) ℳ 3,50.
- Geiger**, H. und W. **Makower**, **Meßmethoden auf dem Gebiete der Radioaktivität.** Mit 61 Abbild. IX., 156 S. 8^o. 1920. (*Die Wissenschaft, Bd. 65.*) ℳ 5,50, geb. ℳ 7,—.
- Geitler**, Prof. Dr. Josef, **Elektromagnetische Schwingungen und Wellen.** 2. Auflage. Mit 113 Abbild. IX, 218 S. 8^o. 1921. (*Die Wissenschaft, Bd. 6.*) ℳ 7,50, geb. ℳ 9,—.
- Goetz**, Dr. A., **Physik und Technik des Hochvakuums.** Mit 69 Abbild. VIII, 144 S. 8^o. 1922. (*Sammlung Vieweg, Heft 64.*) ℳ 5,—.
- Grammel**, Dr. R., **Der Kreisler, seine Theorie und seine Anwendungen.** Mit 131 Abbildungen. X, 350 S. gr. 8^o. 1920. ℳ 10,50.
- de Haas-Lorentz**, Dr. G. L., **Die Brownsche Bewegung und einige verwandte Erscheinungen.** Von der Verfasserin ins Deutsche übersetzt. 103 S. 8^o. 1923. (*Die Wissenschaft, Band 52.*) ℳ 3,50.

Die Evolution des Geistes der Physik 1873–1923

Von

O. D. Chwolson

Prof. ord. an der Universität in Leningrad

Aus dem Russischen übersetzt von

V. R. Bursian

Professor am Polytechnikum in Leningrad



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

ISBN 978-3-663-06091-8 ISBN 978-3-663-07004-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-07004-7

Alle Rechte vorbehalten.

Vorrede zur russischen Ausgabe.

In diesem Buche will ich ein Bild der Evolution entwerfen, welche die Physik im Laufe der letzten 50 Jahre durchgemacht hat, d. h. während der Zeit, in welcher ich persönlich die Entwicklung dieser Wissenschaft nach Möglichkeit verfolgt habe. Vor allem aber versuche ich es, eine wichtigere, interessantere und schwierigere Aufgabe zu lösen, nämlich festzustellen, in welcher Richtung der Geist der Physik sich in diesem Zeitraum wesentlich verändert hat. Neben dem Charakter der Evolution betrachte ich daher die Evolution des Charakters, des Geistes der Physik. Das Hauptmerkmal dieser Evolution sehe ich in dem Auftreten von unverständlichen Hypothesen; solche waren in der alten Physik nicht vorhanden.

Ich glaube, die jüngeren Physiker werden mit meinen Ansichten nicht zufrieden sein. Ich befürchte, daß sie nicht verstehen werden, womit ich eigentlich unzufrieden bin, was mir noch fehlt, woher ich nicht bloß entzückt bin über die großen Erfolge, die neuen Entdeckungen und Theorien, sondern zugleich mit einer ernsten Kritik hervortrete. Für sie ist die Maxwell'sche Theorie das A b c der Physik; ohne diese Theorie, an welche sie sich so vollständig gewöhnt haben, daß sie ihre dunklen Seiten übersehen, können sie sich die Physik gar nicht vorstellen. Und doch ist gerade durch diese Theorie jener neue Geist in die Physik eingedrungen, welcher sich in breitem Strome über alle ihre Abschnitte ergossen hat. Wir möchten die Hoffnung nicht aufgeben, daß dieser neue Geist recht bald aus der Physik wieder verschwinden wird.

Petrograd, 31. Dezember 1923.

O. Chwolson.

Vorrede zur deutschen Ausgabe.

In der Vorrede zur russischen Ausgabe ist alles Wesentliche gesagt und nur auf einen Umstand möchte ich hier noch hinweisen. Das eigentliche Thema, die Evolution des Geistes der Physik, nimmt in diesem Buche einen relativ nur geringen Raum ein (Kap. VI und VIII); der Grund ist leicht einzusehen. Es mußte zuerst ganz allgemein die Evolution der Physik während der letzten 50 Jahre geschildert werden und zu diesem Zwecke war eine, wenn auch kurze, aber präzise Darstellung der „Physik vor 50 Jahren“ unvermeidlich. Erst der Vergleich alles dessen, was einst war, mit dem, was neu hinzugekommen ist, konnte zeigen, welche Veränderung nicht nur des tatsächlichen Inhalts, sondern auch des Geistes der Physik stattgefunden hat.

Einige Zusätze habe ich in die deutsche Ausgabe eingeführt.

Mein verehrter Kollege, Herr Professor V. R. Bursian, hat die Übersetzung in ausgezeichneter Weise durchgeführt und mich dabei auf die Notwendigkeit, verschiedene Stellen zu verbessern, aufmerksam gemacht. Ich möchte ihm auch hier meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Leningrad, im August 1925.

O. Chwolson.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Kapitel I. Einleitung.	
§ 1. Das Thema dieses Buches	1
§ 2. Das Verhältnis der Geschichte des letzten halben Jahrhunderts zur gesamten Geschichte der Physik	4
Kapitel II. Die Physik vor 50 Jahren.	
§ 1. Die Atomtheorie	9
§ 2. Die Mechanik	11
§ 3. Das Gesetz der Erhaltung der Energie	13
§ 4. Die kinetische Theorie der Materie	18
§ 5. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	26
§ 6. Theorie des Lichtes	38
§ 7. Die Spektralanalyse	51
§ 8. Die Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus	55
§ 9. Die Experimentierkunst. Die Elektrotechnik. Schluß	64
Kapitel III. Was konnte sich im Verlauf der letzten 50 Jahre nicht ändern?	
§ 1. Einleitung	67
§ 2. Gegenstand und Aufgabe der Physik. Entdeckung und Erforschung der Erscheinungen	69
§ 3. Die Erklärung der physikalischen Erscheinungen. Der Aufbau physikalischer Theorien	74
Kapitel IV. Die neue Physik als Erweiterung der alten.	
§ 1. Einleitung	79
§ 2. Neue Tatsachen. Die Molekularphysik	81
§ 3. Neue Tatsachen. Die Lehre von den Wärmeerscheinungen	86
§ 4. Neue Tatsachen. Die Lehre von der Strahlung	88
§ 5. Neue Tatsachen. Magnetische Erscheinungen	100
§ 6. Neue Tatsachen. Elektrische Erscheinungen	106
§ 7. Die Experimentierkunst	115
§ 8. Die Vertiefung des Verständnisses	119
Kapitel V. Neue Theorien im alten Geiste.	
§ 1. Einleitung. Die Elektronen	126
§ 2. Die Lehre von den Lösungen. Die Elektrolyse. Die Nernstsche Theorie des galvanischen Elementes	128
§ 3. Noch einige wichtige neue Theorien	131

	Seite
Kapitel VI. Neue Theorien in neuem Geiste.	
§ 1. Einleitung	133
§ 2. Die Theorie von Maxwell	134
§ 3. Die elektromagnetische Lichttheorie	139
§ 4. Die Strahlungstheorie und die Entstehung der Quantenlehre	143
§ 5. Einige Anwendungen der Quantentheorie	148
§ 6. Der Atombau und die Theorie von Niels Bohr	154
§ 7. Bohrs Theorie (Fortsetzung)	159
§ 8. Das Quanteln. Sommerfelds Erklärung der Entstehung der Satelliten von Spektrallinien	163
§ 9. Atombau (Fortsetzung)	167
§ 10. Die Relativitätstheorie	173
Kapitel VII. Das Fazit. Der Fortschritt	181
Kapitel VIII. Das Fazit. Der Rückschritt.	
§ 1. Wissen und Verstehen	184
§ 2. Die Maxwellsche Theorie und die elektromagnetische Welt- auffassung	187
§ 3. Die Plancksche Konstante h , die Bohrsche Theorie und die Quantelung	189
§ 4. Noch einige dunkle Punkte	192
§ 5. Der Geist der Evolution und die Evolution des Geistes . . .	194
§ 6. Eine mögliche Ursache des Auftretens unverständlicher Hypo- thesen	196

Kapitel I.

Einleitung.

§ 1. Das Thema dieses Buches. Im vorliegenden Buche stelle ich mir die Aufgabe, eine nach Möglichkeit allseitige Darstellung des Charakters der Evolution der Physik zu geben, welche die letztere im Verlaufe der fünfzig Jahre, während derer ich selbst ihre märchenhafte Entwicklung verfolgen konnte, erfahren hat. Diese Entwicklung bestand nicht nur in der Erweiterung und Vertiefung schon früher vorhandener und im Entstehen gänzlich neuer Abschnitte der Physik, sondern auch in einer ganzen Reihe von tiefgehenden Umwälzungen, welche von einer Änderung der Grundlagen und von einer Umarbeitung großer Abschnitte dieser Wissenschaft begleitet waren. Ich beabsichtige keineswegs, eine Geschichte der Physik der letzten 50 Jahre zu schreiben, obgleich ich selbstverständlich alle wichtigeren Ereignisse, d. h. neuentdeckte Erscheinungen und neue Theorien der verschiedenen Erscheinungsgruppen, mehr oder weniger ausführlich werde besprechen müssen. Doch will ich mich bemühen, das Hauptgewicht nicht auf die Darstellung historischer Tatsachen, sondern auf die Charakteristik jener Evolution der Wissenschaft zu legen, deren äußerliches Kennzeichen diese zahlreichen und mannigfaltigen Tatsachen bilden. Ich will die „alte“ Physik von 1873 mit der „neuen“ Physik von 1923 vergleichen, und den Versuch machen, aufzuklären, worin sich diese zwei Wissenschaften ihrem Wesen nach unterscheiden, warum sie eine so geringe Ähnlichkeit aufweisen, welche Änderung in den Methoden der schöpferischen Forschungsarbeit der Gelehrten vor sich gegangen ist, und zwar eine Änderung nicht so sehr der experimentellen als vielmehr jener theoretischen Methoden, welche es mit der Erforschung der verborgenen Ursachen der beobachtbaren Erscheinungen zu tun haben.

Offenbar werde ich vor allen Dingen, wenn auch in großen Zügen, den Inhalt der Physik von 1873 zu schildern haben, und die wichtigsten und charakteristischsten Kennzeichen dieser Wissenschaft zu jener Zeit, welche in jeder Hinsicht uns bereits so fern liegt, vorführen müssen. Darauf werde ich die wichtige Frage zu erörtern haben, was sich in diesem halben Jahrhundert nicht verändert hat, was sich nicht verändern konnte, weil es das Wesen der Physik als Wissenschaft bestimmt. Hier müssen wir alle diejenigen Grundzüge zusammenstellen, ohne welche die Physik aufhören würde, „Physik“ zu sein. Die kritische Betrachtung der historischen Tatsachen der letzten 50 Jahre wird uns weiterhin ermöglichen, den Charakter der vor sich gegangenen Evolution aufzudecken und den Geist der modernen, neuen Physik mit dem Geiste der alten Physik aus dem Anfang der siebziger Jahre des verflossenen Jahrhunderts zu vergleichen. Neben den Charakter oder den Geist der Evolution stellen wir die Evolution des Geistes der Physik.

Zweimal haben wir die „alte“ und die „neue“ Physik einander gegenübergestellt. Selbstverständlich kann von einer scharfen Grenze zwischen ihnen keine Rede sein; man kann kein bestimmtes Datum angeben, von welchem das Zeitalter der neuen Physik zu rechnen sei. Die Evolution ist allmählich vor sich gegangen. Doch kann man wohl einen solchen Zeitpunkt in der Geschichte der Physik angeben, in welchem eine außerordentlich große Entdeckung sozusagen das Steuer gewendet und dem Fortschritte eine neue Bahn gewiesen hat. Wir meinen die Entdeckung der elektrischen Strahlen (welche heutzutage in der drahtlosen Telegraphie verwendet werden) im Jahre 1887 durch den großen, frühzeitig verstorbenen deutschen Forscher Heinrich Hertz. Die Bedeutung dieser Entdeckung bestand, wie wir sehen werden, nicht so sehr darin, daß die Wissenschaft eine ihr bis dahin noch unbekannte Erscheinung kennen lernte, sondern vielmehr darin, daß diese Erscheinung als unwiderlegbarer Beweis der Richtigkeit jener Grundvorstellungen angesehen werden mußte, auf welchen der, ebenfalls frühverstorbene, große englische Forscher J. C. Maxwell die elektromagnetische Theorie des Lichtes aufgebaut hatte. Diese Theorie war von ihm bereits in den sechziger Jahren ausgearbeitet worden, doch hat sie zwei Jahrzehnte hindurch aus verschiedenen Gründen die Aufmerksamkeit der Gelehrten nicht in gebührendem Maße auf sich gelenkt. Die Hertzschen Versuche gaben, wie wir sehen werden, jenem großen Lehrgebäude den Todesstoß, nach welchem

das Licht eine rein mechanische Schwingungsbewegung sein sollte, deren Ausbreitung in einem besonderen, das Weltall erfüllenden Medium, dem Äther, stattfindet. Im folgenden werden wir das Wesen und die Geschichte der Blütezeit dieser Lehre eingehender zu schildern haben. Die Versuche von Hertz setzten an ihre Stelle die neue, Maxwellsche Lehre, welche von der ersteren sich nicht nur in den konkreten, rein physikalischen Ausgangsvorstellungen, sondern auch — und das ist viel wichtiger — in der abstrakten Denkmethode unterscheidet, in jener Weltauffassung, welche ihren wesentlichen Charakterzug bildet. Wir haben deshalb auch das Recht, den Zeitpunkt der Entdeckung der elektrischen Wellen als Moment eines Umschwungs in der Geschichte der Physik, als den Geburtstag der neuen Physik zu betrachten. Allerdings kann bei der Geburt, d. h. beim ersten Auftreten einer Idee, ihr wahrer Sinn und ihre historische Tragweite von den Zeitgenossen im vollen Umfange nicht erfaßt werden; erst die weitere Entwicklung der Physik hat gezeigt, daß diese Wissenschaft einen neuen Weg eingeschlagen hat, daß die neue Physik von der alten durch eine tiefe Kluft getrennt ist. Daß die Hertzschen Versuche und der durch sie herbeigeführte Triumph der Maxwellschen Theorie die Rolle des Samenkornes gespielt haben, aus welchem der großartige Bau der modernen, neuen Physik erwachsen ist, das sieht man erst aus einem Rückblick auf die Geschichte der Physik und aus einer eingehenden Betrachtung der tieflegendsten und wesentlichsten Züge ihrer stürmischen Weiterentwicklung. Um das innere Wesen der Evolution, welche in den letzten 50 Jahren vor sich gegangen ist, klar zu erkennen, muß man die Physik des Anfangs der siebziger Jahre des 19. Jahrhunderts mit der Physik des Anfangs der zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts vergleichen.

Diesen Vergleich auszuführen — ist gerade die Hauptaufgabe, welche wir lösen wollen, und zwar mit voller Aufrichtigkeit. Damit ist gemeint, daß wir uns nicht darauf beschränken wollen, jene Lichtseiten der Physik hervorzuheben, welche in der Entdeckung neuer Tatsachen und in der Entwicklung neuer Theorien bestehen, und auf welche die Menschheit mit Recht stolz sein kann; nein, wir fühlen uns verpflichtet, auch auf die Schattenseiten der Evolution der Physik hinzuweisen, deren Entstehung uns als ein bedauerlicher Rückschritt erscheint. Dieses Urteil werden wir eingehend begründen, damit der Leser nicht vermuten sollte, daß die Erwähnung von „Schattenseiten“ dem hohen Alter des Verfassers (geb. 1852) zuzuschreiben sei, welcher vom Altgewohnten sich nicht

trennen will und den neuen Errungenschaften der Wissenschaft, den wesentlich neuen Erklärungsmethoden und der Neuartigkeit des Materials, aus welchem heutzutage physikalische Theorien aufgebaut werden, kein Vertrauen oder vielleicht sogar kein richtiges Verständnis entgegenbringen kann. Wir wollen es versuchen, zu beweisen, daß ein solches Mißverständnis oder gar ein derartiger Vorwurf nicht gerechtfertigt wären.

§ 2. Das Verhältnis der Geschichte des letzten halben Jahrhunderts zur gesamten Geschichte der Physik. Die Geschichte der Physik als Wissenschaft beginnt im Altertume; damals wurden die Grundzüge der praktischen Mechanik festgelegt und eine, wenn auch geringe Anzahl von Erscheinungen entdeckt, welche auch jetzt noch mit den Namen von Archimedes, Heron und einigen anderen in Verbindung gebracht werden. Im Mittelalter (arabische Gelehrte in Spanien) und in der Neuzeit, besonders im 17. und 18., sowie auch im Anfange des 19. Jahrhunderts wuchs die Physik zu einer umfangreichen Wissenschaft an, deren Darstellung viele Bände erforderte. Und doch kann man sagen, daß das letzte Halbjahrhundert (1873—1923), dessen Charakteristik dieses Buch gewidmet ist, die Hälfte, oder sagen wir fast die Hälfte der ganzen Geschichte jener Wissenschaft, welche jetzt unter dem Namen „Physik“ verstanden wird, umfaßt. Um Mißverständnissen vorzubeugen, wollen wir uns etwas genauer ausdrücken. Denken wir uns noch um ein halbes Jahrhundert zurückversetzt, d. h. ins Jahr 1823. Die soeben aufgestellte Behauptung, welche, wie oben angedeutet, natürlich nicht buchstäblich gemeint ist, soll zum Ausdruck bringen, daß alles das, was vor 1823 geleistet war, im Vergleich zu dem, was die Physik in den letzten hundert Jahren gegeben hat, und was jetzt ihren Inhalt vorstellt, einen verschwindenden Bruchteil bildet. Die Physik bis 1823 ist ein Vorspiel zur großen wissenschaftlichen Symphonie oder auch nur ein Stimmen der Musikinstrumente, welches nichts Einheitliches vorstellt und dem wirklichen Spiel des Orchesters vorausgeht. Wir geben zu, daß wir uns eine gewisse Ungenauigkeit zuschulden kommen lassen; dieselbe ist aber nicht sehr groß, und verschwindet, wenn wir zum angegebenen Zeitraum von hundert Jahren noch etwa zehn oder fünfzehn Jahre hinzufügen. Infolgedessen bilden die letzten fünfzig Jahre nur etwas weniger als die Hälfte jener Periode der Geschichte der Physik (1808—1923), bezüglich welcher wir die gesamte Vorgeschichte einwandfrei als Vorspiel oder Stimmen der Instrumente bezeichnen können. Man kann das Gesagte praktisch nachprüfen, wenn man

ein beliebiges modernes Lehrbuch der Physik oder besser eine Sammlung von Lehrbüchern der verschiedenen Teile der Physik durchblättert, und nachsieht, ob sich darin viele Zitate von wissenschaftlichen Arbeiten aus der Zeit vor 1823 oder gar vor 1808 vorfinden. Dabei müssen wir aber einen Teil von unseren Betrachtungen vollständig ausschließen, welcher jetzt gewöhnlich als Einführung in die Physik dient, nämlich die Mechanik. Das ist eine große, selbständige Wissenschaft, welche zusammen mit der Elastizitätstheorie und der Hydrodynamik (Lehre von der Bewegung der Flüssigkeiten) ein Ganzes bildet. Man darf sie nicht als einen Teil der Physik betrachten, denn ihrem Charakter und Wesen nach ist sie fast nur Mathematik. Die Physik braucht sie und kann ohne sie nicht bestehen, ebenso wie sie die gewöhnliche, reine Mathematik gebraucht, und ohne die letztere sich nicht weiterentwickeln kann. Die Mechanik, von Newton geschaffen und in kurzer Zeit zur hohen Vollendung gelangt, ist ein Werkzeug der Physik. In den elementaren Lehrbüchern der Physik muß selbstverständlich ein der elementaren Mechanik gewidmetes Kapitel Platz finden, doch könnte in den großen Universitätslehrbüchern der Physik die Mechanik vollständig ausgelassen werden, und nur anderweitige, rein praktische Gesichtspunkte können die Verfasser solcher Lehrbücher bewegen, eine gewisse, manchmal sogar recht beträchtliche Anzahl von Seiten den Grundlagen der Mechanik zu widmen. Etwas ganz anderes ist die neue Mechanik, welche im laufenden 20. Jahrhundert entstanden ist. Das ist schon reine Physik, doch handelt es sich nicht um diese Mechanik, wenn wir über die Physik des Anfangs des 19. Jahrhunderts sprechen.

Nachdem wir so die Mechanik ausgeschlossen haben, überzeugen wir uns leicht, daß die ganze Physik von 1823 und erst recht die von 1808, ein Vorspiel zu jener großen wissenschaftlichen Symphonie bildet, als welche uns die Geschichte der Physik der letzten 100—115 Jahre erscheint, und daß wir wirklich, ohne den Tatsachen großen Zwang anzutun, sagen können, daß das letzte uns hier interessierende Halbjahrhundert die Hälfte der Geschichte der Physik, so wie wir jetzt den Sinn und die Bedeutung dieser Wissenschaft verstehen, umfaßt.

Wir können uns leicht von der Richtigkeit dieses Gedankens überzeugen, wenn wir uns in Erinnerung rufen, aus welchen wesentlich verschiedenen Teilen der Inhalt der Physik sich zusammensetzt, oder, anders gesagt, welche ihrem Charakter nach verschiedene Seiten an dieser Wissenschaft zu finden sind. Es zeigt sich, daß wir vier

Seiten zu unterscheiden haben, welche wir am einfachsten durch folgende Schlagwörter bezeichnen können: 1. Erscheinungen, 2. Gesetzmäßigkeiten, 3. Theorien, 4. Experimentierkunst.

Wir wollen ganz kurz darauf hinweisen, welches Aussehen diese vier Seiten der Physik vor 100 oder vor 115 Jahren hatten.

1. Physikalische Erscheinungen. Die Grundtatsachen der Optik und der Wärmelehre waren zu jener Zeit bekannt; doch war jener schier unübersehbare Abschnitt der Physik, welcher jetzt den Hauptinhalt dieser Wissenschaft bildet, welcher die Optik, oder, besser gesagt, die Lehre von der Strahlung, absorbiert hat und heutzutage allmählich die Molekularphysik absorbiert — die Lehre vom elektrischen Strome —, nur im Keime vorhanden. Die Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel wurde von Oerstedt erst 1820 entdeckt. Die Strominduktion, durch Magnete und Ströme, von Faraday 1838 entdeckt, war ebenfalls nicht bekannt, wie ja überhaupt dieser größte Experimentator und Begründer so vieler und jetzt so wichtiger Kapitel der Physik seine Arbeit zu jener Zeit noch nicht begonnen hatte.

2. Physikalische Gesetzmäßigkeiten. Es genügt, darauf hinzuweisen, daß 1823 die zwei großen sogenannten Hauptsätze noch nicht bekannt waren, welche alle Erscheinungen der uns umgebenden Welt beherrschen und die Grundlage unserer Weltauffassung bilden: das Gesetz von der Erhaltung der Energie und der sogenannte zweite Hauptsatz der Thermodynamik, welcher auch unter dem Namen des Prinzips der Zerstreuung der Energie oder des Prinzips der Vermehrung der Entropie bekannt ist. Diese eine Tatsache genügt, um die Behauptung zu rechtfertigen, daß die Physik vor 1823 nur ein Vorspiel zu der Wissenschaft, welche jetzt diesen Namen trägt, bildete. Auch alle anderen Grundgesetze der modernen Physik sind nach 1823 gefunden worden. Wir wollen das Kirchhoffsche Gesetz anführen, aus dem die Spektralanalyse entsprungen ist, deren Bedeutung keiner Erörterung bedarf; des weiteren — die Faradayschen Gesetze der Elektrolyse, der Induktion von Strömen, und zahllose andere Gesetzmäßigkeiten, die allmählich im Verlaufe der letzten 100 Jahre entdeckt wurden und jetzt fast gleichmäßig über alle Kapitel der Physik verteilt zu finden sind.

3. Physikalische Theorien, d. h. Versuche der Erklärung verschiedener physikalischer Erscheinungen auf Grund bestimmter Hypothesen über die unserer unmittelbaren Beobachtung verborgenen Ursachen, welche die Urquellen der beobachteten Erscheinung bilden. Wenden wir uns vor allen Dingen zur Frage über den Aufbau der

Materie und der damit eng verbundenen Frage nach dem Wesen der chemischen Erscheinungen. Fast das ganze 18. Jahrhundert hindurch herrschte in der Chemie die Lehre vom Phlogiston, einem besonderen, etwa feuerartigen Stoffe, welcher bei der Oxydation der Metalle ausgeschieden werden sollte. Erst Lavoisier bewies, daß bei der Oxydation der Sauerstoff der Luft mit dem Metalle sich verbindet. Erst von diesem Zeitpunkte an entstand jene Wissenschaft, welche jetzt den Namen Chemie trägt. Eine feste Grundlage erhielt jedoch diese Wissenschaft erst seit der Einführung der Atomhypothese. Der Gedanke, daß die Materie aus einzelnen sehr kleinen Teilchen bestehe, welche Atome, d. h. „unteilbare“ genannt wurden, war bereits im Altertume vorhanden. Anaxagoras (500—428 v. Chr.) spricht über unzerstörbare und unveränderliche kleinste Teilchen, doch pflegt man gewöhnlich Demokrit (460—370 v. Chr.) als Urheber der Atomtheorie zu bezeichnen. Später haben Epikur (341—270 v. Chr.) und besonders Lukrez (96—55 v. Chr.), die Gedanken Demokrits über Atome weiter entwickelt. In der Folgezeit spielte im Verlaufe von etwa siebzehn langen Jahrhunderten die Atomtheorie keine merkbare Rolle; die Menschheit hatte sie sozusagen vergessen. Wiederbelebt hat sie erst Gassendi (1592—1655), welcher von Kräften spricht, die zwischen Atomen wirken, und die Verwandlung verschiedener Erscheinungsformen der Materie ineinander als Resultat der Umgruppierung verschiedener Atomsorten erklärte. Boyle (1627—1691) griff diese Gedanken auf und war der erste, welcher auf die Bedeutung der Atomtheorie für die Erklärung der chemischen Erscheinungen hinwies. Als wahren Begründer der modernen Atomtheorie muß man aber Dalton (1766—1844) anerkennen, welcher seine Lehre 1808 in der Schrift: „Neues System der Chemie“ darstellte. Somit haben wir das Recht, zu sagen, daß die Atomtheorie, die wichtigste Grundlage der Chemie und eine der wichtigsten Grundlagen der Physik, im Jahre 1808, d. h. 15 Jahre vor 1823, entstanden ist.

Doch hat die Atomtheorie, oder besser gesagt, Molekulartheorie ihre große Bedeutung für die Physik und für die Weltanschauung, welche auf dem Boden dieser Wissenschaft erwuchs, erst in Verbindung mit der kinetischen Theorie erhalten, welche letztere von der Voraussetzung ausgeht, daß die Atome und Moleküle im Zustande unaufhörlicher Bewegung sich befinden, und daß die Energie dieser Bewegung den Vorrat der Wärmeenergie des betreffenden Körpers bildet. Diese Theorie, welche das Wesen der Wärme erklärt, gewann in der Wissenschaft festen Fuß erst viel später als 1823.

Zur Erklärung des Wesens der Lichterscheinungen hatten Newton die Ausströmungstheorie (Emissionstheorie) und Huyghens die Theorie der mechanischen Ätherschwingungen geschaffen. Im Verlaufe des ganzen 18. Jahrhunderts herrschte die Emissionstheorie, und nur sehr wenige Forscher, darunter der Russe Lomonossoff und der Mathematiker Euler, waren ihre Gegner. Am Anfang des 19. Jahrhunderts verhalfen Young in England und Fresnel in Frankreich der Huyghensschen Theorie zu einer weitgehenden Entwicklung. Doch dauerte der Kampf zwischen den Anhängern der beiden Theorien noch lange fort, und erst in den dreißiger Jahren wurde die Ätherschwingungstheorie, welche so charakteristisch war für die „alte“ Physik, wie wir sie genannt haben, von allen Forschern angenommen, und wurde zu einem wesentlichen Charakterzug derjenigen Weltauffassung, welche bis zu den obenerwähnten Hertz'schen Versuchen die Physik beherrschte. Weitere Theorien, welche die moderne Physik charakterisieren, können wir hier übergehen; sie sind fast alle im Verlaufe der letzten 50 Jahre entstanden, viele, und dabei die wichtigsten, gehören dem 20. Jahrhundert an.

4. Die Experimentierkunst besteht vor allen Dingen in der Ausführung genauer Messungen verschiedener physikalischer Größen mittelst besonderer, passend konstruierter Apparate, welche beständig vervollkommenet werden. Eng verbunden damit ist die Kunst der wissenschaftlichen Bearbeitung jenes Rohmaterials, welches die Resultate der ausgeführten Messungen liefert. Schließlich gehört hierher noch die Kunst, mit Hilfe einer manchmal recht komplizierten Apparatur die erforderlichen Umstände zu schaffen, welche die zur Beobachtung der betreffenden physikalischen Erscheinung nötigen Bedingungen liefern. Von irgendwelchen genauen Messungen, mit Rücksichtnahme auf alle die Umstände, welche auf die Messungsergebnisse einwirken und dadurch ihre Genauigkeit beeinträchtigen könnten, kann vor 1823 keine Rede sein. Typische Beispiele dazu sind: die Messung des Ausdehnungskoeffizienten der Gase durch Gay-Lussac (1802) und die Messung der spezifischen Wärme derselben durch De la Roche und Bérard (1812). Der große Lehrer der Experimentalphysik, Regnault, welcher in einer langen Reihe von klassischen Arbeiten gezeigt hat, wie man physikalische Größen messen und die Resultate der Messungen einer wirklich wissenschaftlichen Bearbeitung unterwerfen soll, begann seine Arbeit erst in den dreißiger Jahren. Selbst solche Größen wie die Länge, d. h. der Abstand zweier Punkte, und das Gewicht von Körpern wurden bis 1823 noch sehr wenig genau gemessen. Die Meßapparate

jener Zeit konnten keine auch nur einigermaßen genaue Resultate geben.

Somit haben wir die vier Teile, aus denen der Inhalt der Physik besteht, betrachtet. Das Gesagte bestätigt in vollem Maße den von uns ausgesprochenen Gedanken, daß die Physik vor 1823 und erst recht die vor 1808 nur ein Vorspiel oder auch nur ein Stimmen der Instrumente war, deren Zusammenspiel sich erst vor etwa 100 Jahren zu einer großen und wunderbaren wissenschaftlichen Symphonie vereinigte. Daher können wir fast ungezwungen sagen, daß jene 50 Jahre, deren Charakteristik dieses Buch gewidmet ist, die Hälfte oder fast die Hälfte der Geschichte der Physik enthalten, so wie wir jetzt diese Wissenschaft, ihre Aufgaben und Methoden verstehen. Daraus ersieht man, daß wir die Ergebnisse zweier der Zeitdauer nach gleichen oder fast gleichen Zeitabschnitte der Geschichte der Physik gegenüberzustellen haben.

Wir beabsichtigen selbstverständlich nicht, die Geschichte der Physik des ersten halben Jahrhunderts (1823—1873) darzustellen; doch müssen wir unbedingt, wenn auch ganz kurz, die Errungenschaften dieses ersten Halbjahrhunderts in Erinnerung bringen, d. h. den wesentlichen Inhalt der verschiedenen Teile der Physik von 1873 und ihre wichtigsten und charakteristischsten Züge zu jener uns so fernliegenden Zeit darstellen. Sonst würden wir offenbar nicht imstande sein, zu zeigen, worin sich die Physik von 1923 von der Physik von 1873 unterscheidet.

Kapitel II.

Die Physik vor 50 Jahren.

§ 1. Die Atomtheorie. Die Grundlage der Chemie und eine der Grundlagen der Physik war vor 50 Jahren die Lehre von den Atomen und Molekülen; es wird genügen, wenn wir sie nur oberflächlich streifen. Es ist allgemein bekannt, daß es zweierlei Art chemisch reiner Stoffe gibt: einfache oder „Grundstoffe“ und zusammengesetzte oder chemische „Verbindungen“. Nicht homogene Stoffe, wie z. B. Mischungen von festen Stoffen, sowie Mischungen von Flüssigkeiten (Alkohol und Wasser) und Gasen, Lösungen und Legierungen schließen wir von unserer Betrachtung aus. Nebenbei

gesagt wird das Wort Stoff (Materie) ziemlich oft, wenn auch mit Unrecht, durch das Wort „Körper“ ersetzt. Man bezeichnet Kupfer, Kochsalz, Zucker — als feste Körper, Wasser, Alkohol, Äther — als flüssige Körper, Sauerstoff, Chlor, Kohlensäure — als gasförmige Körper. Strenggenommen sind das nicht Körper, sondern Stoffe. Ein einfacher Stoff oder Grundstoff (Element) ist aus untereinander vollständig gleichen Atomen zusammengesetzt. Wenn diese Atome nicht zu zwei oder zu drei miteinander verbunden sind, so nennt man einen solchen Grundstoff einatomig. Hierher gehören die Edelgase (Neon, Argon, Krypton, Xenon und Helium), die Dämpfe von Kalium, Natrium, Quecksilber, Kadmium und wahrscheinlich auch aller anderen Metalle. Man hat Grund anzunehmen, daß die Metalle auch im festen Zustande einatomig sind. Gase, wie Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Chlor sind zweiatomig; sie bestehen aus Molekülen, deren jedes zwei miteinander verbundene Atome enthält. Die chemischen Verbindungen bestehen aus Molekülen, von denen ein jedes Atome zweier, dreier, vierer oder mehrerer Grundstoffe enthält. Die Chemie, und zwar sowohl die organische als auch die anorganische, hatte zur betrachteten Zeit (um 1873) eine hohe Entwicklungsstufe erreicht. Ihre wichtigste Errungenschaft war damals das periodische System der Grundstoffe, das von D. Mendelejeff, einem der größten Forscher aller Zeiten, aufgestellt ist. Der wahre Sinn dieses Systems trat, wie wir später sehen werden, erst in jüngster Zeit (1913) zutage.

Mit beträchtlicher Genauigkeit waren schon damals die Atomgewichte der verschiedenen Grundstoffe bekannt, wobei als Einheit das Gewicht eines Wasserstoffatoms angenommen wurde. Das Atomgewicht eines Grundstoffes gibt somit an, wievielmals das Gewicht eines Atoms dieses Grundstoffes größer ist als das Gewicht eines Wasserstoffatoms. Einige Zahlenwerte von Atomgewichten werden später angeführt werden. Es ist wichtig zu bemerken, daß zu jener Zeit die Atome unbedingt als unteilbar, oder genauer gesagt, als unter keinen Umständen teilbar betrachtet wurden. Man hielt sie für die kleinsten Teilchen des betreffenden Stoffes und stellte sie sich unwillkürlich als sehr kleine Kügelchen vor, welche ihrem Wesen nach voneinander verschieden sein sollten. Man dachte sich, daß z. B. ein Kupferatom sich eben dadurch von einem Schwefelatom unterscheidet, daß das erstere ein kleinstes Stückchen Kupfer ist, und als solches aus Kupfer besteht, das andere aber aus Schwefel. Die Zahl der damals bekannten Grundstoffe belief sich auf etwa 75. Somit wurde angenommen, daß die uns umgebende und

unserer Beobachtung zugängliche Welt ein Gewebe von einer großen Zahl, nämlich etwa 75, wesentlich voneinander verschiedener Stoffe sei, welche als Urstoffe auftreten. Diese Annahme entspricht einer sehr verwickelten und daher wenig befriedigenden Weltauffassung, weit entfernt von jenem Ideal, welches schon seit langer Zeit der Menschheit vorschwebte und ihr die Überzeugung einflößte, daß die Grundlagen, auf denen die Welt erbaut ist, sehr einfach sein müssen.

Es ist klar, daß bei der damaligen Auffassung der Atome die Frage nach irgendeiner Struktur des Atoms und die offenbar damit verbundene Frage nach der Möglichkeit eines Atomzerfalles nicht entstehen konnte. Um so weniger war der Gedanke über die Möglichkeit der Verwandlung der Grundstoffe ineinander zulässig. Der alte Traum der Alchemie mußte als unerfüllbar und lächerlich erscheinen, da ja die Atome verschiedener Grundstoffe Kerne von wesentlich verschiedenen Stoffen sein sollten.

§ 2. Die Mechanik. Wir haben schon oben darauf hingewiesen, daß die Mechanik, d. h. die Lehre von der Bewegung und den Kräften, schon zu Anfang des 19. Jahrhunderts zu einer hohen Entwicklungsstufe gelangt war, und wir haben es nicht nötig, darüber zu sprechen, was zu ihr bis zum betrachteten Zeitpunkte (1873) noch hinzugekommen ist. Wir wollen nur erwähnen, daß zu jener Zeit die Elastizitätstheorie der festen Körper und die Hydrodynamik, d. h. die Lehre von der Bewegung von Flüssigkeiten, sich in hohem Maße weiter entwickelt hatten.

Wir wollen dann noch bemerken, daß die Entwicklung der Akustik, d. h. der Lehre vom Schall, zu jener Zeit als fast abgeschlossen betrachtet werden konnte, und zwar nicht nur in denjenigen Teilen, welche im wesentlichen Abschnitte der Elastizitätstheorie sind. Die Arbeiten von H. Helmholtz, welche das Wesen der sogenannten Klangfarbe aufklärten und die Analyse und Synthese der den verschiedenen Vokalen entsprechenden Laute enthielten, gaben der Akustik eine fast abgeschlossene Form.

Wir hätten hier die Mechanik überhaupt nicht erwähnt, wenn nicht diese Wissenschaft, welche man, wie wir gesehen haben, nicht als besonderen Teil der Physik betrachten darf, eine ganz besonders hervorragende Rolle gerade vor 50 Jahren gespielt hätte. Man kann sagen, daß die Mechanik eine der Grundlagen und vielleicht sogar die wichtigste der ganzen Weltauffassung jener Zeit bildete. Die Physik war von ihr durchdrungen, sie herrschte uneingeschränkt über alle ihre Teile und sie entschied unwiderruflich in allen Fragen,

mit welchen sich die Physik jener Zeit befaßte. Man kann leicht verstehen, wieso die Mechanik eine derartige Bedeutung erlangen konnte, daß wir mit Recht sagen können, daß die Physik vor 50 Jahren von einer rein mechanischen Weltauffassung beherrscht war. Die Ursache des Vorherrschens dieser wissenschaftlichen Richtung kann man am einfachsten in folgenden Worten zusammenfassen: eine Erklärung der physikalischen Erscheinungen schien nur dann einleuchtend zu sein und wurde als solche anerkannt, wenn sie auf den Gesetzen der Mechanik fußte; letztere wurden als etwas Gegebenes, als fester, unerschütterlicher Ausgangspunkt angesehen, als etwas Gewohntes und daher, wenn auch nur scheinbar, Verständliches.

Konnte man die verschiedenartigsten physikalischen Erscheinungen auf die Wirkung von Kräften und auf die durch sie hervorgerufenen Bewegungen zurückführen, wobei diese Bewegungen den festen Gesetzen der Mechanik gehorchten, so schienen sie verstanden, d. h. erklärt zu sein, und wurden auch als solche betrachtet. Die Kräfte konnten ihren Ursprung in ganzen Körpern oder Atomen und Molekülen oder in Teilchen anderer Agentien haben, deren Vorhandensein hypothetisch angenommen wurde, wie z. B. in den Teilchen der Elektrizität und des Äthers. Es wurde zugelassen, daß diese Kräfte verschiedenartig sein könnten, daß die Abhängigkeit der Wechselwirkung zweier Teilchen von ihren gegenseitigen Abständen von Fall zu Fall sich ändern könnte, so daß das Gesetz der umgekehrten Proportionalität mit dem Quadrate des Abstandes nur als Spezialfall unter vielen anderen möglichen und wirklich in der Natur vorkommenden Gesetzmäßigkeiten bildete. Hier konnte man frei wählen. War aber einmal die Wahl der Hypothese getroffen, so mußte der deduktive (logische, mathematische) Weiteraufbau der Theorie, welche die betreffende Erscheinungsgruppe erklären sollte, streng nach den Regeln der Mechanik erfolgen. In diesem Punkte waren jegliche Schwankungen und Zweifel ausgeschlossen. Die Hypothesen konnten jede beliebigen qualitativen oder quantitativen Züge der unserer unmittelbaren Beobachtung verborgenen Welt betreffen; in bezug auf die Gesetze der Mechanik wurden hingegen keine Hypothesen zugelassen. Eine Theorie, welche, wenn auch noch so geringe Änderungen in die Grundgesetze der Mechanik einführen wollte, wäre von allen unbedingt verworfen und als unwissenschaftlich, ja absurd bezeichnet worden.

Als Ideal stellte man sich eine derartige Entwicklung der Physik vor, bei welcher jede physikalische Erscheinung rein mechanisch

erklärt wäre, d. h. als eine rein deduktiv aus mechanischen Gesetzen abgeleitete Folgerung aus gewissen hypothetischen Annahmen aufgefaßt werden könnte. Kurz gesagt: die Mechanik ist die unerschütterliche und unantastbare Grundlage der Physik; die Erklärung der Erscheinungen kann nur eine mechanische sein. Die Physik wird dann als abgeschlossen zu betrachten sein, wenn alle Erscheinungen auf das Spiel von Kräften und Bewegungen zurückgeführt sein werden. Verständlich ist das, was mechanisch erklärt ist. Vor 50 Jahren herrschte in der Physik die mechanische Weltanschauung.

Und man kann nicht verkennen, daß diese Weltanschauung erstaunliche Resultate erzielte. Ihre Richtigkeit wurde durch die Erfolge in allen Teilen der Physik bestätigt, deren glänzende Entwicklung in vollem Maße eben auf der mechanischen Weltanschauung beruhte. Die Anwendung der Mechanik erklärte nicht nur die Erscheinungen qualitativ und quantitativ, d. h. bewies ihre Notwendigkeit als zwangsläufige, logische Folgerung aus den angenommenen Hypothesen, sondern gab auch die Möglichkeit, neue, noch nie beobachtete Erscheinungen vorauszusagen, und sie wiederum qualitativ und quantitativ genau zu beschreiben. Und bei der experimentellen Prüfung erwiesen sich diese Voraussagen der Theorie als richtig. Auf diese Weise wurden zahlreiche neue physikalische Erscheinungen entdeckt, deren Vorhandensein von niemandem geahnt wurde und darunter auch solche, deren Entdeckung auf gewöhnlichem experimentellen Wege sehr unwahrscheinlich war. Wir wollen weiter unten ein besonders schlagendes Beispiel gerade einer solchen unerwarteten, auf rein theoretischen Ausführungen beruhenden Entdeckung anführen. Solche Erfolge, ein solcher Siegeszug der mechanischen Theorien führte eben zu jenem Triumph der mechanischen Weltanschauung, welcher den charakteristischsten Zug der Physik vor 50 Jahren bildet. Einen starken Rückhalt fand diese Weltanschauung in den Errungenschaften der Astronomie, speziell der Himmelsmechanik. Wer kennt nicht die Geschichte der Entdeckung des Planeten Neptun durch den französischen Astronomen Leverrier! Man kann sagen, daß die mechanische Weltanschauung vor 50 Jahren nicht nur die Physik, sondern überhaupt alle Wissenschaften, welche mit der toten Materie zu tun haben, beherrschte.

§ 3. Das Gesetz der Erhaltung der Energie. Vor 50 Jahren enthielt die Schatzkammer der Physik bereits jene zwei großen Gesetze,

denen alle physikalischen Erscheinungen gehorchen und welche, wie wir schon erwähnten, heutzutage meist als Erster und Zweiter Hauptsatz bezeichnet werden, wobei das Wort „der Thermodynamik“ hinzugedacht werden muß, jedoch gewöhnlich weggelassen wird. Der erste Hauptsatz in seiner allgemeinsten Fassung ist eben das zuerst von Helmholtz klar ausgesprochene Prinzip von der Erhaltung der Energie. Den zweiten Hauptsatz werden wir weiter unten betrachten. Wir wollen kurz in Erinnerung bringen, worin das Prinzip der Erhaltung der Energie besteht.

Wenn irgendein Widerstand überwunden wird, so sagen wir, daß eine Arbeit geleistet wird. So wird z. B. eine Arbeit geleistet beim Heben eines Gewichtes (Arbeitseinheit — das Kilogramm), bei der Formveränderung (Deformation) eines festen Körpers, bei der Bewegung eines Körpers in einem widerstehenden Medium (Luft, Wasser), bei der Reibung, beim Schmelzen und Verdampfen der Körper (es werden die zwischen den Teilchen des Körpers wirkenden Kohäsionskräfte überwunden), bei der Zerlegung eines chemisch zusammengesetzten Stoffes (nicht immer) usw. Wenn ein Körper (oder ein System von Körpern) imstande ist, eine Arbeit zu leisten, so sagen wir, daß er einen Energievorrat besitzt. Es gibt viele verschiedene Erscheinungsarten oder Formen der Energie. Sie zerfallen in zwei Gruppen: die kinetische Energie und die potentielle Energie. Alle Formen der kinetischen oder Bewegungsenergie sind dadurch charakterisiert, daß wir es bei ihnen mit irgendeiner Bewegung zu tun haben. Die kinetischen Energieformen sind folgende:

1. Die Energie eines bewegten Körpers, wobei die Bewegung fortschreitend, drehend oder beliebig anders beschaffen sein kann. Es ist klar, daß jeder bewegte Körper einen gewissen, wenn auch manchmal sehr geringen Widerstand überwinden kann. Die Energie des bewegten Körpers wird auch „lebendige Kraft“ genannt, eine Bezeichnung, welche an sich sinnlos und veraltet ist, aber sich noch bis auf den heutigen Tag erhalten hat; besser ist der Ausdruck „Wucht“.

2. Die Wärme ist auch eine Form der kinetischen Energie, weil sie in der lebendigen Kraft der Bewegung der Moleküle, Atome und vielleicht auch der Elektronen besteht. Je rascher diese Bewegungen in einem Körper vor sich gehen, um so höher ist seine Temperatur. Daß die Wärme Arbeit leisten kann, zeigt uns die Dampfmaschine.

3. Die strahlende Energie oder die Strahlung, d. h. das sichtbare Licht, dessen Spektrum von den roten bis zu den violetten Strahlen sich erstreckt, und die unsichtbaren Strahlen, nämlich: die infraroten, deren Spektrum sich an das rote Ende des sichtbaren Spektrums anschließt; die Hertzschen Strahlen, auch elektrische Strahlen genannt — ihr Spektrum bildet die weitere Fortsetzung des infraroten; die ultravioletten — jenseits des violetten Endes des sichtbaren Spektrums, und schließlich die Röntgenstrahlen, deren Spektrum weit jenseits des ultravioletten liegt.

4. Der elektrische Strom kann Arbeit leisten, wie es die verschiedensten Kraftanlagen beweisen; er besitzt also Energie, und zwar zweifellos kinetische, weil er im wesentlichen aus einer Bewegung der Elektrizität besteht.

Die potentielle Energie, auch Energie der Lage oder verborgene (latente) Energie genannt, ist dadurch gekennzeichnet, daß wir es in allen Fällen mit einer Gesamtheit zweier Körper zu tun haben, welche sich zu nähern oder zu entfernen streben, als ob sie sich entsprechend anziehen oder abstoßen würden. Es können das zwei Körper im gewöhnlichen Sinne des Wortes sein oder zwei Moleküle, Atome oder Elektronen. Infolge ihrer Anziehung oder Abstoßung geraten die beiden Körper in Bewegung und können dabei offenbar eine Arbeit leisten. Daraus folgt, daß zwei solche Körper, solange sie in ihrer Lage unbewegt verharren, doch die Fähigkeit haben, eine Arbeit zu leisten, d. h. Energie besitzen, welche eben potentielle Energie genannt wird.

Ihre Erscheinungsformen sind folgende:

5. Die potentielle Energie der Körper, welche sich nach dem Gravitationsgesetze anziehen. Spezialfall: die Energie eines gehobenen Gewichtes oder genauer des Systems der Erdkugel und des gehobenen Gewichtes. Letzteres kann im Herabsinken eine Arbeit leisten, wozu ein auf der Erde liegendes Gewicht offenbar nicht fähig ist.

6. Die Energie der Lage gleichartiger Teilchen, zwischen denen sogenannte Molekularkräfte, welche man auch Kohäsionskräfte nennt, wirken. Hierher gehört die Energie eines elastisch deformierten Körpers, z. B. die Energie einer gespannten Feder. Unter diese Kategorie muß man auch jene potentielle Energie der Flüssigkeit rechnen, welche sie bei der Entstehung aus dem festen Körper gewinnt (beim Schmelzen) und ferner die im allgemeinen sehr große potentielle Energie des Dampfes oder Gases, welche in ihm entsteht, wenn er sich aus der entsprechenden Flüssigkeit bildet,

d. h. beim Verdampfen. Dabei wird vorausgesetzt, daß das Schmelzen und Verdampfen ohne Temperaturerhöhung vor sich gehen.

7. Die Energie der Lage verschiedenartiger Teilchen, d. h. die chemische Energie. 2 g Wasserstoff und 16 g Sauerstoff, welche in zwei getrennten Gefäßen sich befinden oder auch miteinander vermischt sind, bilden, indem sie sich chemisch verbinden, eine Arbeitsquelle.

8. Die elektrostatische Energie, d. h. die Energie der elektrischen Ladungen. Ein geladener Kondensator ist ein Beispiel für einen Körper, welcher diese Form von potentieller Energie besitzt.

9. Die magnetische Energie, d. h. die Energie zweier Magnete, deren Pole sich nach dem bekannten Gesetze anziehen oder abstoßen.

Die Untersuchung der verschiedenartigsten Energieformen führt zu folgenden wichtigen Resultaten, welche wir, ohne sie genauer auseinanderzusetzen, im weiteren bloß zusammenstellen wollen, um sie dem Leser in Erinnerung zu bringen.

A. Wenn ein Körper (oder ein Körpersystem) eine Energie besitzt, so kann er bloß eine in quantitativer Hinsicht ganz bestimmte Arbeit leisten. In dem Maße, wie die Arbeit geleistet wird, verringert sich die Arbeit, welche der Körper (oder das Körpersystem) noch leisten kann. Hieraus entspringt die Vorstellung von einem Energievorrat, welchen der Körper (oder das System) besitzt. Dieser Vorrat wird verkleinert, wenn der Körper (oder das System) Arbeit leistet und kann vollständig erschöpft werden. Die Richtigkeit dieser Behauptung kann leicht für alle oben aufgezählten Energiearten bewiesen werden. Die Energie wird gemessen durch die Größe der Arbeit, welche auf ihre Kosten geleistet werden kann. Die verbrauchte Energie und die erhaltene Arbeit heißen äquivalent. Zwei Energiemengen verschiedener Art werden ebenfalls als äquivalent oder einfach als gleich bezeichnet, wenn bei ihrem Verbrauch die gleiche Arbeit erzeugt wird, z. B. eine gleiche Anzahl von Kilogrammetern.

B. Als Resultat einer jeden geleisteten Arbeit erscheint ein neuer Vorrat irgendeiner Energieform aus der Zahl der oben angeführten. Dieser neue Vorrat ist genau äquivalent der geleisteten oder wie man in diesem Falle zu sagen pflegt, der verbrauchten Arbeit. Es ist klar, daß diese neu entstandene Energie wiederum genau äquivalent derjenigen ist, welche zur betreffenden Arbeitsleistung verbraucht wurde.

C. Das Prinzip der Erhaltung der Energie: Die Energie ist unzerstörbar, sie kann weder verschwinden noch neu entstehen. Das bedeutet folgendes. Wir wollen ein System, d. h. eine Gesamtheit einer willkürlichen Anzahl beliebiger, verschiedener Körper „abgeschlossen“ nennen, wenn es keine Energie von der Außenwelt erhält und auch keine abgibt. Wir können uns etwa vorstellen, daß das System von einer für alle Arten der Energie undurchdringbaren Hülle umgeben ist. In diesem Falle kann man das Prinzip von der Erhaltung der Energie folgendermaßen aussprechen: Im abgeschlossenen System bleibt die Summe der Energien konstant, gleichgültig welche physikalische oder chemische Erscheinungen oder, wie man sagt, Prozesse in dem System vor sich gehen sollten. Der Vorrat an jeder einzelnen Energieart dieses Systems kann abnehmen oder auch ganz verschwinden, wenn auf seine Kosten eine Arbeit geleistet wird; als Resultat dieser Arbeit entsteht jedoch mit Notwendigkeit ein neuer Vorrat von Energie, wenn auch vielleicht ganz anderer Art, welcher genau äquivalent dem verschwundenen Energievorrat sein muß. Die Summe aller Energien bleibt unverändert.

Dieses Gesetz diente schon vor 50 Jahren als Grundlage aller theoretischen Betrachtungen über physikalische und chemische Erscheinungen. Wesentlich ist der Umstand, daß dieses Gesetz einen rein quantitativen Charakter besitzt. Die Äquivalenz d. h. die Gleichheit der entstehenden und verschwindenden Energien liefert uns quantitative Beziehungen zwischen denjenigen physikalischen Größen, durch welche sich diese beiden Energiebeträge ausdrücken lassen. Dieses Gesetz, welches alle Erscheinungen der uns umgebenden und unserer Beobachtung zugänglichen Welt beherrscht, zeigt, daß unsere Welt kein Chaos ist, sondern eine Welt, in welcher eine bestimmte Ordnung, eine strenge Gesetzmäßigkeit herrscht. Alle in der Welt vor sich gehenden physikalischen und chemischen Erscheinungen können als verschiedenartige Übergänge der Energieformen ineinander betrachtet werden. Aus dem Gesetze der Erhaltung der Energie kann man eine Reihe von Schlußfolgerungen ziehen, welche wir jetzt anführen wollen.

Das perpetuum mobile ist unmöglich, d. h. es ist unmöglich, eine solche Maschine zu konstruieren, welche unaufhörlich Arbeit liefert, ohne daß ihr von außen neue Energievorräte zufließen, welche die zur Erzeugung der Arbeit verbrauchten ersetzen. Eine solche gedachte, aber nicht verwirklichte Maschine sollte man genauer als perpetuum mobile erster Art bezeichnen, zum Unter-

schied vom perpetuum mobile zweiter Art, von dem weiter unten die Rede sein wird.

Wir sahen, daß die Wärme eine Energieform vorstellt. Daraus folgt, daß die Wärme der Arbeit äquivalent ist, d. h. erstens: Wärme kann zur Erzeugung von Arbeit verbraucht werden (Wärmemaschinen) und zweitens: Wärme kann als Resultat einer geleisteten Arbeit auftreten, wie z. B. bei der Reibung oder beim Durchgang des elektrischen Stromes durch einen Draht, wobei die Arbeit der elektrischen Kräfte, welche die Elektrizität in Bewegung setzen, schließlich die Wärme, welche den Draht heizt, liefert (elektrische Beleuchtung). Es fragt sich, welche Mengen von Wärme und Arbeit einander äquivalent sind. Die Arbeit mißt man meistens in Kilogramm Metern, doch verwendet man auch eine andere Arbeitseinheit, welche „Joule“ genannt wird und ungefähr 0,102 kg/m beträgt. Die Wärme wird gewöhnlich in Gramm- oder Kilogrammkalorien gemessen. Die Kilogrammkalorie (auch Kilokalorie genannt) ist die Wärmemenge, welche ein Kilogramm Wasser von 14,5 auf 15,5° erwärmt. Die Grammkalorie ist tausendmal kleiner, sie bewirkt dieselbe Erwärmung eines Gramm Wassers. Es erwies sich, daß die Kilogrammkalorie 426 kg/m äquivalent ist. Diese Größe heißt das mechanische Wärmeäquivalent; die zu ihr reziproke Größe $1/426$ einer großen Kalorie, heißt thermisches Arbeitsäquivalent. Am einfachsten ist es, als Einheiten für Wärme- und Arbeitsmengen einander äquivalente Größen einzuführen und ihnen einen gemeinsamen Namen zu geben. So verfährt man auch, indem man als Wärmeeinheit die einem Joule Arbeit äquivalente Wärmemenge einführt und sie ebenfalls Joule nennt. In diesem Falle sind sowohl das mechanische Wärmeäquivalent als auch das thermische Arbeitsäquivalent offenbar gleich der Einheit. Man findet, daß eine Grammkalorie gleich 4,184 Joule ist.

§ 4. Die kinetische Theorie der Materie. In engster Verbindung mit der Lehre von der Energie und von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit entstand die kinetische Theorie der Materie und vor allen die kinetische Theorie der Gase (in den fünfziger Jahren), dank den Arbeiten des deutschen Forschers Clausius und Maxwells, deren Vorläufer Daniel Bernoulli (1700—1782), John Herapath (1796—1867), Joule (1818—1889) und besonders Krönig (1822—1879) waren. Vor 50 Jahren hatte die kinetische Theorie der Materie ihre volle Entwicklung erreicht und bildete eine der wichtigsten Grundlagen der Physik jener Zeit. Wir wollen hier

vor allen Dingen die Ausgangshypothesen und wichtigsten Ergebnisse der kinetischen Theorie der Gase in Erinnerung bringen. Sie setzt voraus, daß die Teilchen in den Gasen so weit voneinander entfernt sind, daß man ihre Wechselwirkung, die sogenannte Kohäsionskraft, vernachlässigen kann. Daher bewegen sich die Gasteilchen geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit bis sie auf irgendein Hindernis stoßen, z. B. auf die Wand des Gefäßes, in welches das Gas eingeschlossen ist oder auf andere Teilchen desselben Gases. Diese Hypothese erklärt vollständig, warum das Gas nicht an einen leeren Raum grenzen kann, sondern immer das ganze ihm frei stehende Volumen einnimmt. Dieselbe Hypothese liefert uns den Mechanismus jenes Druckes, welchen alle mit dem Gase in Berührung befindlichen Körper erfahren. Solche Körper, seien sie fest oder flüssig, erfahren von seiten des Gases ein molekulares Bombardement, d. h. unzählige Stöße von Gasteilchen, welche von allen Seiten auftreffen und nach den Gesetzen des Stoßes vollständig elastischer Körper zurückprallen, etwa wie Gummikugeln oder Elfenbeinkugeln auf dem Billard. Das Gesetz von Boyle-Mariotte, nach welchem der Druck einer gegebenen Gasmenge bei gleichbleibender Temperatur dem vom Gase eingenommenen Volumen umgekehrt proportional ist, wird dadurch erklärt, daß bei einer Vergrößerung des Volumens der gegebenen Gasmenge auf das Doppelte, Dreifache usw. die Beschießung von seiten der Gasmoleküle sich in demselben Verhältnis vermindert, und folglich auch der Druck des Gases auf die angrenzenden Körper um ebensovielfach kleiner wird. Die strenge Ableitung des Boyle-Mariotteschen Gesetzes auf Grund der Gesetze der Mechanik wurde von Clausius gegeben.

Die kinetische Energie des Moleküls besteht im allgemeinen aus drei Teilen: 1. der Energie der fortschreitenden Bewegung des Moleküls, proportional der Masse und dem Quadrate der Geschwindigkeit; 2. der Energie der Rotationsbewegung, proportional dem Trägheitsmoment um die Rotationsachse und dem Quadrate der Winkelgeschwindigkeit und 3. der intramolekularen Energie, d. h. der Energie der Bewegungen, z. B. Schwingungen, der Atome, aus welchen das Molekül zusammengesetzt ist. In den einatomigen Gasen ist nur die erste Energieart, d. h. die der fortschreitenden Bewegung vorhanden, weil, wie es sich erweist, die Energie der Rotationsbewegung entweder fehlt oder zu vernachlässigen ist, vermutlich infolge der Kleinheit des Trägheitsmomentes. Bei einatomigen festen Körpern haben wir es mit der Energie

der Schwingungen, welche die Atome um bestimmte Mittellagen ausführen, zu tun.

Wir führen die Resultate an, zu welchen Clausius (1857) auf Grund seiner Rechnungen gelangt ist.

I. Bei unveränderlichem Volumen ist der Druck des Gases proportional der kinetischen Energie der fortschreitenden Bewegung aller seiner Moleküle.

II. Wenn zwei Gase bei gleicher Temperatur gleiche Volumina einnehmen und gleichen Druck haben, so besitzen sie einen gleichen Vorrat der Energie der fortschreitenden Bewegung.

Das Gesetz von Gay-Lussac besagt, daß bei unveränderlichem äußeren Drucke das Volumen des Gases proportional der absoluten Temperatur ist, bei konstantem Volumen hingegen der Druck der absoluten Temperatur proportional ist. Erinnern wir uns, daß man die absolute Temperatur erhält, wenn man zu der nach der Celsiusskala abgelesenen Temperatur die Zahl 273 (genauer 273,09) hinzufügt oder anders gesagt, daß die absolute Temperatur nach Celsius gerechnet wird, wobei aber der Anfangspunkt der Skala bei einer um 273° unter dem Schmelzpunkte des Eises liegende Temperatur anzunehmen ist. Diese letztere Temperatur, d. h. -273° C heißt der absolute Nullpunkt der Temperatur.

Durch Gegenüberstellung der zweiten Fassung des Gay-Lussac'schen Gesetzes mit dem ersten der oben angeführten Gesetze erhält man das fundamentale Gesetz der kinetischen Gastheorie:

III. Die kinetische Energie der fortschreitenden Bewegung der Gasmoleküle nimmt proportional der absoluten Temperatur des Gases zu. Dieses Gesetz zeigt uns den wahren physikalischen oder, wenn man will, mechanischen Sinn jener Größe, welche wir Temperatur nennen. Es erweist sich eben, daß die Temperatur des Gases und nicht nur eines Gases, sondern auch eines jeden anderen Stoffes, durch die Geschwindigkeit der Teilchen, aus denen der Stoff besteht, bestimmt wird. Man kann natürlich auch umgekehrt sagen, daß die Geschwindigkeit der Teilchen von der Temperatur abhängt, doch würde das weniger wissenschaftlich sein, denn es bleibt dabei unklar, was eigentlich die Temperatur ist. Da die kinetische Energie der fortschreitenden Bewegung proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit dieser Bewegung ist, so folgt aus diesem Gesetze:

IV. Das Quadrat der Geschwindigkeit der Moleküle eines gegebenen Gases nimmt proportional der absoluten Temperatur zu oder die Geschwindigkeit der Moleküle ist proportional der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur. Wir

wollen hinzufügen, daß die Geschwindigkeit der Moleküle eines gegebenen Gases nur von der Temperatur abhängt und sich natürlich nicht ändert, wenn man das Gas verdichtet oder verdünnt. Als Grammolekül (oder Mol) irgendeines Stoffes bezeichnet man eine solche Menge desselben, welche ebensoviel Gramm enthält, wieviel Einheiten in dem Molekulargewichte dieses Stoffes enthalten sind, z. B. 2 g Wasserstoff, 32 g Sauerstoff, 18 g Wasser, 44 g Kohlensäure, 58,5 g Kochsalz, 342 g Zucker ($C_{12}H_{22}O_{11}$) usw. Es ist leicht einzusehen, daß die Grammoleküle beliebiger Stoffe immer dieselbe Anzahl von Molekülen enthalten. Die sehr wichtige Zahl der Moleküle in einem Grammolekül heißt die Avogadrosche Zahl (Avogadro, Italien, 1776—1856) und wird gewöhnlich durch den Buchstaben N bezeichnet. Es erwies sich, daß

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

ist. Von Avogadro stammt das folgende auf Gase sich beziehende Gesetz: gleiche Volumina verschiedener Gase, welche die gleiche Temperatur und gleichen Druck haben, enthalten die gleiche Anzahl von Molekülen (oder Atomen, wenn das Gas einatomig ist). Aus diesem Gesetze erhält man leicht noch das folgende Resultat: die Grammoleküle verschiedener Gase haben bei gleicher Temperatur und Druck gleiches Volumen. Bei der Temperatur $0^{\circ} C$ und normalem Atmosphärendruck (760 mm Quecksilber) beträgt das Volumen des Grammoleküls eines beliebigen Gases 22,42 Liter oder 22420 ccm. In diesem Volumen befinden sich N (vgl. oben) und in 1 ccm:

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

Wir haben bisher über die Geschwindigkeit der Gasmoleküle gesprochen, als ob bei einer gegebenen Temperatur alle Moleküle des betreffenden Gases dieselbe Geschwindigkeit hätten. Das ist aber nicht richtig; infolge der Zusammenstöße zwischen den Molekülen, werden ihre Geschwindigkeiten beständig verändert. Bei der ungeheuren Anzahl der Moleküle werden wir in einem gegebenen Zeitpunkte Moleküle mit den verschiedensten Geschwindigkeiten finden, von verhältnismäßig kleinen bis zu sehr großen. Doch besitzt die große Mehrzahl der Moleküle Geschwindigkeiten, welche sich von einer gewissen mittleren, für das betreffende Gas bei der gegebenen Temperatur charakteristischen Geschwindigkeit nicht weit entfernen. Das Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung unter den Gasmolekülen gab Maxwell. Wir wollen als mittlere Geschwindigkeit

(genauer mittlere quadratische Geschwindigkeit) der Gasmoleküle eine solche Geschwindigkeit bezeichnen, deren Quadrat dem gewöhnlichen Mittelwerte aus den Quadraten der Geschwindigkeiten aller Moleküle der gegebenen Gasmenge gleich ist. Da das Quadrat der Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung der Moleküle ihre Energie bestimmt, so ist es klar, daß ein Molekül, welches die mittlere Geschwindigkeit besitzt, auch die im Mittel allen Teilchen zukommenden Energie hat. Wenn alle Moleküle die von uns als mittlere bezeichnete Geschwindigkeit besitzen würden, so würde der ganze Energievorrat der fortschreitenden Bewegung des Gases gleich dem sein, welchen das Gas, dessen Molekülgeschwindigkeiten nach dem Maxwell'schen Gesetz verteilt sind, in Wirklichkeit besitzt. Wo früher über die Geschwindigkeit der Moleküle gesprochen wurde, ist überall die mittlere oder richtiger mittlere quadratische Geschwindigkeit gemeint, und unter der Energie der fortschreitenden Bewegung der Teilchen einer bestimmten gegebenen Gasmenge ist selbstverständlich die Summe solcher Energien über alle Moleküle dieses Gases zu verstehen.

Indem wir das Gesetz II mit dem Gesetze von Avogadro verbinden, finden wir, daß bei gleicher Temperatur die Energie der fortschreitenden Bewegung der Moleküle in verschiedenen Gasen denselben Wert hat.

Eine Formel zur Berechnung der mittleren Geschwindigkeit (im weiteren einfach als Geschwindigkeit bezeichnet) dieser so verschiedenen Teilchen, welche bei gegebener Temperatur die gleiche Energie besitzen, gab Clausius. Da diese Energie dem Produkte der Masse und des Quadrates der Geschwindigkeit proportional ist, so erhalten wir offenbar folgendes Gesetz:

V. Bei gegebener Temperatur ist das Quadrat der Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung der Atome, Moleküle und Molekülgruppen umgekehrt proportional ihrer Masse oder die Geschwindigkeit ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Masse. So ist z. B. die Geschwindigkeit des Sauerstoffmoleküls viermal kleiner als die des Wasserstoffmoleküls. Die Gesetze IV, das auch für Molekülgruppen gilt, und V liefern uns die Abhängigkeit der Geschwindigkeit der sich getrennt bewegenden Atome, Moleküle und Molekülgruppen von ihrer Masse und der Temperatur. Es genügt die Geschwindigkeit der Moleküle irgendeines Gases für irgendeine Temperatur zu kennen, um die Geschwindigkeiten beliebiger Atome, Moleküle und Gruppen für beliebige Temperaturen leicht berechnen zu können. Die Formeln

von Clausius liefern für die Geschwindigkeit der Sauerstoffmoleküle bei 0°C die Zahl:

461 m in der Sekunde.

Die Geschwindigkeit der Wasserstoffmoleküle ist viermal größer. Bei 1000°C beträgt sie bereits 3980 m/sec., bei -270° (3° abs.) beträgt sie 193,2 m/sec.

Die Gasteilchen stoßen miteinander zusammen und verändern dabei ihre Bewegungsrichtung. Clausius führte 1858 den Begriff der mittleren Weglänge eines Gasmoleküls ein. Diese allgemein angenommene Bezeichnung wird vollständig einleuchtend, wenn man die Worte „zwischen zwei Zusammenstößen“ hinzufügt. Die geradlinigen Wegstücke, welche das Molekül von einem Zusammenstoß bis zum nächsten durchläuft, müssen offenbar eine sehr verschiedene Länge haben, weil hier der Zufall eine große Rolle spielt. Nimmt man aber die ungeheure Anzahl solcher Wege, welche die Trillionen von Teilchen durchlaufen und rechnet ihren Mittelwert aus, so bekommt man eine bestimmte Größe, welche eben „mittlere Weglänge“ genannt wird und nur von dem Verdichtungsgrade und der Größe der Moleküle abhängt. Man sieht leicht ein, daß die mittlere Weglänge um so kleiner sein muß, je stärker das Gas zusammengedrückt ist und je größer die Abmessungen der Moleküle sind. Die Rechnungen zeigen auch wirklich, daß die mittlere Weglänge dem Drucke, unter welchem das Gas steht, oder was dasselbe ist, der Spannung des Gases, umgekehrt proportional ist. Die mittlere Anzahl der Zusammenstöße, welche ein Molekül in der Sekunde erfährt, ist bei konstanter Temperatur, also konstanter Geschwindigkeit, dem Drucke des Gases direkt proportional. Mit steigender Temperatur muß die mittlere sekundliche Zahl der Zusammenstöße eines Teilchens zunehmen.

Es zeigt sich, daß man ausrechnen kann, wie viele Teilchen in einer gegebenen Zeit einen bestimmten Teil oder ein bestimmtes Vielfaches der mittleren Weglänge, welche wir der Kürze halber mit L bezeichnen wollen, durchlaufen. Es erwies sich, daß nur 1% aller durchlaufenen Wege kleiner als $0,01 L$ ist; 39% aller Wege ist kleiner als $0,05 L$ und 63% ist kleiner als L . Die übrigen 37% der durchlaufenen Wege sind größer als L , wobei 14% größer als $2 L$ und nur 1% größer als $5 L$ ist. Sehr große oder sehr kleine Weglängen kommen verhältnismäßig selten vor. Clausius berechnete die mittlere Weglänge L und erhielt ein erstaunliches Resultat. Für ein Gas wie Wasserstoff, Stickstoff oder einfach Luft unter

gewöhnlichem Atmosphärendruck ist die mittlere Weglänge ungefähr gleich

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

d. h. dem zehntausendsten Teil eines Millimeters; diese Länge ist kleiner als die aller kleinste Strecke, welche man im Mikroskop unterscheiden kann. Dividiert man die Geschwindigkeit des Moleküls durch die mittlere Weglänge, so erhält man die mittlere Zahl der Zusammenstöße, welche ein Molekül in der Sekunde erfährt. Man darf aber hier nicht von der oben eingeführten und genauer als „mittlere quadratische“ bezeichneten Geschwindigkeit Gebrauch machen, sondern muß das einfache arithmetische Mittel der Geschwindigkeit anwenden, welches, wie die Rechnung zeigt, um 8% kleiner ist. Für Sauerstoff bei 0° C beträgt letztere 425 m/sec. Wenn wir 425 m/sec. durch 0,0001 mm dividieren, so erhalten wir, daß ein Sauerstoffmolekül bei normalen Bedingungen, d. h. bei 0° C und einem Drucke von 760 mm Quecksilbersäule

4250 Millionen Zusammenstöße

in der Sekunde erleidet. Drücken wir dieses Gas auf $\frac{1}{500}$ seines normalen Volumens zusammen, so wird die Zahl der Zusammenstöße in der Sekunde noch 500mal größer, steigert man die Temperatur bis 1000°, so wird sie noch zweimal größer. Im Wasserstoff unter normalen Bedingungen haben wir 9480 Millionen von Zusammenstößen in der Sekunde. Dafür nimmt aber bei hohem Verdünnungsgrade und tiefer Temperatur die Zahl der Zusammenstöße außerordentlich ab. So findet z. B. beim Drucke von $\frac{1}{1000000000}$ einer Atmosphäre und bei der Temperatur — 270° C bloß ein Zusammenstoß in 2,5 Sek. statt.

Die ungeheure Zahl der Zusammenstöße, welche auf ein Gas-molekül unter normalen Bedingungen im Mittel entfällt, erklärt vollständig, warum die Diffusion, d. h. das gegenseitige Eindringen zweier Gase ineinander sehr langsam vor sich geht. So verbreitet sich z. B. der Geruch eines Gases, wie Schwefelwasserstoff, Chlor, Salmiakgeist, außerordentlich langsam im Vergleich zur Geschwindigkeit der Molekülbewegung.

Wir sehen, daß die kinetische Gastheorie nicht nur mit Leichtigkeit die charakteristischen Eigenschaften der Gase erklärt, sondern auch die Möglichkeit gibt, die Größen, welche in dieser Theorie die Hauptrolle spielen, zahlenmäßig zu bestimmen, wie z. B. die Zahl der Moleküle, ihre Geschwindigkeit und mittlere Weglänge.

Diese Theorie war aber imstande, noch bedeutend weiter zu gehen und solche Eigenschaften von Gasen vorauszusagen, deren Vorhandensein bis zu ihrer theoretischen Ableitung nicht nur unbekannt war, sondern auch nicht geahnt werden konnte. Wir wollen auf zwei Eigenschaften der Gase hinweisen, welche nicht experimentell, sondern rein theoretisch entdeckt worden sind. Wie bekannt, besitzen verschiedene Stoffe verschiedene Wärmeleitfähigkeiten, oder bildlich ausgedrückt, fließt die Wärme in ihnen mit verschiedener Geschwindigkeit. Gase leiten die Wärme verhältnismäßig schlecht. Vermutlich wird jeder auf den Gedanken kommen, daß ein verdichtetes Gas besser leiten muß, als ein verdünntes. Maxwell bewies 1860 theoretisch, daß die Wärmeleitfähigkeit eines Gases von seinem Drucke, d. h. von seinem Verdichtungs- oder Verdünnungsgrade nicht abhängt, wenn nur die letzteren nicht übermäßig groß sind, d. h. wenn das Gas sich nicht dem flüssigen Zustande nähert oder nicht allzu verdünnt ist, in welchem letzterem Falle die Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Mit Ausschluß dieser Grenzfälle ist jedoch ein weiter Bereich der Dichteänderungen vorhanden, in welchem die Wärmeleitfähigkeit konstant bleibt. Dieses theoretisch erhaltene Resultat erschien wenig glaubwürdig, doch haben experimentelle Untersuchungen die Richtigkeit der Voraussagen der kinetischen Gastheorie vollkommen bestätigt. Auf diese Weise wurde eine neue und, man kann sagen, unerwartete Eigenschaft der Gase entdeckt, und die Physik war durch eine neue interessante Tatsache bereichert, welche durch rein theoretische Betrachtungen erhalten war.

Ein zweiter Fall einer ähnlichen Prophezeiung bezieht sich auf die innere Reibung der Gase. Wenn verschiedene Teile z. B. Schichten eines Gases mit verschiedener Geschwindigkeit sich bewegen, so wirkt zwischen ihnen eine Reibungskraft. Zweifellos wird jeder auf die Vermutung kommen, daß diese Reibung um so größer sein wird, je mehr das gegebene Gas verdichtet ist. Auch in diesem Falle lieferte die Theorie das unerwartete Resultat, daß die innere Reibung in weiten Grenzen von dem Verdichtungs- oder Verdünnungsgrade unabhängig ist. Die experimentelle Prüfung bestätigte dieses Ergebnis der Theorie, welche auf diese Weise eine neue Eigenschaft der Gase entdeckt und die Physik, um eine neue und wichtige Tatsache bereichert hatte.

Wir haben einige Hauptresultate der kinetischen Gastheorie dargestellt, ohne ihren Inhalt vor 50 Jahren nur einigermaßen zu erschöpfen. Es ist wichtig zu bemerken, daß auch alle ihre weiteren

Ergebnisse zu jener Zeit durch Anwendung der Gesetze der Mechanik auf Gase, deren innere Struktur durch die von uns dargestellten Grundhypothesen der kinetischen Gastheorie beschrieben wird, erhalten worden sind. Wir wollen zum Schluß noch bemerken, daß die molekularkinetische Hypothese auch auf feste und flüssige Körper angewandt wurde, daß dort aber andere Voraussetzungen über die Beschaffenheit der Moleküle gemacht wurden.

Wir hielten es für angebracht, ziemlich eingehend die Grundfragen der kinetischen Theorie überhaupt und der Gase im besonderen zu erörtern, weil diese Theorie besonders charakteristisch für die Physik vor 50 Jahren ist.

§ 5. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Vor 50 Jahren hatte die Thermodynamik schon bedeutende Erfolge zu verzeichnen. Ihre Grundsätze waren endgültig festgelegt und auf alle die Fälle angewandt, auf welche es zu jener Zeit überhaupt möglich zu sein schien. Die Thermodynamik, als eine auf einem bestimmten, wenn auch sehr verschieden formulierten Postulate erbaute Wissenschaft, schien damals in hohem Grade vollendet zu sein. Man konnte glauben, daß zu ihr im wesentlichen nichts Neues hinzugefügt werden konnte.

Wir wollen nochmals daran erinnern, daß die Thermodynamik, als die Lehre von den zwei sogenannten „Hauptsätzen“ und den aus ihnen fließenden Folgerungen bezeichnet werden kann. Der erste Hauptsatz ist identisch mit dem allgemeinen Prinzip der Erhaltung der Energie und besonders mit seiner Anwendung auf die Wärmeerscheinungen. Die Wärme ist eine Energieform und als solche der Arbeit äquivalent — so spricht man zuweilen den ersten Hauptsatz der Thermodynamik aus.

Der zweite Hauptsatz ist auch unter verschiedenen anderen Namen bekannt: als Prinzip der Energiezerstreuung, Prinzip der Vermehrung der Entropie, Prinzip der Unmöglichkeit des perpetuum mobile zweiter Art u. a. m.; am gebräuchlichsten ist aber die Bezeichnung „zweiter Hauptsatz“. Wir haben in diesem Buche offenbar nicht die Möglichkeit auch nur einigermaßen ausführlich die Grundlagen des zweiten Hauptsatzes auseinanderzusetzen. Jedoch müssen wir, um später das Wesen der Evolution der Thermodynamik in den letzten 50 Jahren darzustellen, ein deutliches Bild der Thermodynamik und ihrer wesentlichen Züge zu Anfang der siebziger Jahre entwerfen. Wir müssen uns beschränken auf die Angabe der wichtigsten Größen, mit denen diese Wissenschaft zu tun hat und der Hauptresultate, zu denen sie gelangt war, wobei wir das Wort „Thermo-

dynamik“ ohne weiteres als Synonym des zweiten Hauptsatzes gebrauchen können, weil ja der erste Hauptsatz, das Prinzip der Erhaltung der Energie, wegen seiner verhältnismäßigen Einfachheit, zur Elementarphysik gerechnet werden kann.

Wir sahen, daß der erste Hauptsatz uns ermöglicht, jene rein quantitativen Gesetze, welche die in unserer Umgebung vor sich gehenden Erscheinungen beherrschen, zu erfassen. Er gibt uns die Antwort auf die Frage: **Wie** gehen diese Erscheinungen vor sich? Er sagt aber nichts darüber, **was** denn in Wirklichkeit vor sich geht, welche Erscheinungen bei gegebenen Bedingungen eintreten müssen. Diese Frage beantwortet der zweite Hauptsatz. Wir wollen als Prozeß eine jede einzeln betrachtete Veränderung bezeichnen, welche in irgendeinem Teile der toten Materie vor sich geht. Als Beispiele solcher Prozesse können wir anführen: Übergang der Wärme von einem Ort zu einem anderen, Übergang der Wärme in Arbeit oder Arbeit in Wärme, Auflösung oder Ausscheidung des Gelösten, Schmelzen, Erstarren, Verdampfung, Verflüssigung, Diffusion, Veränderung des Druckes, des Volumens oder der Temperatur, Übergang einer Energieart in eine andere, Veränderung der Elektrizierung oder Magnetisierung, elastische Deformation eines festen Körpers, eine beliebige chemische Reaktion usw.

Zu jedem Prozeß kann man einen anderen ihm entgegengesetzten anführen. Verdichtung und Verdünnung, Lösung und Ausscheidung, Schmelzen und Erstarren, Übergang von Arbeit in Wärme und Wärme in Arbeit, gegenseitige Diffusion zweier Stoffe und ihre Trennung voneinander usw. sind Beispiele von entgegengesetzten Prozessen. Wir sagen, daß solche Prozesse eine entgegengesetzte Richtung haben. Wenn der Prozeß im Auftreten irgendeiner oben als Beispiel angeführten Veränderung besteht, so wird diese Veränderung bei entgegengesetztem Prozesse sozusagen vernichtet. Es erweist sich aber, daß der entgegengesetzte Prozeß in seinem Charakter und allgemeinem Verlaufe sich sehr wesentlich von dem ersten Prozesse unterscheidet. Oft kommt es vor, daß irgendein Prozeß einfach und leicht vor sich geht, während der entgegengesetzte nur auf sehr komplizierte Weise bewerkstelligt werden kann. Zwei Beispiele mögen genügen: Zwei sich berührende Gase diffundieren mit Leichtigkeit ineinander, d. h. vermischen sich; der entgegengesetzte Prozeß der Trennung dieser Gase voneinander ist zwar möglich, doch verlangt er verwickelte physikalische und fast immer chemische Eingriffe. Wärme kann leicht als Resultat

einer geleisteten Arbeit erhalten werden (Stoß, Reibung). Und wie im grauen Altertum, so erzeugen die wilden Völkerschaften auch heutzutage das Feuer durch Reibung. Die Erzeugung von Arbeit durch Verbrauch von Wärme ist ein sehr verwickelter Prozeß, und es ist noch gar nicht lange her, daß die Menschheit die Bewerks-
stellung solcher Prozesse zustande gebracht hat, indem sie die Dampfmaschine erfand. Man überzeugt sich leicht, daß das Gesagte auf alle oben aufgezählten Prozesse Anwendung findet. Wesentlich ist der Umstand, daß zu jedem Prozesse ein entgegengesetzter immer möglich ist. Nehmen wir an, daß von zwei einander entgegengesetzten Prozessen der erste leicht und einfach vor sich geht (z. B. Auflösung von Salz in Wasser), der zweite hingegen bedeutend verwickelter ist (Ausscheidung des Salzes aus dem Wasser). Die Gesamtheit beider Prozesse stellt scheinbar den früheren Tatbestand wieder her (Salz und Wasser sind wieder getrennt).

Das ist aber nicht richtig! Der zweite Prozeß benötigte zu seiner Verwirklichung eine ganze Reihe von scheinbar zufälligen, doch unvermeidlichen Nebenprozessen (Eindampfen, Abkühlen), welche ihre Spur in der Außenwelt hinterlassen. (Verbrennung von Gas oder Spiritus, verschiedene Wärmeübergänge.) Weiter unten werden wir sehen, worin diese hinterlassene Spur sich äußert.

Es muß streng unterschieden werden zwischen einem entgegengesetzten Prozesse und dem umgekehrten. Nehmen wir wieder an, daß irgendein Prozeß vor sich gegangen ist; der umgekehrte Prozeß soll dann dem ersten buchstäblich umgekehrt verlaufen, d. h. seine Begleitprozesse müssen entsprechend genau das Umgekehrte der Begleitprozesse des ersten sein. Vollkommen zutreffend, wenn auch bildlich gemeint, können wir sagen, daß der zweite (umgekehrte) Prozeß genau dieselbe Bahn, natürlich in umgekehrter Richtung, wie der erste beschreiben soll. Sämtliche Zwischenzustände aller Körper, welche an dem ersten Prozesse teilnehmen, müssen von neuem — aber in umgekehrter Reihenfolge — durchlaufen werden. Die Gesamtheit zweier gegenseitig umgekehrten Prozesse läßt in der Welt keine Spur nach. Ein Prozeß, welcher auch in umgekehrter Richtung verlaufen kann, heißt umkehrbar, im Gegenfalle nicht umkehrbar.

Es erweist sich, daß alle physikalischen Prozesse, welche in der Natur wirklich vor sich gehen oder vom Menschen künstlich hervorgerufen werden können, nicht umkehrbare Prozesse sind. Man kann immer einen entgegengesetzten Prozeß zustande bringen, es wird aber dies nicht der umgekehrte

Prozeß sein; ihre Gesamtheit wird eine Spur in der Gestalt irgendeiner Veränderung oder einfacher gesagt, irgendeines anderen, nicht umgekehrt verbliebenen Prozesses nachlassen. Umkehrbare Prozesse können nicht verwirklicht werden. Es ist aber möglich, in Gedanken und in manchen Fällen angenähert auch wirklich den entgegengesetzten Prozeß so zu führen, daß die übrig bleibende Veränderung beliebig klein wird. Unter anderem müssen dann sowohl der gerade, als auch der umgekehrte Prozeß sehr langsam geführt werden; andere Bedingungen wollen wir übergehen. In Wirklichkeit kann man in dieser Richtung, d. h. in der Verminderung der übrigbleibenden Veränderungen nicht besonders weit gehen, doch kann man sich die Ausführung des geraden und umgekehrten Prozesses so ausgeführt denken, daß der zweite dem ersten wirklich umgekehrt sein wird, d. h. daß nirgends in der Welt als Resultat der Gesamtheit der beiden Prozesse eine Veränderung zurückbleibt. In diesem Falle müssen beide Prozesse, abgesehen von anderen Bedingungen, unendlich langsam verlaufen. Daraus sieht man, daß sie sozusagen einen Grenzfall vorstellen, welchem man sich wohl nähern kann, ohne ihn jemals zu erreichen. Wir führen keine erläuternde Beispiele an, weil ja unser Ziel nur darin besteht, die Grundlagen der Thermodynamik in Erinnerung zu bringen und ihre Entwicklungsstufe vor 50 Jahren zu kennzeichnen.

Alle Prozesse zerfallen in zwei Gruppen: natürliche oder positive und unnatürliche oder negative. Jedem natürlichen Prozesse entspricht ein unnatürlicher, als entgegengesetzter Prozeß. Ein natürlicher Prozeß kann von selbst, im buchstäblichen Sinne dieses Wortes vor sich gehen, d. h. ohne vom Menschen beeinflusst und von anderen Prozessen begleitet zu sein. Ein solcher Prozeß kann auch als einziges Resultat einer Gesamtheit mehrerer Prozesse auftreten. Ein unnatürlicher Prozeß geschieht niemals von selbst im buchstäblichen Sinne des Wortes. Das Wichtigste besteht aber darin, daß ein unnatürlicher Prozeß niemals als einziges Resultat einer Gesamtheit von gleichgültig wie vielen und welchen Prozessen erscheinen kann. In diesen Worten, welche den Charakter eines Postulats haben, ist das ganze Fundament der alten oder, wie man sie jetzt nennt, „klassischen“ Thermodynamik enthalten. Ein Spezialfall ist das Postulat von Clausius, auf dessen Grundlage er die Thermodynamik aufgebaut hat und in folgenden, recht unglücklich gewählten Worten aussprach: „die Wärme kann nicht von selbst von einem kälteren Körper zu einem wärmeren übergehen“. Dieser anfänglich

oft mißverständene Satz soll besagen, daß ein solcher Wärmeübergang nicht nur niemals von selbst im buchstäblichen Sinne des Wortes vor sich geht, sondern auch niemals als einziges Resultat aus einer Verknüpfung beliebiger physikalischer oder chemischer Prozesse hervorgehen kann. Es ist wohl möglich, Wärme einem kälteren Körper zu entnehmen und sie auf einen wärmeren Körper zu übertragen, doch muß man dabei unbedingt eine Reihe von anderen Prozessen ausführen, deren Resultate zum Schluß nicht verschwinden, so daß der Wärmeübergang nicht als einziger geschehener Prozeß übrig bleibt.

Natürliche Prozesse sind z. B.:

1. Übergang der Wärme von einem wärmeren Körper zu einem kälteren.
2. Übergang von Arbeit in Wärme.
3. Die gegenseitige Diffusion zweier Stoffe, z. B. zweier Gase oder zweier Flüssigkeiten, Diffusion bei der Lösung.
4. Ausdehnung eines Gases in einem leeren Raum und überhaupt der Übergang einer Gasmenge aus einem Raume, wo der Druck größer ist, in einen Raum mit kleinerem Drucke (ohne Temperaturveränderung des Gases).

Dazu entgegengesetzte Prozesse sind unnatürlich, z. B.:

1. Übergang der Wärme von einem kälteren Körper zu einem wärmeren.
2. Trennung eines Gemisches von Gasen oder Flüssigkeiten in seine Bestandteile.
3. Übergang der Wärme in Arbeit (Wärmemaschinen).
4. Die Kompression (Verdichtung) eines Gases ohne Temperaturveränderung.

Wir sehen, daß zwischen zwei einander entgegengesetzten Prozessen ein tiefgehender Unterschied besteht. Der eine von ihnen geht leicht von selbst vor sich, ohne von anderweitigen Prozessen begleitet zu sein; der andere kann nur als eines von den Resultaten einer Gesamtheit mehrerer Prozesse erhalten werden, wobei außer ihm noch mindestens ein Prozeß nicht vernichtet wird, so daß die von ihm hervorgerufene Veränderung in irgendwelchen umgebenden Körpern nachbleibt, welche an jenen Prozessen teilnehmen, die den unnatürlichen Prozeß begleiten mußten. Hieraus entspringt schon der Gedanke, daß in den physikalischen Erscheinungen eine gewisse Tendenz herrscht, ein gewisses unaufhörliches Streben in einer bestimmten Richtung vor sich zu gehen, welche

aus irgendeinem Grunde im Vergleich zu der entgegengesetzten ganz außerordentlich bevorzugt ist.

Jetzt entsteht die Frage, welche Prozesse die unnatürlichen Prozesse unbedingt begleiten müssen, um durch ihre Anwesenheit das Zustandekommen des unnatürlichen Prozesses zu ermöglichen? Die Erforschung der uns umgebenden physikalischen Erscheinungen lieferte uns eine genaue und erschöpfende Antwort auf diese Frage. Es erweist sich, daß ein unnatürlicher (negativer) Prozeß nur dann stattfinden kann, wenn er von einem natürlichen (positiven) Prozesse begleitet wird. Wenn als Schlußresultat einer Gesamtheit von einer beliebigen Zahl irgendwelcher Prozesse eine Veränderung erscheint, welche einem unnatürlichen Prozesse entspricht, so ist unbedingt gleichzeitig auch eine einem natürlichen Prozesse entsprechende Veränderung entstanden. Vom zweiten Prozesse sagen wir dann, daß er den unnatürlichen Prozeß kompensiert. Man sieht leicht ein, daß diese Kompensation ganz bestimmten und genauen quantitativen Bedingungen gehorchen muß. Das bedeutet, daß der kompensierende natürliche Prozeß eine bestimmte „Intensität“ besitzen muß, welche in gesetzmäßiger Beziehung zur Art und Intensität des unnatürlichen Prozesses stehen muß. Wir werden sofort ein Beispiel einer solchen quantitativen Kompensation anführen.

Als Beispiele, welche das Vorhandensein einer Kompensation zeigen, wollen wir die Kompression und den Übergang von Wärme in Arbeit betrachten. Der erstere dieser zwei unnatürlichen Prozesse, das Zusammendrücken eines Gases, muß von einem Aufwande an Arbeit begleitet sein, wodurch das zusammengedrückte Gas erwärmt wird, und weiterhin von einem Übergang dieser Wärme von dem erwärmten Gase zu irgendwelchem kälteren Körper der Umgebung, da ja die Temperatur sich nicht verändern soll; beides natürliche Prozesse. Etwas eingehender wollen wir den unnatürlichen Prozeß des Überganges von Wärme in Arbeit betrachten, welcher in der Dampfmaschine verwirklicht wird. Es zeigt sich, daß für die Wirkung einer solchen Maschine das Vorhandensein eines Dampfkessels und eines Kühlers Vorbedingung ist, wobei der erstere wärmer sein muß als der letztere. Hier wird der unnatürliche Prozeß des Übergangs von Wärme in Arbeit durch den natürlichen Prozeß des Übergangs der Wärme vom Dampfkessel zum Kühler kompensiert. Das quantitative Gesetz der Kompensation kann in diesem Falle leicht angegeben werden. Dem Dampfkessel werde eine gewisse Wärmemenge Q_1 entnommen, wobei

der Teil Q_2 in den Kühler übergeht und der Rest $q = Q_1 - Q_2$ zur Arbeitserzeugung verbraucht wird. Der Übergang von Q_2 aus dem Dampfkessel in den Kühler kompensiert den unnatürlichen Übergang der Wärme q in Arbeit. Das quantitative Gesetz der Kompensation lautet: Die dem Kessel entnommene Wärmemenge Q_1 und die in den Kühler übergegangene Wärmemenge Q_2 müssen sich verhalten wie die absoluten Temperaturen des Dampfkessels und des Kühlers. Beträgt z. B. die absolute Temperatur des Dampfkessels 373° (100° C) und die des Kühlers 273° (0° C), so kann man leicht ausrechnen, daß nur 0,27 der dem Kessel entnommenen Wärme zur Erzeugung von Arbeit nützlich verbraucht wird, während 0,73 der Wärme nutzlos in den Kühler übergeht. Letztere Wärmemenge ist $\frac{73}{22} = 2,7$ mal größer als die erstere. Dieses Gesetz liefert die minimale notwendige Intensität des kompensierenden natürlichen Prozesses. Es ist aber klar, daß diese Intensität beliebig vergrößert werden kann, da ja die natürlichen Prozesse „von selbst“ vor sich gehen und quantitativ keiner Beschränkung unterliegen. Wenn im betrachteten Falle eine gewisse Wärmemenge in Arbeit übergeht, so muß mindestens eine 2,7mal größere Menge vom Dampfkessel zum Kühler übergehen. Es ist aber klar, daß auch eine viel größere Wärmemenge übergehen kann, und zwar nicht nur in den Kühler, sondern auch auf beliebige andere Körper, welche den Dampfkessel umgeben und kälter sind als er. Infolgedessen wird die nützlich verbrauchte Wärme noch kleiner als 0,27 der vom Kessel abgegebenen Wärmemenge sein.

Einen unnatürlichen Prozeß und den ihn gerade kompensierenden wollen wir als äquivalente Prozesse bezeichnen und ihre Intensität als gleich annehmen. Jetzt können wir sagen, daß die Intensität des kompensierenden natürlichen Prozesses gleich oder größer sein muß als die Intensität des unnatürlichen. Somit kann ein natürlicher Prozeß überall und immer und dabei mit unbeschränkter Intensität vor sich gehen, ein unnatürlicher muß aber von einem kompensierenden, ihm an Intensität mindestens gleichen Prozesse begleitet sein, wobei die Bedingung der gleichen Intensität thermodynamisch sich bestimmen läßt (vgl. oben die Bedingung für die Dampfmaschine). Hier tritt noch deutlicher die wichtige Tatsache zutage, daß in den Erscheinungen der physikalischen Welt eine gewisse Tendenz, ein gewisses Streben in einer Richtung vor sich zu gehen, vorhanden ist. Wir wollen jeden natürlichen Prozeß als einen Schritt vorwärts und jeden unnatürlichen als einen Schritt

rückwärts in dieser Richtung betrachten, und die Größe dieser Schritte als gleich annehmen, wenn die beiden Prozesse eine gleiche Intensität besitzen (einander äquivalent sind). Bei dieser bildlichen Betrachtungsweise können wir sagen, daß in unserer Welt unauflöshlich und überall Schritte vorwärts gemacht werden, während nirgends und unter keinen Bedingungen ein Schritt zurück gemacht werden kann. Im äußersten Falle können wir gleichzeitig einen Schritt zurück und einen ihm gleichen Schritt vorwärts beobachten, wenn nämlich ein unnatürlicher Prozeß durch einen natürlichen gerade kompensiert wird; beide zusammen genommen bedeuten einen Stillstand. Jedoch ist, wie wir am Beispiele der Dampfmaschine gezeigt haben, die Intensität des natürlichen Prozesses meist größer als zur Kompensation notwendig ist; der Schritt voraus ist größer als der Schritt zurück, so daß bei der Verwirklichung eines unnatürlichen Prozesses wir doch einen Schritt voraus in der Richtung jener Tendenz erhalten, welche aus allem Gesagten deutlich zutage tritt. Es ist klar, daß unsere Welt unentwegt in einer bestimmten Richtung sich entwickelt, in welcher sie immer vorwärts und niemals rückwärts schreitet. Diese Tendenz, diese Evolution unserer Welt ist eben der wesentliche Inhalt des zweiten Hauptsatzes.

Der erste Hauptsatz lehrt, wie wir gesehen haben, daß unsere Welt kein Chaos ist, daß die Erscheinungen bestimmten quantitativen Gesetzen gehorchen, daß eine Weltordnung existiert.

Der zweite Hauptsatz zeigt, daß unsere Welt ein Organismus ist, welcher sich in einer streng bestimmten Richtung entwickelt, daß sie dem ewigen Gesetze der Evolution unterworfen ist.

Viele Forscher bemühten sich (gemeint ist die Zeit vor Anfang der siebziger Jahre) das Wesen dieser Tendenz, dieser Evolution zu erraten und dementsprechend den Wortlaut des zweiten Hauptsatzes zu fassen. Solcher Fassungen gibt es nicht wenige, und wir wollen zunächst die erste der beiden von W. Thomson (später Lord Kelvin) gegebenen anführen. 1851 sprach er den zweiten Hauptsatz folgendermaßen aus: „Es ist unmöglich von irgendeinem Teil der Materie Arbeit zu erhalten, indem man ihn auf eine Temperatur abkühlt, welche tiefer ist, als die Temperatur des kältesten Körpers der Umgebung.“ Das ist begreiflich, weil ein gleichzeitiger kompensierender Übergang vom Wärme zu noch kälteren Körpern bei den angegebenen Bedingungen unmöglich ist. Von dieser Fassung gelangt man zu einer anderen, recht interessanten. Ein perpetuum

mobile zweiter Art, wollen wir eine solche Maschine nennen, welche auf Kosten jener ungeheuren Wärmevorräte arbeiten würde, welche uns von allen Seiten umgeben und sich in der Luft, in der Erdrinde und im Wasser der Flüsse, Seen, Meere und Ozeane befinden. Der zweite Hauptsatz zeigt, daß ein perpetuum mobile zweiter Art unmöglich ist, weil der unnatürliche Prozeß der Verwandlung der Wärme in Arbeit zu seiner Kompensation das Vorhandensein eines natürlichen Prozesses erfordert, dessen Verwirklichung in dem zur Kompensation erforderlichen Maße bei den auf der Erdoberfläche herrschenden Verhältnissen unmöglich ist. Am meisten populär und oft gebraucht ist die Fassung, welche W. Thomson 1852 gab, und welche unter dem Namen des Prinzips der Zerstreuung der Energie bekannt ist. Betrachtet man aufmerksam die verschiedensten natürlichen Prozesse, welche die Richtung der die Evolution unserer Welt bestimmenden Tendenz angeben, so erweist es sich vor allem, daß alle Energiearten zu einer gleichmäßigen Verteilung streben, zu einem Ausgleich ihrer Intensitätsunterschiede (Temperaturdifferenzen, Unterschiede im Grade der Elektrisierung, Niveauunterschiede von Flüssigkeiten usw.). Gleichzeitig gehen alle Energieformen in Wärmeenergie über, welche gleichfalls zu einer gleichmäßigen Verteilung strebt und schließlich als Strahlungsenergie in den Weltraum ausgesandt wird. Dieses alles führt uns auf das berühmte Prinzip der Energiezerstreuung: Die in unserer Welt vorhandene Energie sucht sich zu zerstreuen, d. h. in gleichmäßig verteilte Wärmeenergie überzugehen, welche dann als Strahlungsenergie über das Weltall sich verbreitet.

Die obigen Ausführungen erschöpfen bei weitem nicht den Inhalt der Thermodynamik vor 50 Jahren. Wir müssen, ohne auf die Einzelheiten einzugehen, einen der wichtigsten Teile der Leistung von Clausius noch besprechen, indem wir in aller Kürze seine Lehre von der Entropie erwähnen. Jeder Körper oder System von Körpern befindet sich in jedem Zeitmoment in einem bestimmten Zustande; diese Bezeichnung verstehen wir in einem bedeutend weiteren Sinne als in der Elementarphysik, wo man über die drei „Zustände“ (Aggregatzustände) von Stoffen spricht, nämlich fest, flüssig und gasförmig. Jede, auch noch so geringe Änderung, welche im Körper oder in irgendeinem Teile eines Systems von Körpern vor sich gegangen ist, wollen wir als Zustandsänderung bezeichnen, z. B. Änderung des Volumens, der Temperatur, der Elektrisierung, der chemischen Zusammensetzung, Formänderung, Bewegungen usf.

Jede physikalische Größe, welche vom Zustande des Stoffes abhängt und sich mit ihm verändert, wollen wir Zustandsfunktionen nennen. Wesentlich ist, daß sie nur vom Zustande des Körpers oder Systems, nicht aber davon, wie der Körper oder System in diesen Zustand gekommen ist, abhängen. Einfacher gesagt, sie hängen nicht von den vorausgegangenen Zuständen des Körpers oder Systems ab. Daraus folgt, daß, wenn ein Körper oder System nach beliebiger Zustandsänderung von neuem genau in seinen Ausgangszustand zurückkehrt, alle physikalischen Größen, welche Zustandsfunktionen sind, wieder ihre früheren Werte annehmen. Ein typisches Beispiel einer Zustandsfunktion ist die Energie, deren ganzer Vorrat durch den Zustand des Systems vollständig bestimmt ist. (Wir wollen im weiteren nicht wiederholen, daß das System im Spezialfalle auf einen einzigen Körper beschränkt sein kann.) Kehrt das System zu seinem Ausgangszustande zurück, so nimmt die Energie ihren früheren Wert an. Der ganze Energievorrat eines Systems läßt sich nicht bestimmen, wir können aber die Änderung dieses Vorrates beim Übergang aus einem Zustand in einen anderen, d. h. den Unterschied der Energien zweier Zustände berechnen. Zu diesem Zwecke müssen wir verfolgen, wieviel Energie das System beim Übergang aus dem ersten Zustande in den zweiten von außen erhalten, und wieviel es an die Außenwelt abgegeben hat. Wir haben gesehen, daß in einem abgeschlossenem Systeme der ganze Energievorrat sich nicht ändert.

Clausius zeigte nun, daß noch eine zweite, nicht minder wichtige Zustandsfunktion vorhanden ist, welche er Entropie des Systems nannte. Sie ist vollständig (eindeutig) durch den Zustand des Systems bestimmt und nimmt ihren früheren Wert an, wenn das System, nach dem in ihm beliebige Prozesse abgelaufen sind, wieder in seinen Anfangszustand zurückkehrt. Clausius gab eine exakte Regel, wie der Entropieunterschied zweier willkürlicher Zustände des Systems berechnet werden muß. Offenbar hängt diese Differenz nur vom Anfangs- und Endzustande ab; die Art und Weise wie der Übergang aus dem einen Zustande in den anderen erfolgt ist, kommt nicht in Betracht. Die ganze Entropie eines Systems kann, ebenso wie die ganze Energie, ohne besondere Zusatzbedingungen nicht bestimmt werden. Mit Hilfe des Begriffes der Entropie, dieser von ihm entdeckten und mathematisch begründeten Zustandsfunktion, konnte Clausius ein Gesetz formulieren, welches in seiner weltumfassenden Bedeutung dem Prinzip der Erhaltung der Energie an die Seite tritt. Dieses Gesetz enthält zugleich eine der einfachsten

und elegantesten Fassungen des zweiten Hauptsatzes und ist unter dem Namen: „Prinzip der Vermehrung der Entropie“ bekannt. Es lautet: Die Entropie eines geschlossenen Systems kann nur zunehmen oder unverändert bleiben; sie kann nie abnehmen. Clausius zeigte auch, wie man mit Hilfe dieses Prinzips die Gleichungen aufzustellen hat, welche die für den betrachteten physikalischen Prozeß charakteristischen Größen in Beziehung setzen. Somit liefern uns die beiden Hauptsätze der Thermodynamik — die Erhaltung der Energie und die Vermehrung der Entropie — zwei Gleichungen zwischen verschiedenen physikalischen Größen. Die wertvollsten Resultate ergeben sich, wie sich zeigt, aus der Verbindung dieser zwei Gleichungen, wobei ganz unerwartete und erstaunliche Gesetzmäßigkeiten, welche zwischen verschiedenen physikalischen Größen bestehen, zutage treten. Die Thermodynamik hat uns somit eines der mächtigsten Werkzeuge der Forschung in die Hand gegeben und die Wissenschaft instand gesetzt, die Eigenschaften physikalischer Größen und die Gesetzmäßigkeiten der physikalischen Erscheinungswelt unvergleichlich tiefer zu erforschen, als es durch rein experimentelle Methoden möglich gewesen wäre. Vor 50 Jahren hatte man die beiden Hauptsätze der Thermodynamik bereits auf eine Reihe von Erscheinungen angewandt und auf diese Weise zahlreiche neue Gesetzmäßigkeiten entdeckt.

Da nun unsere Hauptaufgabe in dem Vergleiche zwischen der modernen Physik und der Physik vor 50 Jahren besteht, müssen wir noch einige charakteristische Züge jener „klassischen“ Thermodynamik unterstreichen, auf deren Begründung und Entwicklung die Wissenschaft vor 50 Jahren mit Recht stolz sein konnte. Eine Zusammenfassung dieser charakteristischen Züge der alten Thermodynamik können wir in folgenden sieben Punkten geben:

1. Der zweite Hauptsatz: das Vorhandensein einer Welttendenz, das Prinzip der Zerstreung der Energie oder endlich das Prinzip der Vermehrung der Entropie — war entdeckt und die mathematischen Methoden seiner Anwendung auf die Theorie physikalischer Erscheinungen und auf die Auffindung neuer gesetzmäßiger Zusammenhänge zwischen verschiedenen physikalischen Größen ausgearbeitet.

2. Vollständig dunkel blieb aber die außerordentlich wichtige Frage nach dem Ursprunge dieser Tendenz, dieser durch keine Macht aufzuhaltenden Evolution der Welt; über das Wesen der verborgenen Federn, welche die physikalischen Prozesse in einer

bestimmten Richtung treiben, war man nicht imstande etwas auszusagen. Die Thermodynamik war ausschließlich auf einem Postulate begründet, welches man sehr verschieden formulieren konnte (Clausius, W. Thomson u. a.), und dessen Richtigkeit nur einen gewissen Grad von Wahrscheinlichkeit erlangen konnte, soweit nämlich die aus ihm deduktiv erhaltenen Folgerungen bei einer experimentellen Prüfung sich bewährten. Das Postulat mit der aus ihm folgenden Welttendenz und der Möglichkeit nach bestimmten mathematischen Vorschriften aus ihm gesetzmäßige Beziehungen zwischen physikalischen Größen abzuleiten — wurde als Tatsache, als Folge einer unzweifelhaft vorhandenen Eigenschaft unserer Welt angenommen. Die Frage, woher unsere Welt diese Eigenschaft besitzt, blieb unbeantwortet. Man konnte stolz darauf sein, daß diese Eigenschaft entdeckt war, man konnte aus ihr Schlußfolgerungen ziehen, die Frage, wie sie eigentlich zustande kommt, blieb offen.

3. Einige Forscher versuchten den zweiten Hauptsatz aus den Gesetzen der Mechanik abzuleiten. Diese Versuche blieben aber erfolglos — sie bezogen sich auf Spezialfälle, es fehlte ihnen die Allgemeingültigkeit, und sie konnten gewisser Zusatzhypothesen nicht entbehren.

4. Unaufgeklärt blieb auch der seltsame Widerspruch zwischen dem zweiten Hauptsatz und einer der Grundlagen der damaligen Weltauffassung. Diese Grundlage haben wir schon ausführlich behandelt; sie bestand in der fast dogmatischen Voraussetzung, daß alle physikalischen Erscheinungen auf rein mechanische zurückgeführt werden könnten. Der Mechanik fehlt aber der Begriff der Nichtumkehrbarkeit vollständig, für sie sind alle Prozesse umkehrbar; alle wirklichen Prozesse sind hingegen, wie wir gesehen haben, nicht umkehrbar. Man gelangt somit zu folgender Ungereimtheit, wenn man drei, allem Anschein nach unbestrittene Behauptungen zusammenstellt:

Alle physikalischen Erscheinungen sind mechanische Erscheinungen.

Alle mechanischen Erscheinungen sind umkehrbar.

Alle physikalischen Erscheinungen sind nicht umkehrbar.

Dieser „Pseudosyllogismus“, wie man ihn bezeichnen kann, blieb unaufgeklärt, es fehlte der Schlüssel zum Geheimnis der Nichtumkehrbarkeit der physikalischen Prozesse.

5. Zu den charakteristischen Zügen der Thermodynamik vor 50 Jahren kann man auch den Umstand rechnen, daß sie außer

der Entropie keine wesentlich neuen Zustandsfunktionen betrachtete.

6. Die Anwendung der Thermodynamik erstreckte sich fast ausschließlich auf verhältnismäßig sehr einfache Systeme. Man hatte zunächst einzelne Stoffe, d. h. einphasige Systeme thermodynamisch untersucht, z. B. ideale und reelle Gase, Flüssigkeiten und feste Körper (ihre Deformationen). Wir wollen nebenbei bemerken, daß man als Phasen solche Bestandteile eines Systems bezeichnet, welche rein mechanisch (durch eine Wand, vermitteltst eines Siebes oder Löffels) voneinander getrennt werden können. Des weiteren wurden auch zweiphasige Systeme in dem Falle, wo beide Phasen dieselbe chemische Zusammensetzung besitzen, untersucht, z. B. eine Flüssigkeit und ihr Dampf, ein Stoff im festen und flüssigen Zustande (Wasser und Eis) oder in zwei polymorphen Zuständen (rhombischer und monokliner Schwefel). Auch einige einfache physikalische Erscheinungen, wie z. B. die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten, waren vom thermodynamischen Standpunkte betrachtet worden. Als unabhängige Größen, welche den Zustand bestimmen, kamen fast ausschließlich Volumen, Druck und Temperatur in Betracht. Mit der Anwendung der Thermodynamik auf elektrische und magnetische Erscheinungen hatte man eben erst begonnen.

7. Auf chemische Erscheinungen wurde die Thermodynamik fast gar nicht und auf die Erscheinungen der Strahlung überhaupt nicht angewandt.

§ 6. Theorie des Lichtes. Wir sagen nicht „Theorie der Strahlung“, weil diese Bezeichnung vor 50 Jahren noch nicht im Gebrauch war. Im nächsten Abschnitte werden wir auf diese Frage etwas näher eingehen. Die vor 50 Jahren herrschende Theorie des Lichtes hatte damals eine derartige Blütezeit zu verzeichnen, welche mit der Blütezeit der Himmelsmechanik zu vergleichen ist, zur Zeit als die letztere ihren größten Triumph in Gestalt der Entdeckung des Planeten Neptun feierte, welchen Leverrier auf Grund der in der Bewegung eines anderen Planeten (Uran) beobachteten Störungen durch Rechnung auffand. Die Lichttheorie des Anfangs der siebziger Jahre kann als bestes Beispiel für die im § 1 dieses Kapitels gegebene Charakteristik der Physik jener Zeit gelten. Die mechanische Weltauffassung tritt in dieser Theorie mit besonderer Klarheit und Schärfe in den Vordergrund. Alles Streben ist darauf gerichtet, alle bekannten Lichterscheinungen auf Grund einer rein mechanisch klaren und verständlichen Hypothese mit

Hilfe der Gesetze der Mechanik zu erklären. Die völlige Übereinstimmung der auf diese Weise erhaltenen Resultate mit den beobachteten Vorgängen und hauptsächlich — die Voraussage gänzlich neuer und unerwarteter Erscheinungen, welche sich als wirklich vorhanden herausstellten, verliehen den Grundlagen der alten Lichttheorie einen so hohen Grad von Wahrscheinlichkeit, daß man zu jener Zeit nicht umhin konnte zu glauben, daß diese Theorie, dieses erhabene, mustergültige wissenschaftliche Gebäude unzerstörbar und für ewige Zeiten erbaut sei, daß ihre Grundhypothesen dem wirklichen Tatbestande genau entsprachen. Es hatte den Anschein, daß keine andere physikalische Theorie jener Zeit mit der Theorie des Lichtes an fast allseitiger Vollendung, Klarheit und Durchsichtigkeit des Aufbaus, an Umfang und Wichtigkeit der erreichten Resultate gleich käme.

Die Grundlage dieser Theorie, nämlich die rein mechanische Vorstellung von Schwingungen der Ätherteilchen werden wir als bekannt voraussetzen. Von Huyghens (1629—1695) begründet, wurde sie im Anfang des 19. Jahrhunderts durch den englischen Forscher Thomas Young, in den genialen Arbeiten von Fresnel (angefangen von 1815) und Franz Neumann in Königsberg und einer Reihe anderer Mathematiker bis ins einzelne ausgearbeitet. Durch diese Forschungen waren alle jene Erscheinungen erklärt, welche schon früher entdeckt waren, von der Newtonschen Emissionstheorie aber nicht erklärt werden konnten, wie z. B. die doppelte Strahlenbrechung in Kristallen und die Beugung des Lichtes. Viel wichtiger ist aber der Umstand, daß durch diese unsterblichen Forschungen alle jene zahlreichen und mannigfaltigen Lichterscheinungen restlos erklärt wurden, welche zu Anfang des 19. Jahrhunderts entdeckt waren. Hierher gehört die Interferenz und Polarisierung des Lichtes (vgl. weiter unten), die natürliche Drehung der Polarisierungsebene in verschiedenen festen, flüssigen und gasförmigen Körpern, sowie die verwickelten Erscheinungen der Interferenz des polarisierten Lichtes in Kristallen (chromatische Polarisierung). Wir haben es hier nicht nötig auf diese Erscheinungen, deren Beschreibung in jedem nicht elementaren Lehrbuche der Physik zu finden ist, näher einzugehen. Nur der letzten Erscheinung wollen wir einige Worte widmen. Nimmt man eine oder mehrere aufeinander gelegte, aus ein- oder zweiachsigen Kristallen ausgeschnittene Platten, bringt sie zwischen einen Analysator und Polarisator (Nicol'sche Prismen oder Turmalinplatten) und läßt durch diese Anordnung ein divergentes Strahlenbündel

durchgehen, so erhält man verschiedenartige helle und dunkle, farbige Kurven, welche zuweilen eine recht bizarre Gestalt haben. Es sind dabei unzählige Kombinationen der Kristalle möglich, welche sehr verschieden aussehende Kurven liefern, weil die Gestalt der letzteren von einer ganzen Reihe von Umständen abhängt, nämlich davon, welche Kristalle man verwendet, wie die Platten gegeneinander gelegen (verdreht) sind, und wie groß ihre Anzahl ist. Die Kristalle können dabei ein- oder zweiachsig sein oder die Polarisations ebene drehen. Für jede beliebige Anordnung konnte man aber nach der Schwingungstheorie den Strahlengang verfolgen und die Gestalt der zu erhaltenden Figur durch Rechnung vorausbestimmen. Die experimentelle Prüfung bestätigte in allen Fällen ausnahmslos das theoretische Resultat, indem genau die durch die Rechnung vorausgesagte Figur zur Beobachtung gelangte. Doch den Höhepunkt des Triumphes der elastischen Ätherschwingungstheorie bildete die Entdeckung auf rein rechnerischem Wege einer neuen, im höchsten Grade merkwürdigen und sonderbaren Lichterscheinung, konische Refraktion genannt, welche wohl kaum rein experimentell aufgefunden worden wäre. Diese merkwürdige Erscheinung kommt folgendermaßen zustande. In den sogenannten zweiachsigen Kristallen pflanzt sich das Licht im allgemeinen nach sehr verwickelten Gesetzen fort, doch lassen sich die Erscheinungen in einer Reihe von verhältnismäßig einfachen Fällen ohne allzu große Schwierigkeiten übersehen. Der englische Mathematiker Hamilton stellte sich als erster die Aufgabe, die Lichtausbreitung in zweiachsigen Kristallen im allgemeinen Falle zu berechnen. Es befinde sich innerhalb eines solchen Kristalles ein leuchtender Punkt, von welchem die Lichtschwingungen nach allen Seiten ausgehen. Der geometrische Ort der Punkte, welche das ausgestrahlte Licht zu einem und demselben Zeitpunkte erreicht, wird die Wellenfläche genannt. In optisch isotropen Medien, d. h. in nicht kristallinen Stoffen und in Kristallen des regulären (kubischen) Systems, in welchen das Licht in allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit sich fortpflanzt, ist diese Wellenfläche offenbar die Oberfläche einer Kugel. In den einachsigen Kristallen läßt sich die Gestalt der Wellenfläche auch leicht berechnen und erklärt vollständig alle Erscheinungen der Doppelbrechung und der Interferenz des polarisierten Lichtes, welche in den Kristallen beobachtet werden. Die Wellenfläche der zweiachsigen Kristalle besitzt, wie Hamilton zeigte, eine sehr verwickelte Gestalt; an vier Stellen sind trichterförmige Vertiefungen vorhanden, und zwar derart, daß man eine jede

solche Vertiefung durch eine Ebene überbrücken kann, welche die Wellenfläche in einer unendlichen Anzahl von Punkten berührt, wobei der geometrische Ort dieser Punkte ein Kreis ist. Diese Besonderheit der Wellenfläche der zweiachsigen Kristalle ist die Ursache folgender zwei äußerst merkwürdiger Erscheinungen.

Man schneidet aus einem zweiachsigen Kristalle eine planparallele Platte aus, deren Richtung (im Kristalle) durch die Theorie gegeben wird. Läßt man auf die ebene Seitenfläche einer solchen Platte in einer, gleichfalls aus der Theorie zu bestimmenden Richtung einen Lichtstrahl auffallen, so zerfällt dieser Strahl bei seinem Eintritt in den Kristall in eine unendliche Anzahl von Strahlen, welche den Mantel eines Kegels bilden, dessen Grundlinie jener oben erwähnte Berührungskreis ist. Der so gebildete Lichtkegel ist nicht gefüllt, wie etwa ein Strahlenkegel, welcher von einem leuchtenden Punkte oder von dem Brennpunkte eines Hohlspiegels oder einer Linse ausgeht, sondern er ist ein Hohlkegel und die Strahlen bilden die Erzeugenden seiner Mantelfläche. Beim Austritte aus der zweiten Begrenzungsebene der Platte werden die Strahlen nochmals gebrochen, und zwar so, daß sie alle der Richtung des ursprünglichen Strahles parallel werden. Aus der Platte tritt also ein Hohlzylinder von Strahlen aus; die Strahlen bilden die Erzeugenden seines Mantels. Fängt man die Strahlen auf einem Schirme auf, so erhält man einen hellen Kreisring, dessen Durchmesser sich nicht ändert, wenn man den Schirm in verschiedene Entfernungen von der Platte bringt. Diese Erscheinung erhielt den Namen innere konische Refraktion.

Noch eine zweite Erscheinung konnte Hamilton theoretisch entdecken. Wenn man gewisse theoretische Vorschriften genau befolgt, so kann man es erreichen, daß innerhalb des Kristalls der Lichtstrahl in einer ganz bestimmten Richtung, nämlich in einer der sogenannten optischen Achsen verläuft. Bei seinem Austritte aus der Platte zerfällt er in eine unendliche Zahl von Strahlen, welche die Mantelfläche eines freilich sehr spitzen Kegels bilden. Läßt man sie auf einen Schirm fallen, so erhält man wieder einen hellen Kreisring, dessen Durchmesser aber mit der Entfernung des Schirmes von der Platte zunimmt. Diese Erscheinung wird äußere konische Refraktion genannt.

Das Vorhandensein dieser zwei merkwürdigen Erscheinungen war, wie gesagt, von Hamilton rein theoretisch entdeckt; ihre Notwendigkeit war durch Rechnung festgestellt, vorhergesagt. Die experimentelle Prüfung, welche der englische Forscher Lloyd unter genauer Erfüllung der von der Hamiltonschen Theorie geforderten

Bedingungen ausführte, bestätigte das Vorhandensein dieser Erscheinungen. Es ist sehr wenig wahrscheinlich, daß man diese Erscheinungen jemals experimentell entdeckt hätte, weil sie nur bei einer sehr genauen Erfüllung bestimmter Bedingungen zustande kommen, welche ohne theoretische Vorausberechnung schwerlich erraten worden wären; daß sie bei rein experimentellen Forschungen zufällig eingetreten wären, ist gleichfalls sehr unwahrscheinlich. Die Entdeckung der konischen Refraktion, dieser ganz sonderbaren physikalischen Erscheinung, durch theoretische Rechnung ist eines der bemerkenswertesten Ereignisse in der Geschichte der Physik, ja der Kulturgeschichte überhaupt, und kann entschieden der Entdeckung des Neptuns durch Leverrier an die Seite gestellt werden. Sie war ein großer Triumph der Lichttheorie, der Theorie der im Äther sich fortpflanzenden elastischen Schwingungen, einer Theorie, welche vollständig auf den Gesetzen der Mechanik beruhte.

Die allgemein anerkannte Lichttheorie war vor 50 Jahren ein mustergültiges Lehrgebäude, das Vollkommenste unter allen Lehrgebäuden der Physik. Indem es alle möglichen Lichterscheinungen erklären und auch neue voraussagen konnte, schien es auf unerschütterlicher Grundlage und auf ewige Zeiten erbaut zu sein. An der Richtigkeit ihrer Grundlagen konnte man nicht zweifeln; das Vorhandensein eines elastischen Äthers als Lichtüberträgers schien endgültig bewiesen zu sein. Neben der molekularkinetischen Theorie, und vielleicht in noch höherem Maße als diese, ist die Lichttheorie kennzeichnend für jenen Charakter und jene Methoden der Physik vor 50 Jahren, welche die herrschende Weltauffassung jener Zeit zum Ausdruck bringen. Wenden wir uns nun zu den wenigen dunklen Flecken, welche ein aufmerksamer Beobachter schon damals in dem hellen Glanze der Theorie der elastischen Schwingungen des hypothetischen Mediums — Äther — entdecken konnte.

Ein sehr bedeutender Vorzug einer jeden physikalischen Theorie ist die Einfachheit ihrer Grundlagen, d. h. vor allen Dingen der Hypothese, von welcher sie ausgeht, und auf welcher sie alles Weitere aufbaut. Kann sie mit einer Hypothese nicht auskommen, muß sie zur Erklärung der beobachteten Erscheinungen Zusatzhypothesen in immer anwachsender Anzahl einführen; so beeinträchtigt dieser Umstand ihren wissenschaftlichen Wert und dient als sicheres Kennzeichen des Verfalles. Sie geht ihrem Tode entgegen, ihre Rolle in der Geschichte ist bald ausgespielt und sicherlich naht schon der Zeitpunkt, wo eine andere Theorie, vollkommener, einfacher und auf einer neuen Hypothese erbaut, ihren Platz einnehmen wird.

Manchmal gibt ein neues Experiment den Ausschlag zugunsten der neuen Theorie. So verhielt es sich z. B. mit dem Zusammenbruch der Emissionstheorie von Newton, welche von der Hypothese ausging, daß die leuchtenden Körper besondere Lichtteilchen aussenden sollten. Die geradlinige Ausbreitung und die Reflexion des Lichtes konnten leicht erklärt werden. Um aber zu verstehen, warum bei der Lichtbrechung einige von den Teilchen zurückgeworfen, gespiegelt werden, andere aber in den getroffenen durchsichtigen Körper eindringen, brauchte schon Newton die Zusatzhypothese von zwei verschiedenen Zuständen (Anwandlungen), welche die Lichtteilchen haben könnten. Zur Erklärung der großen Zahl von optischen Erscheinungen, welche hauptsächlich im Anfange des 19. Jahrhunderts entdeckt wurden, und von denen im vorhergehenden die Rede war, waren die Anhänger der Emissionstheorie gezwungen, immer neue und neue Zusatzhypothesen ad hoc auszudenken, während die Verteidiger der Schwingungstheorie diese Erscheinungen mit Leichtigkeit erklären konnten, indem sie deren Notwendigkeit aus den Grundannahmen ihrer Theorie herleiteten. Der Vergleich der Lichtgeschwindigkeiten in Luft und Wasser (Foucault, 1850) gab der Schwingungstheorie das endgültige Übergewicht über die Emissionstheorie.

Doch auch die Schwingungstheorie konnte sich nicht mit der einen Hypothese begnügen, daß nämlich ein elastischer Äther existiert, in welchem die schwingende Bewegung seiner Teilchen sich fortpflanzt. Schon ganz am Anfange mußte sie nicht so sehr neue Zusatzhypothesen einführen, als die Grundhypothese durch gewisse Annahmen vervollständigen, welche indessen nichts Unwahrscheinliches an sich hatten und fast mit Notwendigkeit aus der Grundhypothese zu folgen schienen. Es sind das verschiedenartige Annahmen über besondere Eigenschaften des Äthers, welcher sich innerhalb der Materie befindet. Man nahm an, daß im inneren der Materie die Elastizität (Fresnel) oder die Dichte (F. Neumann) des Äthers einen anderen Wert als im leeren Raume besitzen. Dadurch konnte man erklären, daß die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Körpern verschieden ist, und zwar kleiner als im leeren Raume. Wir wollen hierzu bemerken, daß diese Geschwindigkeit von der Elastizität und der Dichte abhängt, wie es in der Elastizitätstheorie für die Fortpflanzung von Schwingungen in jedem elastischen Medium bewiesen wird. Ebenso natürlich und plausibel erschien die Annahme, daß in den anisotropen Körpern (Kristallen) die Elastizität oder die Dichte von der Richtung abhängen sollte. Auf diese Weise er-

klärte man leicht die gewöhnliche und die Doppelbrechung. Doch gab es auch Erscheinungen, welche sich nicht so leicht erklären ließen. Dazu gehört allgemein die Abhängigkeit der Erscheinungen von der Art (Farbe) der Strahlen, d. h. von der Wellenlänge, welche bekanntlich gleich der Strecke ist, welche der Lichtstrahl während der Dauer einer Schwingung durchläuft; je rascher die Schwingungen aufeinanderfolgen, um so kürzer ist die Wellenlänge. Die einfachste Erscheinung dieser Art ist die gewöhnliche normale Dispersion, d. h. die Verminderung der Geschwindigkeit (Vergrößerung des Brechungsindex) mit der Verkleinerung der Wellenlänge, wodurch die Zerlegung des Lichtes durch eine Prisma zustande kommt. Eine ähnliche Erscheinung beobachten wir bei der natürlichen Drehung der Polarisationssebene, z. B. im Quarze, wo die Größe der Drehung (vgl. die Erklärung weiter unten) von der Wellenlänge abhängt und mit ihrer Abnahme rasch zunimmt. Diese Abhängigkeit von der Wellenlänge kann nur mit Hilfe von Zusatzhypothesen erklärt werden. Man mußte eine Rückwirkung der materiellen Teilchen auf die Schwingungen der Ätherteilchen zulassen, wobei die Auswahl des Gesetzes, nach welchem diese Wirkung stattfinden sollte, der Willkür des Forschers, welcher die gesuchte Erklärung finden wollte, überlassen blieb. Man nahm z. B. an, daß das schwingende Ätherteilchen innerhalb der Materie einer besonderen Zusatzkraft unterworfen sei, welche von dem Werte ihrer augenblicklichen Geschwindigkeit abhängt; eine solche Kraft würde von der Art einer Reibung sein, welche das Teilchen bei seiner Bewegung erfährt. Wenn auch eine Wirkung der Materie auf den Äther sehr plausibel erscheinen mag, so haben wir es doch hier mit einer Zusatzhypothese zu tun, welche in die Schwingungstheorie ein ihr unmittelbar fremdes Element einführt.

Die Sachlage wurde noch verwickelter, als man die Erscheinung der sogenannten anomalen Dispersion entdeckt und erforscht hatte, welche darin besteht, daß in gewissen Bereichen des Spektrums die Brechbarkeit mit der Abnahme der Wellenlänge des Lichtes nicht zu-, sondern abnimmt. Es wurde festgestellt, daß alle Stoffe mindestens einen, manchmal auch mehrere Spektralbereiche besitzen, in denen eine anomale Dispersion stattfindet, obgleich es nicht immer möglich ist, diese Gebiete unmittelbar zu beobachten. Weiterhin wurde gefunden, daß die Erscheinung der anomalen Dispersion in engster Beziehung zu der Erscheinung der Absorption steht, derart, daß die erstere in der Nähe der Absorptionsstreifen im Spektrum stattfindet. Wir wollen hinzufügen, daß die Er-

scheinung der Absorption ebenfalls ohne eine Zusatzhypothese nicht erklärt werden kann, wobei man wiederum eine Wechselwirkung zwischen den materiellen Teilchen und den schwingenden Äthertheilchen annehmen muß. Eine ganze Reihe von Physikern und Mathematikern versuchten die Theorie der elastischen Ätherschwingungen unter Hinzuziehung solcher Hypothesen zu erweitern, um die Erscheinungen der Absorption und Dispersion zu erklären.

Das soeben Gesagte war aber nicht der einzige dunkle Punkt auf dem strahlenden Antlitz der Lichttheorie, welche vor 50 Jahren den Stolz der Physik bildete. Man kann noch einen dunklen Punkt ausfindig machen, dunkler, wichtiger, sonderbarer und verhängnisvoller für die Theorie selbst. Es handelt sich darum, daß vor 50 Jahren einige Erscheinungen schon bekannt und studiert waren, in welchen ein gewisser Zusammenhang zwischen den Lichterscheinungen einerseits und den elektrischen und magnetischen andererseits zutage trat.

Diese Erscheinungen paßten durchaus nicht in den Rahmen der Theorie der Schwingungen des elastischen Äthers; keine Zusatzhypothesen konnten hier zum Ziele führen, d. h. diese Erscheinungen erklären. Man betrachte dieselben beinahe als Kuriosa, deren Erklärung vorläufig in die unbestimmte Zukunft zu verlegen sei. Man wird zugeben, daß dieser Punkt viel dunkler als der von uns an erster Stelle betrachtete ist. Dort mußte man Zusatzhypothesen einführen, indem man eine Wirkung der Materie auf den Äther annahm, wobei aber das Vorhandensein einer solchen Wirkung nicht nur plausibel, sondern, vom Standpunkte der damals herrschenden Weltauffassung, fast notwendig erschien, so daß nur die Frage nach der Form dieser Wirkung zu entscheiden blieb. Hier steht es viel schlimmer — es sind Erscheinungen da, welche man nicht erklären kann. Man geht an ihnen mit Achselzucken vorüber und macht fast gar keinen Versuch, sie vom Standpunkte der allgemeinen Lichttheorie zu erklären, ja man behandelt sie nicht in der Optik, sondern in einem ganz anderen Kapitel der Physik, in der Lehre von den elektrischen und magnetischen Erscheinungen, welche allem Anschein nach mit den Lichterscheinungen gar nichts zu tun haben. Und doch handelt es sich hier entweder um die Wirkung der Lichtstrahlen auf einen materiellen Körper oder um die Wirkung gewisser äußerer Bedingungen auf die Lichtstrahlen. Wir wollen jetzt zwei solche Erscheinungen, welche vor 50 Jahren eingehend erforscht waren, näher betrachten.

Die erste war etwa 1870 von Mai entdeckt und bestand darin, daß die elektrische Leitfähigkeit des Selens, eines in der

Dunkelheit sehr schlechten Leiters, sehr stark ansteigt, wenn seine Oberfläche von Lichtstrahlen getroffen wird. Sobald die Lichtstrahlen ausgeschaltet werden, nimmt die Leitfähigkeit wieder ab. Der Zusammenhang zwischen der Beleuchtung und der Leitfähigkeit paßte durchaus nicht in den Rahmen der Ätherschwingungstheorie. Wie konnten diese Schwingungen auf die Strömung der Elektrizität im Inneren der Materie einwirken? Auf diese Frage konnte man selbst mit Hilfe von wahrscheinlichen oder nur plausiblen Zusatzhypothesen keine Antwort geben, wenn man an der Grundvorstellung von den Ätherschwingungen festhielt und keine ganz fremden Elemente in die Theorie hereinbringen wollte. Die Wirkung des Lichtes auf das Selen war damals eine ganz einzelstehende Tatsache, ohne irgendwelchen Zusammenhang mit anderen ähnlichen; man konnte sie nur als Kuriosum betrachten und ihr keine besondere Bedeutung beimessen.

Das eben Gesagte gilt in gleicher Weise für eine andere Erscheinung, welche Faraday 1845 entdeckte; sie findet in durchsichtigen Körpern statt und ist unter dem Namen der magnetischen Drehung der Polarisationssebene bekannt. Um sie näher kennen zu lernen, müssen wir einige Worte der schon früher erwähnten Polarisation des Lichtes widmen, wobei wir uns natürlich auf den Standpunkt der Ätherschwingungstheorie stellen. Die Schwingungen der Ätherteilchen finden in allen Punkten des Lichtstrahles statt, genau ebenso wie in jedem Punkte eines Schallstrahles, welcher sich durch die Luft fortpflanzt, Schwingungen von Luftteilchen stattfinden. Doch besteht zwischen diesen beiden Erscheinungen ein wesentlicher Unterschied. Die Schallschwingungen sind longitudinal (Längsschwingungen), d. h. die Schwingungen der Luftteilchen oder der Teilchen eines anderen Gases finden in der Richtung des Strahles statt. Aus der Elementarphysik ist es bekannt, daß dadurch längs dem Strahle abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen entstehen, welche sich in Richtung des Strahles mit einer bestimmten Geschwindigkeit fortpflanzen; diese Geschwindigkeit ist eben die Schallgeschwindigkeit. In einem bestimmten Punkte des Strahles wechseln zeitlich Verdichtungen und Verdünnungen ab. Im Lichtstrahl haben wir dagegen transversale Schwingungen (Querschwingungen), das heißt die Schwingungen der Ätherteilchen finden senkrecht zur Richtung des Strahles, also zur Fortpflanzungsrichtung statt. In den Strahlen, welche von leuchtenden, z. B. glühenden Körpern ausgesandt werden, geschehen die Schwingungen in allen möglichen,

aber zum Strahle immer senkrechten Richtungen. Mit anderen Worten, alle Ebenen, welche man durch die Richtung des Strahles legen kann, spielen die gleiche Rolle; keine ist vor den anderen irgendwie bevorzugt. Ein solcher Strahl wird ein natürlicher genannt. Wir können sagen, daß ein solcher Strahl natürlichen Lichtes überhaupt keine seitlichen Verschiedenheiten rings um die Fortpflanzungsrichtung aufweist; der Begriff einer Drehung eines solchen Strahles um sich selbst, um seine Richtung als Drehungsachse, hat eigentlich keinen Sinn, und selbst wenn man eine solche Drehung verwirklichen könnte, würde sie keinen Einfluß auf die Eigenschaften des Strahles haben.

Wir besitzen aber eine ganze Reihe von Verfahren, um solche Strahlen zu erzeugen, welche für das Auge von natürlichen Strahlen nicht zu unterscheiden sind, welche aber ein wesentlich anderes Verhalten zeigen. Diese Verfahren (Spiegelung, Brechung, Doppelbrechung) wollen wir hier nicht weiter beschreiben. Die so erhaltenen Strahlen nennt man polarisiert. Sie unterscheiden sich von den natürlichen Strahlen darin, daß in ihnen die Schwingungen aller Ätherteilchen in ein und derselben Ebene stattfinden, welche selbstverständlich auch die Strahlenrichtung enthält. Stellen wir uns einen horizontalen Lichtstrahl vor. Wenn es ein natürlicher Strahl ist, so geschehen die zu ihm senkrechten Schwingungen in Richtungen, welche alle möglichen Winkel mit der horizontalen Ebene bilden oder, was dasselbe besagt, alle diese Schwingungsrichtungen sind im Laufe eines sehr kurzen Zeitintervalles an demselben Punkte nacheinander vorhanden. Ist aber der Strahl polarisiert (zum Unterschiede von anderen Polarisationsarten muß man genauer sagen: „linear polarisiert“), so sind die Schwingungsrichtungen in allen Punkten parallel, liegen in einer Ebene und bilden daher denselben Winkel mit der horizontalen Ebene. In einem horizontalen polarisierten Lichtstrahle können alle Schwingungen z. B. in einer vertikalen Richtung, d. h. von oben nach unten und umgekehrt vor sich gehen; sie können auch horizontal sein, d. h. für einen längs dem Strahle blickenden Beobachter von links nach rechts und umgekehrt. Der Winkel zwischen der Schwingungsebene und der horizontalen Ebene kann auch alle anderen Werte annehmen, nicht nur 90° und 0° , wie in den angeführten Spezialfällen. Von einem solchen Strahle kann man schon nicht mehr sagen, daß er keine seitlichen Verschiedenheiten besitze; seine verschiedenen „Seiten“ können sich in ihren Eigenschaften unterscheiden. Betrachten wir z. B. einen horizontalen Strahl mit vertikal

gerichteten Schwingungen. In einem solchen Strahle stellen die Richtungen „oben“ und „unten“ etwas anderes vor und können andere Eigenschaften haben als die Richtungen „rechts“ und „links“, da in den ersteren die Schwingungen der Ätherteilchen vor sich gehen. Die Vorstellung von einer Drehung eines polarisierten Strahles um sich selbst hat einen bestimmten Sinn, und wir können eine solche Drehung bewerkstelligen, wenn wir die Vorrichtung (z. B. ein Nicolsches Prisma), welche auf irgendeine Weise den polarisierten Strahl erzeugt, entsprechend drehen. Indem wir einen horizontalen Strahl mit vertikalen Schwingungen um sich selbst drehen, können wir einen Strahl erhalten, in welchem die Schwingungen horizontal verlaufen, und dieses kann die Erscheinungen, welche bei der weiteren Fortpflanzung des Strahles eintreten, z. B. bei einer Brechung, beim Durchgang durch doppelbrechende Kristalle usf. — wesentlich abändern. Je nach der Größe der Drehung erhalten wir einen Strahl, in welchem die Schwingungsrichtung einen beliebigen Winkel mit der horizontalen Ebene bildet und es ist ohne weiteres klar, daß das eben Gesagte auf jeden polarisierten Strahl von beliebiger Richtung Anwendung findet.

Es gibt Stoffe, in welchen die, schon früher mehrmals erwähnte natürliche Drehung der Polarisationssebene stattfindet. Solche Stoffe nennt man optisch aktiv. Die Erscheinung besteht in folgendem. Nehmen wir der Deutlichkeit wegen an, daß der polarisierte Strahl horizontal verläuft und die Schwingungen vertikal gerichtet sind. Sobald der Strahl in ein optisch aktives Medium eintritt, beginnt die Schwingungsrichtung sich zu drehen, wobei der Winkel dieser Drehung proportional der im Medium durchlaufenen Strecke zunimmt. Es entsteht ein Strahl, in welchem in jedem Punkte die Schwingungen eine bestimmte, zeitlich unveränderliche Richtung besitzen, aber in zwei noch so nahe benachbarten Punkten nicht ganz parallel sind. Bei einer bestimmten Länge des Strahles in dem aktiven Medium werden die Schwingungen horizontal, bei der doppelten Länge — wieder vertikal usf. Der geometrische Ort der Geraden, längs welcher die Schwingungen vor sich gehen, erinnert an eine Schraubenlinie oder besser Schraubenfläche. In einigen Stoffen findet die Drehung nach links, in anderen nach rechts statt, wenn man dem Strahle entgegenblickt. Optisch aktiv sind einige einachsige Kristalle, besonders Quarz, aber nur wenn der Strahl sich in Richtung der optischen Achse fortpflanzt; des weiteren viele Flüssigkeiten, z. B. Zuckerlösung; auch einige Dämpfe drehen die Polarisationssebene. Eine Erklärung der Drehung

der Polarisationssebene gab Fresnel, doch ist diese Erklärung rein formal. Selbstverständlich mußte man auch hier eine Wirkung des Stoffes auf die schwingenden Teilchen annehmen.

Der Vollständigkeit halber wollen wir erwähnen, daß es außer den linear polarisierten Strahlen noch zirkular polarisierte und, als allgemeiner Fall, elliptisch polarisierte Strahlen gibt. Man nahm an, daß in diesen Strahlen die Ätherteilchen in Kreisen oder Ellipsen sich bewegen, deren Ebenen senkrecht zur Strahlenrichtung gelegen sind. Die Theorie der Ätherschwingungen konnte das Entstehen und die Eigenschaften dieser Strahlen widerspruchslos erklären.

Jetzt können wir auf jenen dunklen Punkt zurückkommen, welcher vor 50 Jahren zwar den Glanz der Ätherschwingungstheorie beeinträchtigte, den Forschern aber, wie es scheint, keinen besonderen Kummer verursachte. Es ist das die Erscheinung der magnetischen Drehung der Polarisationssebene, welche damals als eine merkwürdige, aber geheimnisvolle und unverständliche Tatsache betrachtet wurde und ganz vereinzelt und ohne sichtbarem Zusammenhang mit anderen Erscheinungen dastand. Das Wesen der Erscheinung besteht darin, daß ein durchsichtiger Körper, sobald er in ein Magnetfeld gebracht wird, optisch aktiv wird, und zwar in der Richtung der magnetischen Kraftlinien. Zum Beweise nehmen wir einen kräftigen Elektromagneten, bringen zwischen seine Pole einen durchsichtigen Körper (etwa eine Glasplatte oder Glasstab) und schicken durch ihn in Richtung der magnetischen Kraftlinien einen polarisierten Lichtstrahl, zu welchem Zwecke die Pole des Elektromagneten zwei Bohrungen mit gemeinsamer Achse haben müssen. Die Kraftlinien in der Mitte des Magnetfeldes können wir hinreichend genau als gerade Linien ansehen, welche die gegenüberliegenden Polflächen verbinden. Solange kein Strom in der Wicklung des Elektromagneten fließt und das Glas also dem magnetischen Felde nicht ausgesetzt ist, findet keine Drehung der Polarisationssebene statt. Sobald aber der Strom geschlossen und somit das Magnetfeld erregt wird, wird das Glas optisch aktiv und die Polarisationssebene erfährt eine Drehung. Der Betrag dieser Drehung hängt ab von dem Stoffe des durchsichtigen Körpers, von der Länge des Strahles in diesem Körper und von der Feldstärke. Die beschriebene Erscheinung weist deutlich auf einen bestimmten Zusammenhang zwischen den magnetischen und den Lichterscheinungen hin. Eine Erklärung dieser Erscheinung auf Grund der Vorstellungen, auf welchen die rein mechanische Ätherschwingungstheorie aufgebaut ist, war nicht möglich, wenn man nicht zu solchen

Zusatzhypothesen greifen wollte, welche diesen Grundvorstellungen durchaus fremd sind und in die Theorie des Lichtes solche Elemente einführen wollte, welche aus ganz anderen Gebieten physikalischer Erscheinungen entnommen sind und allem Anschein nach keinerlei Beziehung zu den Lichterscheinungen haben können.

Wir haben nun den Inhalt jener Lehre vom Lichte besprochen, welche vor 50 Jahren in der Physik herrschte. Wir haben auf ihre glänzende Entfaltung, ihre märchenhaften Erfolge hingewiesen; doch haben wir auch die, wenn auch wenig zahlreichen Umstände nicht verschwiegen, welche wir mit dunklen Punkten auf hellem Grunde verglichen haben. Um auch historisch genau zu sein, müssen wir noch auf folgende Tatsache hinweisen. Schon in den sechziger Jahren erschienen die ersten Arbeiten von Maxwell, welche die Darstellung der elektromagnetischen Lichttheorie enthielten. Somit war vor 50 Jahren tatsächlich schon jene neue Theorie vorhanden, welche als unerbittlicher Feind der Äther-schwingungstheorie auftreten und sie schonungslos vernichten sollte. Dieser Theorie war es beschieden, eines der wunderbarsten Lehrgebäude, welches für ewige Zeiten erbaut zu sein schien, niederzureißen, um an seiner Stelle ein neues Gebäude zu errichten und gänzlich neue Vorstellungen in die Wissenschaft einzuführen, welche später der die gesamte Physik beherrschenden mechanischen Welt-auffassung den Todesstoß versetzten. Doch haben wir vollständig recht, wenn wir hier die historischen Verhältnisse außer acht lassen, und zwar aus folgendem Grunde. Die Maxwellschen Aufsätze sind in ihrer ursprünglichen Form derart schwierig zu verstehen, daß sie nur von wenigen Forschern beachtet wurden. Außerdem hatte Maxwell den Grundlagen seiner Theorie keine klare und einfache mathematische Gestalt gegeben. Beachtet man noch, daß die Grundlagen der neuen Theorie sehr weit entfernt waren von den Vorstellungen, an welche sich die Forscher gewöhnt und in welche sie sich eingelebt hatten, so begreift man, daß diese neue Theorie den meisten überhaupt als ein nicht genügend begründetes und vor allen Dingen überflüssiges Phantasiegebilde erscheinen mußte, da sie ja an die Stelle einer klaren, verständlichen und alles erklärenden Theorie etwas Verschwommenes und Unverständliches setzen wollte. Einige sehr wesentliche Vorzüge der neuen Theorie blieben unbeachtet; die Nachteile der Theorie schienen damals bedeutend zu überwiegen. Die Sachlage änderte sich, als H. Hertz 1888 durch seine unsterblichen Experimente, von welchen im weiteren die Rede sein wird, die Richtigkeit der Grundlagen der elektromagnetischen Lichttheorie

bewies und, was von großer Wichtigkeit ist, der mathematischen Seite dieser Theorie eine einfache und elegante Gestalt gab. Von diesem Zeitpunkte an war die Ätherschwingungstheorie vernichtet und kein Forscher zögerte nunmehr, sich der Maxwell'schen elektromagnetischen Lichttheorie anzuschließen. Diese verspätete Anerkennung der neuen Lehre veranlaßt uns eben dazu, die Sachlage so darzustellen, als ob diese Lehre vor 50 Jahren überhaupt nicht vorhanden war und sie zu den großen wissenschaftlichen Errungenschaften des letzten Halbjahrhunderts zu rechnen.

§ 7. Die Spektralanalyse. Wir wollen zunächst an einige Grundbegriffe der Lehre von der Fortpflanzung der Schwingungen erinnern; diese Begriffe finden sowohl auf die Schallschwingungen, als auch auf die Lichtschwingungen Anwendung. Als Medium bezeichnen wir gewöhnlich einen Teil des Raumes, welcher von irgendeinem gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffe erfüllt wird, auch den leeren Raum, d. h. einen Raum, welcher nur Äther enthalten soll, wollen wir jetzt als Medium betrachten. In diesem Medium stellen wir uns eine Gerade vor, längs welcher die Teilchen gelegen sind und nehmen an, daß ein solches Teilchen zu schwingen anfängt. Infolge der Elastizität, welche wir dem Medium zuschreiben, beginnt dann auch das benachbarte Teilchen unserer Geraden zu schwingen, darauf das nächstbenachbarte usf. Auf diese Weise wird der Schwingungszustand längs der Geraden, welche wir Strahl nennen wollen, weitergegeben. Wir wollen annehmen, daß die Schwingungen transversal sind, d. h. daß sie senkrecht zur Richtung der Geraden erfolgen. Je weiter ein Teilchen von dem Orte, wo die Schwingungen begonnen hatten, sich befindet, um so später beginnt es seine Schwingung, doch nehmen wir an, daß alle Teilchen vollständig gleiche Schwingungen ausführen. Die Anzahl der Schwingungen, welche ein Teilchen in einer Sekunde ausführt, die sogenannte Schwingungszahl, bezeichnen wir mit N , und die Zeitdauer einer Schwingung, die Schwingungsdauer (Periode) durch T . Es ist ersichtlich

$$NT = 1 . \quad (1)$$

Die Strecke, um welche die Schwingungen im Zeitraume einer Sekunde übertragen werden, werden wir Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingungen nennen; für Lichtschwingungen im leeren Raume wollen wir diese Geschwindigkeit durch c bezeichnen. Diese Geschwindigkeit beträgt:

$$c = 3000000 \text{ km/sec.} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec.} \quad (2)$$

Die Strecke, um welche die Schwingungen während der Zeit, in welcher eine Schwingung geschieht, d. h. während der Schwingungsdauer, fortgepflanzt werden, nennt man die Wellenlänge des betreffenden Strahles; wir wollen sie durch λ bezeichnen. Es ist klar, daß

$$\lambda = cT \tag{3}$$

ist oder auf Grund von Formel (1), wenn man $T = 1:N$ einsetzt:

$$c = N\lambda . \tag{4}$$

Wir wollen voraussetzen, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c des Lichtes im leeren Raume nicht davon abhängt, ob die Schwingungen rasch oder langsam erfolgen, d. h. daß sie von der Schwingungszahl N oder der Schwingungsdauer T unabhängig ist. In diesem Falle ist, wie die Formeln (3) und (4) zeigen, die Wellenlänge λ direkt proportional der Schwingungsdauer T oder umgekehrt proportional der Schwingungszahl N . Je rascher die Schwingungen, um so kürzer ist die Wellenlänge. Innerhalb eines festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im leeren Raume; wir wollen sie mit c' bezeichnen. Die Schwingungsdauer T und die Schwingungszahl N ändern sich nicht, wenn ein Strahl aus dem leeren Raume in ein materielles Medium eintritt. Es sei λ' die Wellenlänge in einem solchen Medium. Anstatt (3) erhalten wir nun:

$$\lambda' = c' \cdot T . \tag{5}$$

Da $c' < c$, T sich aber nicht geändert hat, so ist es klar, daß die Wellenlänge λ' in einem materiellen Medium kleiner ist, als im leeren Raume. Doch wird die Sache viel verwickelter dadurch, daß c' nicht nur von der Beschaffenheit des Mediums, sondern auch für ein gegebenes Medium noch von der Schwingungszahl N oder der Schwingungsdauer T abhängt. Indem wir Formel (3) berücksichtigen, können wir sagen, daß die Geschwindigkeit c' von der Beschaffenheit des Strahles, d. h. von seiner Wellenlänge λ im leeren Raume abhängt. Da c' von T abhängt, so zeigt Formel (5), daß λ' nicht proportional T ist, sondern in einer minder einfachen Beziehung zur Schwingungszahl N und der Schwingungsdauer T steht, als die Größe λ , welche sich auf den leeren Raum bezieht.

Die Schwingungszahl N und die Schwingungsdauer T , welche gleich $1:N$ ist, können in weiten Grenzen beliebige Zahlenwerte annehmen; verschiedenen N , T oder λ entsprechen verschiedene Arten von Lichtstrahlen, welche, wenn sie für unsere Augen wirksam

sind, sich voneinander durch ihre Farbe unterscheiden. Die unendlich große Anzahl verschiedenartiger Strahlen können wir in Gedanken in eine ununterbrochene Reihe ordnen, z. B. von links nach rechts fortschreitend, wobei nach rechts die Schwingungszahl zunimmt, die Wellenlänge also abnimmt. Für Schallstrahlen wäre diese Reihe gleichzeitig nach wachsender Tonhöhe geordnet; ein rohes Bild einer solchen Reihe bieten die Saiten oder noch besser die Tasten eines Klaviers, obgleich natürlich die Saiten und Tasten nicht der unendlichen Anzahl der möglichen Töne, sondern nur den wenigen, welche in der Musik Verwendung finden, entsprechen. Bei den Lichtstrahlen wird eine solche Reihe Spektrum genannt. Es ist allgemein bekannt, wie man ein solches mit Hilfe eines Prismas praktisch verwirklicht.

Die Lichtgeschwindigkeit in der Luft unterscheidet sich sehr wenig von der Geschwindigkeit im leeren Raume und wir wollen sie gleich c annehmen. Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit in Luft (genauer im leeren Raume) zur Geschwindigkeit c' in irgendeinem Stoffe heißt der Brechungsindex dieses Stoffes. Wir bezeichnen ihn durch n und erhalten:

$$n = \frac{c}{c'} . \quad (6)$$

Je kleiner c' , um so größer ist n . Ein Strahl, welcher aus der Luft in irgendeinen anderen Stoff schief zu seiner Begrenzungsfläche eintritt, wird gebrochen. Ist der Stoff isotrop, also nicht doppelbrechend, so ist das Verhältnis des Sinus des Einfallswinkels α zum Sinus des Brechungswinkels β vom Einfallswinkel unabhängig und gleich dem Brechungsindex, so daß in diesem Spezialfalle

$$n = \frac{c}{c'} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} . \quad (7)$$

Wir sahen, daß c' von der Beschaffenheit des Strahles abhängt, d. h. von irgendeiner der Größen N , T , λ oder λ' . Daraus folgt, daß auch n von der Beschaffenheit des Strahles abhängt und bei gleichem Einfallswinkel α der Brechungswinkel β für verschiedene Strahlen verschieden ist. Je größer N , d. h. je kleiner T , λ und λ' , um so kleiner ist c' , um so größer der Brechungsindex und um so kleiner schließlich, bei gegebenem α , der Brechungswinkel β . Darauf beruht die normale Dispersion, die Zerlegung eines zusammengesetzten Strahles in seine Bestandteile, d. h. die Erzeugung eines Spektrums vermittelt eines Prismas. Wenn in einem Gebiete von benachbarten Strahlen die Geschwindigkeit c' mit der Zunahme

von N , also der Abnahme von λ , nicht absondern zunimmt, so entsteht die Erscheinung der sogenannten anomalen Dispersion, welche wir schon zu erwähnen Gelegenheit hatten.

Eine Schwingung heißt die Oktave einer anderen, wenn ihre Schwingungszahl N doppelt so groß und die Wellenlänge doppelt so klein ist, als die der anderen. In der Lehre vom Schalle, hauptsächlich in der Musik, wird von Oktaven gesprochen; wir wollen diese Bezeichnung auch auf die Lichterscheinungen anwenden. Die Wellenlänge von Strahlen pflegte man vor 50 Jahren in Millimetern und Mikronen auszudrücken; ein Mikron ist $0,001 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ cm}$ und wird durch μ bezeichnet; $0,001 \mu = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-7} \text{ cm}$ wird durch $\mu\mu$ bezeichnet. Wir wollen bemerken, daß im mittleren Gebiet des Spektrums der sichtbaren Strahlen die Wellenlänge rund

$$\lambda = \frac{1}{2000} \text{ mm} = 0,5 \mu = 500 \mu\mu$$

beträgt.

Es sei dann noch an das Dopplersche Prinzip erinnert, welches 1842 ausgesprochen wurde. Es besteht darin, daß die Schwingungszahl der vom Beobachter oder von seinem Apparate (Spektroskop) wahrgenommenen Schwingungen sich vergrößert, wenn die Schwingungsquelle und der Beobachter sich so bewegen, daß sie sich einander nähern; wenn sie sich voneinander entfernen, so nimmt die wahrgenommene Schwingungszahl ab, wobei man die Zu- und Abnahme der Schwingungszahl von der Normalschwingungszahl ab zu rechnen hat, welche der relativen Ruhe entspricht.

Jetzt wollen wir zu der Betrachtung dessen, was vor 50 Jahren den Inhalt der Wissenschaft der Spektralanalyse bildete, übergehen. Diese augenblicklich riesig ausgedehnte Wissenschaft befand sich damals in ihren ersten Anfängen. Man wußte, daß alle bis zum Leuchten erhitzten festen und flüssigen Körper das sogenannte weiße Licht ausstrahlen, welches ein kontinuierliches Spektrum gibt, das sich vom roten bis zum violetten Ende, und zwar wie üblich von links nach rechts erstreckt. Dieses Spektrum, dessen Grenzen etwa bei $\lambda = 0,76 \mu$ und $\lambda = 0,4 \mu$ liegen, erstreckt sich über ein Gebiet von etwas weniger als einer Oktave. Die Schwingungszahl für die äußersten roten Strahlen ist $4 \cdot 10^{14}$ und für die äußersten violetten $7,5 \cdot 10^{14}$ Schwingungen in der Sekunde. Die leuchtenden Gase und Dämpfe geben im allgemeinen ein Linienspektrum, bestehend aus einzelnen hellen Linien, welche manchmal in sehr großer Zahl über verschiedene Spektralbezirke verstreut sind. Es waren damals noch keinerlei Gesetzmäßigkeiten in

der Verteilung dieser Spektrallinien gefunden worden. Viele Absorptionsspektren, darunter dasjenige der Sonne mit seinen Fraunhoferschen Linien waren erforscht. Die erste Grundlage der Spektralanalyse als Wissenschaft war von Kirchhoff (1860) in seinem Gesetze geschaffen, welches besagt, daß jeder Körper unter anderen auch diejenigen Strahlen absorbiert, welche er selbst ausstrahlt. Dieses Gesetz erklärte die Herkunft der Fraunhoferschen Linien. Auch die Wärme- und chemischen Wirkungen verschiedener Spektralgebiete waren entdeckt worden.

Vor 50 Jahren wußte man schon, daß es außer den sichtbaren Strahlen auch unsichtbare Strahlen gibt, daß das Spektrum sich nach rechts und nach links von dem sichtbaren Gebiete erstreckt. Die beiden unsichtbaren Spektralgebiete erhielten die Namen: das Infrarot und das Ultraviolett. Doch hatte man mit der Erforschung dieser Spektralgebiete eben erst begonnen.

Die Astrophysik ist augenblicklich eine selbständige ausgedehnte Wissenschaft, welche eine Reihe von verschiedenartigen Fragen studiert. Sie besitzt eigene astrophysikalische Sternwarten, eigene Lehrstühle an den Universitäten und eigene Zeitschriften, welche ihr ausschließlich gewidmet sind. Man kann sagen, daß sie vor 50 Jahren eben im Entstehen begriffen war. Die einzige Frage, mit welcher sie schon damals sich ernstlich beschäftigte, war die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der äußeren Schichten der Sonne, wobei sie vom Kirchhoffschen Gesetze Gebrauch machte. Das Studium der Spektren der Fixsterne und Kometen wurde damals eben in Angriff genommen. Ebenso hatte man kaum begonnen die Radialgeschwindigkeiten der Himmelskörper in bezug auf die Erde durch Beobachtung der Verschiebung der Spektrallinien (auf Grund des Dopplerschen Prinzips) zu ermitteln.

Aus dem soeben Besprochenen kann man ersehen, daß die Spektralanalyse mit ihren zahlreichen Anwendungen vor 50 Jahren in der Tat erst im Keime vorhanden war. Ihre zwei Aufgaben lauteten: Was für Strahlen sendet eine gegebene Strahlungsquelle aus? Aus welcher Strahlungsquelle stammt eine beobachtete Spektrallinie? Von einer Theorie der Spektren, wie wir diese Bezeichnung jetzt verstehen, konnte zu jener Zeit keine Rede sein.

§ 8. Die Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus.
Wir werden folgende vier Seiten dieser Lehre gesondert betrachten,

1. Die elektrischen und magnetischen Erscheinungen, als reell vorhandene Tatsachen, welche wir durch Versuche und Beobachtungen vermittelt unserer Sinnesorgane und mit Hilfe von geeigneten Instrumenten erkennen. Diese Erscheinungen werden qualitativ und quantitativ erforscht.

2. Die Gesetze, welchen diese Erscheinungen gehorchen. Wir werden es fast ausschließlich mit quantitativen Gesetzen zu tun haben, obgleich es auch qualitative Gesetze gibt, welche die äußere Erscheinungsform betreffen; letztere Gesetze bilden einen wesentlichen Teil der Beschreibung der Erscheinungen.

3. Die mathematische Behandlung verschiedener Aufgaben, welche von den quantitativen Gesetzen ausgeht.

4. Die Theorie der Erscheinungen, welche auf einer angenommenen Hypothese über die unserer unmittelbarer Beobachtung unzugänglichen verborgenen Urquellen der beobachteten Erscheinungen aufgebaut ist. Die Theorie muß zeigen, daß das Auftreten der betrachteten Erscheinungsgruppe mit allen ihren qualitativen Kennzeichen und quantitativen Gesetzmäßigkeiten mit Notwendigkeit aus der angenommenen Hypothese folgt.

Den Inhalt dieser vier Seiten der Lehre von der Elektrizität und vom Magnetismus aus der Zeit vor 50 Jahren wollen wir nun betrachten.

I. Die elektrischen und magnetischen Erscheinungen. Könnte man die Zahl der verschiedenartigen elektrischen und magnetischen Erscheinungen, welche vor 50 Jahren bekannt waren, bestimmen und mit der Zahl der jetzt bekannten vergleichen, so könnte es erscheinen, daß dieser Abschnitt der Physik im Verlaufe des letzten Halbjahrhunderts sich nur unbedeutend vergrößert hat, daß am Anfange der siebziger Jahre alle wichtigen Erscheinungen schon bekannt und erforscht waren, und daß seitdem zu ihrer ungeheuren Anzahl eine verhältnismäßig kleine Zahl von wirklich neuen Erscheinungen hinzugekommen ist. Es ist klar, daß ein solcher Vergleich, welcher zu der unsinnigen Vorstellung von einem gewissen Stillstand der Wissenschaft in einer Zeit führen könnte, wo in Wirklichkeit eine großartige Entwicklung sowohl in die Breite als auch in die Tiefe stattgefunden hat, höchst unwissenschaftlich wäre. Die Wertschätzung eines Abschnittes der Physik darf nicht auf Grund der Zahl der verschiedenen zu ihm gehörenden Erscheinungen geschehen; sie wird vielmehr durch den Grad der Entwicklung der Theorie bestimmt, welche zu ihrer Erklärung aufgebaut ist und ihr richtiges Verständnis ermöglicht. Dennoch müssen wir,

als Charakteristik des Zustandes dieses Gebietes der Physik vor 50 Jahren den Umstand unterstreichen, daß durch die Arbeiten einer großen Zahl von Forschern zu jenem Zeitpunkte bereits ein äußerst reichhaltiges wissenschaftliches Material angesammelt war, und daß in bezug auf viele Kapitel man die Aufgabe der Auffindung wesentlicher neuer Erscheinungen als gelöst und die Kapitel in dieser Hinsicht als abgeschlossen betrachten konnte. Im weiteren werden dazu Beispiele gegeben werden.

Wir sind offenbar nicht imstande an diesem Ort eine Übersicht auch nur der wichtigsten Teile der ungeheuer umfangreichen Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus, wie sie vor 50 Jahren bestand, zu geben; das würde viel zu viel Platz beanspruchen. Wir müssen uns darauf beschränken, die wichtigsten Kapitel dieser Lehre aufzuzählen und ihren Inhalt ganz kurz anzudeuten.

Die Eigenschaften der künstlichen (Stahl-) Magnete waren gründlich untersucht. Man hatte den Einfluß der mechanischen Einwirkungen, der Temperaturänderungen, der mehrfachen Umagnetisierung usw. studiert und man kann sagen, daß alle diese Fragen erschöpfend beantwortet waren. Dasselbe gilt ebenfalls von der statischen Elektrizität, welche damals auch Reibungselektrizität genannt wurde. Das Buch von Ries „Die Reibungselektrizität“ konnte in zwei umfangreichen Bänden noch nicht alles Tatsachenmaterial, welches in den experimentellen Forschungen über die statische Elektrizität zusammengetragen war, erschöpfen. Die Verteilung der statischen Elektrizität auf der Oberfläche von Leitern, die elektrostatische Influenz der Leiter, die Kondensatoren und auch die wichtigsten Eigenschaften der Nichtleiter (Dielektrika) waren gründlich erforscht worden. Außer der Reibung waren auch andere Elektrizitätsquellen gut bekannt, z. B. Druck (Piezoelektrizität) und Temperaturänderung (Pyroelektrizität), abgesehen von der Berührungselektrizität und der Thermoelektrizität. Die elektrische Entladung hatte man von vielen Seiten studiert und man kannte auch ihren oszillatorischen (schwingenden) Charakter unter bestimmten Bedingungen. Neben der alten Reibungselektrifiziermaschine war schon die viel handlichere Holtzsche Influenzmaschine, der „Replenisher“ von W. Thomson und andere vorhanden.

Die Quellen des elektrischen Stromes und seine vielgestaltigen Wirkungen waren so eingehend erforscht, daß eine Übersicht der bekannten Resultate in G. Wiedemanns „Galvanismus“ vier dicke Bände umfaßte. Alle wichtigsten Fälle der Entstehung oder die sogenannten Quellen des elektrischen Stromes waren

bekannt: chemische Reaktionen in den elektrischen Ketten (Daniell-element, Bunsenelement u. a.), die Wärme — in den Thermo-elementen und Thermosäulen, und als wichtigste — die Strom-induktion durch Magnete und Ströme. Die Wirkungen des Stromes waren, man kann sagen, alle bekannt. Hierher gehören: die Wirkung des Stromes auf Ströme und Magnete und der Magnete auf die Ströme, die Erregung des Magnetismus durch Ströme (Elektromagnete), die Erwärmung der Körper beim Durchgang des Stromes durch dieselben, die sogenannten chemischen Wirkungen des Stromes (Elektrolyse). Man kannte auch schon den „Thomson-effekt“ — Wärmeübertragung durch den Strom in Richtung des Temperaturgefälles und den Effekt von Peltier, bei welchem wir uns hier nicht aufhalten können.

Eine dieser Wirkungen müssen wir hier aber doch kurz besprechen, nämlich die chemische Wirkung des elektrischen Stromes. Diese Bezeichnung ist übrigens vom jetzigen Standpunkte nicht ganz zutreffend und wir wollen sie durch die allgemein angenommene Bezeichnung „Elektrolyse“ ersetzen. Die Erscheinung besteht bekanntlich in folgendem: Taucht man in die Lösung irgendeines Elektrolyten, d. h. eines Salzes, einer Säure oder Base zwei mit einer Stromquelle verbundene Elektroden, so beginnt auf den Elektroden die Ausscheidung der Bestandteile des Elektrolyten oder solcher Stoffe, welche infolge von Nebenreaktionen zwischen diesen Bestandteilen des Elektrolyten und dem Material der Elektroden, dem Lösungsmittel oder dem Elektrolyten selbst entstehen. Durch das Eintauchen der Elektroden wird der Strom geschlossen, wobei z. B. die durch die Leitung (Draht) zufließende positive Elektrizität durch die Lösung von der Anode zur Kathode fließt. Beim Durchgang durch die Lösung sollte der elektrische Strom den Elektrolyten in zwei Bestandteile zerlegen, welche in der Lösung sich in entgegengesetzten Richtungen bewegen und an den Elektroden ausgeschieden werden. Die Richtigkeit einer solchen Beschreibung der Elektrolyse schien einleuchtend. Man sagte z. B., daß „der Strom das Wasser zersetze“ und erklärte die Notwendigkeit eines geringen Zusatzes von Säure zum Wasser, indem man sagte, daß auf diese Weise die Leitfähigkeit vergrößert werde, die Elektrizität infolgedessen besser durch das Wasser strömen könne und es daher stärker zerlege. Der Gedanke, daß eben der Strom den gelösten Stoff und auch das Wasser zersetzt, war vor 50 Jahren zweifellos noch herrschend. Wir müssen freilich auch erwähnen, daß zu jener Zeit noch andere Erklärungsversuche oder, wenn man will, andere

Beschreibungen des Vorganges der Elektrolyse vorgeschlagen wurden. Dabei wurde von Vorstellungen Gebrauch gemacht, welche späterhin in die Grundzüge der Erklärung der Elektrolyse aufgenommen wurden und sich bis auf den heutigen Tag erhalten haben. Es waren das aber vereinzelt Versuche, welche damals nicht gebührend beachtet wurden und erst viel später allgemeine Anerkennung fanden. Der Strom zerlegt, der Strom vollzieht die chemische Reaktion — das war die Grundvorstellung über die Elektrolyse, welche vor 50 Jahren herrschend war.

Gänzlich in den Kinderschuhen steckte die Lehre vom Elektrizitätsdurchgang durch verdünnte Gase. Man wußte, daß die Gase dabei leuchten; das Geißlerrohr war bekannt und wurde gebraucht, um die Spektren der leuchtenden Gase zu erhalten. Außerdem kannte man (und hatte teilweise studiert) einige Besonderheiten dieser Leuchterscheinungen, wie z. B. den dunklen Kathodenraum, die Schichtung der Entladung u. a. m.

Eine bedeutende Entwicklungsstufe hatte vor 50 Jahren die Methodik der Messungen verschiedener physikalischer Größen, mit welchen man in der Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus zu tun hat, erreicht. Hierher gehören: Elektrizitätsmenge, Kapazität, Dielektrizitätskonstante, Stromstärke, elektromotorische Kraft, Widerstand, die Koeffizienten der gegenseitigen und der Selbstinduktion, die Elemente des Erdmagnetismus usw. Verschiedene Anordnungen zur Messung dieser Größen waren ausgearbeitet und entsprechende Meßinstrumente konstruiert und vervollkommen worden, wie z. B. Elektrometer, Galvanometer, Widerstandssätze und dergleichen.

II. Die Gesetze, welchen die elektrischen und magnetischen Erscheinungen gehorchen. Man kann sagen, daß alle diejenigen Gesetze, welche man auch heutzutage zu den wichtigsten und grundlegendsten rechnen muß, am Anfange der siebziger Jahre schon bekannt waren. Solcher Gesetze gibt es acht. Wir halten es nicht für nötig, den genauen Wortlaut dieser allgemein bekannten Gesetze anzuführen. Es handelt sich um folgende Gesetze:

1. Die Coulombschen Gesetze, welche den Betrag der Wechselwirkung zweier elektrischer Ladungen und zweier magnetischer Massen bestimmen. Diese Gesetze lauten genau analog dem allgemeinen Gravitationsgesetz von Newton.

2. Das Ohmsche Gesetz, welches die elektromotorische Kraft (Potentialdifferenz) zu der Stromstärke und dem Widerstande der Leitung oder eines Teiles der Leitung in Beziehung setzt.

3. Das Gesetz von Lenz und Joule, welches die im Leiter entwickelte Wärmemenge in Abhängigkeit von dem Widerstand, der Stromstärke und der Zeit ausdrückt.

4. Die Gesetze der Elektrolyse von Faraday, welche die Gewichtsmengen der bei der Elektrolyse ausgeschiedenen Stoffe in Abhängigkeit von der Stromstärke, der chemischen Zusammensetzung des Elektrolyten und der Zeit bestimmen.

5. Die Gesetze der Stromverzweigung von Kirchhoff, welche die Stromstärke in einem beliebigen Teile eines Netzes von Leitern zu berechnen gestatten, falls man die Schaltung des Netzes, die Widerstände aller seiner Teile und alle wirkenden elektromotorischen Kräfte kennt.

6. Das Gesetz von Biot und Savart, welches die Berechnung der Feldstärke des Magnetfeldes (Kraft auf die Einheit des Magnetismus) in einem beliebigen Punkte der Umgebung eines elektrischen Stromes ermöglicht, wenn die geometrische Gestalt der Stromlinie (des stromführenden Drahtes) und die Stromstärke gegeben sind.

7. Das Integralgesetz der Wechselwirkung zweier Ströme.

8. Die Gesetze der Strominduktion für alle Fälle, wo eine solche Induktion stattfindet.

Alle diese Gesetze waren am Anfange der siebziger Jahre vollständig festgestellt. Wir übergehen andere, weniger wichtige Gesetzmäßigkeiten, welche sich auf spezielle elektrische und magnetische Erscheinungen beziehen.

III. Die mathematische Behandlung verschiedener Aufgaben auf Grund der soeben aufgezählten Gesetze. Alles was unter diese Rubrik gehört, konnte schon vor 50 Jahren als vollständig abgeschlossen betrachtet werden. Nicht nur Physiker, sondern auch reine Mathematiker haben sich mit der Lösung diesbezüglicher Aufgaben befaßt, für welche ein großes Interesse vorhanden war. Man kann sagen, daß heutzutage die Beschäftigung mit derartigen Aufgaben so ziemlich aus der Mode gekommen ist. Wir wollen einige Beispiele solcher Aufgaben anführen.

I. Die Aufgaben der Elektrostatik, welche auf Grund des Coulombschen Gesetzes und der Potentialtheorie gelöst werden. Hierher gehören die Aufgaben über die Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche von Leitern verschiedener Gestalt, sowie auf mehreren Leitern (zwei Kugeln); weiterhin Aufgaben über die Elektrizitätsverteilung bei der Influenz auf Leitern und Nicht-

leitern (Dielektrische Polarisierung). Daneben wurde auch die Frage nach den Kräften, welche bei verschiedenen Bedingungen auf geladene Körper wirken, behandelt (ponderomotorische Wirkungen).

2. Aufgaben über die Erregung des magnetischen Zustandes in Körpern von gegebener Gestalt und unter gegebenen Bedingungen. Diese Aufgaben wurden unter der Voraussetzung gelöst, daß die magnetische Induktion im gegebenen Punkte eines Körpers proportional der wirkenden magnetischen Feldstärke anwächst, was aber von dem wirklichen Tatbestande weit entfernt ist, da die Abhängigkeit der ersten Größe von der zweiten viel verwickelter ist. Zur Lehre vom Magnetismus gehören noch die Aufgaben über die Wechselwirkung von Magneten und die berühmte Theorie des Erdmagnetismus von Gauss.

3. Aufgaben über die Verteilung von Strömen in Platten verschiedener Gestalt, auf der Oberfläche und im Inneren von leitenden Körpern.

4. Aufgaben über die Berechnung der Stärke der Magnetfelder von Strömen bei gegebener räumlicher Verteilung der letzteren; hier sind die sehr wichtigen Aufgaben über Felder von Spulen verschiedener Gestalt (Galvanometer) zu nennen.

5. Aufgaben über die Berechnung der Wechselwirkung von Strömen verschiedener Gestalt.

6. Aufgaben über die Berechnung der Koeffizienten der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion, wenn die Gestalt der Leiter und ihre relative Lage gegeben ist. Aufgaben dieser Art haben auch heute ihr Interesse nicht eingebüßt.

Die Lösungsmethoden dieser rein mathematischen Aufgaben waren vor 50 Jahren vollständig ausgearbeitet.

IV. Die Theorie, d. h. die Hypothesen über die Ursachen der elektrischen und magnetischen Erscheinungen. Die Frage über die Ursachen dieser Erscheinungen befand sich zu Anfang der siebziger Jahre, man kann wohl sagen in einem chaotischen Zustande. Es waren sehr viele Hypothesen vorhanden, und man kann nicht behaupten, daß irgendeine von ihnen sich fest eingebürgert hatte und allgemein angenommen war. Im allgemeinen wurde angenommen, daß neben der Materie noch ein gewisses Agens vorhanden sei, ein „Fluidum“, eine gewichtslose, leichtbewegliche „Flüssigkeit“, welche innerhalb der gewöhnlichen Materie sich verschieben oder fließen könne. Es gab dualistische und unitarische Hypothesen. Die dualistischen nahmen an, daß es zwei verschiedene Elektrizitäten gebe, eine positive und eine negative, wobei sie ganz gleich-

artig sein sollten, d. h. genau dieselben Eigenschaften besitzen sollten. Ihr einziger Unterschied besteht darin, daß die Kräfte, welche sie in der Umgebung hervorrufen, bei gleichen wirkenden Ladungen entgegengesetzte Richtungen haben; dem Betrage nach gleich hießen zwei Ladungen, welche unter gleichen Bedingungen gleich große Kräfte hervorriefen. Bei einer Vermischung (Vereinigung) gleicher Mengen ungleichnamiger Elektrizitäten entsteht ein neutrales Gemisch, welches keine Kräfte in der Umgebung hervorruft und seine Gegenwart infolgedessen durch nichts verraten kann. Die Wechselwirkung zweier Ladungen befolgt das Coulombsche Gesetz. Von irgendeiner Struktur der Elektrizität war überhaupt nicht die Rede. Es wurde aber angenommen, daß man bei der Lösung von Aufgaben aus der Elektrostatik in Gedanken jede Ladung in eine unendliche Zahl unendlich kleiner Teile zerlegen und auf jedes Paar solcher Teile das Coulombsche Gesetz anwenden kann; das kommt natürlich darauf hinaus, daß man die Anwendung der Integralrechnung für zulässig hielt. Man sprach zwar über Teilchen der Elektrizität, doch geschah das nur der Bequemlichkeit oder der Kürze halber, und diesen Teilchen der Elektrizität wurde keineswegs dieselbe selbständige Existenz wie den materiellen Atomen zugeschrieben. Die elektrostatische Influenz auf Leitern und die dielektrische Polarisation der Nichtleiter wurde als Zerlegung der in allen Körpern vorhandenen neutralen Mischung gedeutet. Wir wollen noch hinzufügen, daß es auch solche dualistische Hypothesen gab, welche von der Annahme ausgingen, daß die beiden Elektrizitäten verschiedene Eigenschaften besitzen, nicht gleichwertig sind und bei verschiedenen Erscheinungen wesentlich verschiedene Rollen spielen, z. B. daß die eine Elektrizitätsart in den Leitern frei verschiebbar, dagegen die andere unbeweglich an die Materie gebunden sei.

Die unitarischen Hypothesen nahmen an, daß nur eine Elektrizität vorhanden sei, welche im Körper in einer bestimmten Menge enthalten sein müsse, damit er neutral, d. h. nicht elektrisch erscheine. Der teilweise Verlust dieser normalen Menge oder ein Überschuß, bedingen das Auftreten einer Ladung entsprechenden Vorzeichens. Die Erscheinung der elektrostatischen Influenz besteht in einer teilweisen Verschiebung der normalen Menge nach einer Seite, infolgedessen auf der einen Seite ein Überschuß und auf der anderen ein Mangel entsteht. Genauer wollen wir nicht darauf eingehen. Es gab noch verschiedenartige Theorien, welche nicht in den Rahmen der beiden eben besprochenen Gruppen paßten;

die Mehrzahl von ihnen kann heutzutage kaum noch ein historisches Interesse beanspruchen.

Eine noch größere Mannigfaltigkeit bieten die Hypothesen, welche bis zum Anfang der siebziger Jahre zur Erklärung der elektrodynamischen Erscheinungen, d. h. vor allen Dingen der Wechselwirkungen von Strömen und der verschiedenen Fälle der Induktion, vorgeschlagen waren. Man war gezwungen anzunehmen, daß bewegte Ladungen aufeinander nach einem anderen Gesetze wirken als relativ zueinander ruhende. Es mußte ein neues Wechselwirkungsgesetz eingeführt werden, welches im Spezialfalle der relativen Ruhe in das Coulombsche Gesetz übergeht. Solche abgeänderte Gesetze waren in großer Zahl vorgeschlagen worden; besondere Bedeutung hatte das von W. Weber eingeführte Gesetz.

Auf die Frage, was denn eigentlich der elektrische Strom sei, gab es sehr verschiedenartige Antworten, welche sich meist nicht durch besondere Klarheit auszeichneten. Die gewöhnliche dualistische Vorstellung bestand darin, daß im Inneren des Leiters beide Elektrizitäten strömen, und zwar in entgegengesetzten Richtungen; es blieb unklar, wie diese Bewegung vor sich gehe und warum sich die beiden Elektrizitäten nicht verbinden. Es gab auch solche Theorien, welche überhaupt keine Strömung der Elektrizität voraussetzten, sondern nur eine rasche Drehung von Ladungen, welche die Gestalt von dünnen, mit ihren Ebenen senkrecht zur Strömungsrichtung gestellten Platten haben sollten. Zur Erklärung von einigen besonderen Erscheinungen wurden Spezialhypothesen vorgeschlagen, so z. B. für die Elektrolyse. Wie schon erwähnt, bestand der Grundgedanke immer darin, daß der Elektrolyt durch den Strom zerlegt werde. Zusatzhypothesen bezogen sich auf die Bewegung der zerlegten Bestandteile (Ionen) innerhalb der Lösung und auf ihre Ausscheidung an den Elektroden. Die magnetischen Erscheinungen wurden auf die elektrischen mit Hilfe der von Ampère entwickelten Vorstellungen zurückgeführt.

Man kann sich leicht überzeugen, daß in allen Theorien, welche zur Erklärung der verschiedenen elektrischen und magnetischen Erscheinungen, insbesondere der verschiedenen Fälle der ponderomotorischen Wirkungen, der magnetischen und elektrostatischen Influenz und der elektrodynamischen Induktion entwickelt wurden, als charakteristischster Zug die Vorstellung der „*actio in distans*“, der unmittelbaren Fernwirkung zweier Agenzien aufeinander enthalten war. Als solche Agenzien konnten auftreten: zwei elektrische Ladungen, zwei magnetische Massen, zwei Stromelemente oder

eine magnetische Masse und ein Stromelement. Das Zwischenmedium sollte an sich gar keinen Einfluß auf den Betrag der Wechselwirkungskraft der beiden Agenzien haben. Wenn ein derartiger Einfluß sich zeigte, so sollte er bloß scheinbar sein und in Wirklichkeit so zu erklären, daß die Agenzien auch auf das Medium einwirkten, in dem letzteren das Auftreten von neuen Agenzien hervorriefen, welche ihrerseits mit gewissen Kräften auf die ursprünglich gegebenen Agenzien zurückwirkten. Ein typisches Beispiel dazu ist der Einfluß des Zwischenmediums auf die Wechselwirkung zweier elektrischer Ladungen, welche in diesem Medium eine dielektrische Polarisation hervorrufen; dadurch entsteht z. B. die Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von der Beschaffenheit der nichtleitenden Zwischenschicht (Dielektrikum). Die Idee der *actio in distans* entstand auf dem Boden der Gravitationslehre als angeblich notwendiges Attribut des Newtonschen Gesetzes, obgleich es keinem Zweifel unterliegt, daß Newton selbst den Gedanken an eine unmittelbare Fernwirkung durchaus ablehnte. Es ist von Wichtigkeit zu bemerken, daß Faraday die Möglichkeit einer Fernwirkung eifrig bekämpfte, indem er die Übertragung aller Wechselwirkungen dem Zwischenmedium zuschrieb. Die von Faraday entwickelten Ideen schienen seinen Zeitgenossen unklar, unverständlich und vielleicht auch überflüssig und drangen nicht durch. Maxwell war der erste, welcher diesen genialen Ideen eine mathematische Gestalt verlieh, indem er seine elektromagnetische Lichttheorie schuf, worüber wir schon gesprochen haben.

§ 9. Die Experimentierkunst. Die Elektrotechnik. Schluß.

Vor 50 Jahren hatte die Experimentierkunst bereits eine hohe Entwicklungsstufe erreicht. Die großen Lehrer: Ampère, Dulong, Fizeau, Foucault, Regnault, Faraday, W. Weber, Kirchhoff, Helmholtz und viele andere hatten gezeigt, wie man die mannigfaltigen technischen Schwierigkeiten, welche sich bei der praktischen Verwirklichung eines beabsichtigten Versuchs entgegenstellen, zu überwinden hat; wie man bei der Ableitung der Resultate aus den Versuchsergebnissen auf die verschiedenartigsten äußeren Bedingungen achtgeben muß, welche diese Resultate abändern und verfälschen könnten, sowie auch auf die Fehlerquellen, welche erstens in den Mängeln der angewandten physikalischen Apparate und zweitens in den Eigenschaften der Sinnesorgane des Experimentators ihren Ursprung haben können.

Um das Bild vollständig zu machen, wollen wir bemerken, daß die Elektrotechnik, welche jetzt eine sehr große Anzahl von

Spezialgebieten umfaßt, von welchen jedes seine Spezialisten erfordert, vor 50 Jahren überhaupt nicht vorhanden war. Nur ein Spezialgebiet, nämlich die Telegraphie, hatte damals eine ansehnliche Entwicklung erreicht und einige wenige andere Gebiete begannen eben ins Leben zu treten. Hierher gehören die elektrische Beleuchtung und die Erzeugung von Strömen vermittelt magnet-elektrischer Maschinen. Auch kann man die Galvanoplastik als ein Gebiet der Elektrotechnik im weiteren Sinne erwähnen, welches schon damals große Aufmerksamkeit auf sich lenkte. Doch das, was wir jetzt Elektrotechnik nennen, entstand in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre und zeigte seine Machtentfaltung und erweckte große Hoffnungen auf eine glänzende Zukunft zum ersten Male auf der elektrischen Weltausstellung in Wien 1884.

Schlußbemerkungen. In diesem Kapitel haben wir versucht, ein Bild von der Physik vor 50 Jahren zu entwerfen. Wir haben keine Darstellung ihres Inhaltes gegeben, wir haben nicht ihre Abschnitte, Kapitel usw. aufgezählt, sondern waren bestrebt, beim Hinweis auf die wichtigsten Fragen, mit welchen sie sich befaßte, ihre charakteristischen Züge zum Ausdruck zu bringen, welche mehr oder weniger deutlich in allen ihren Gebieten zutage traten. Aus allem, was in diesem Kapitel zur Sprache gelangte, kann man sich überzeugen, daß die am meisten charakteristischen Züge der Physik jener Zeit die folgenden waren:

1. Die unbedingte Herrschaft der Mechanik auf Newtonscher Grundlage und infolgedessen das Bestreben, die verschiedensten physikalischen Erscheinungen zu erklären, sie verständlich zu machen, indem man ihre Urquelle auf das Spiel hypothetischer Kräfte und Bewegungen zurückführte.

2. Die molekular-kinetische Weltauffassung, welche wir auf den vorstehenden Seiten hinreichend geschildert haben.

3. Die feste Überzeugung, daß die Prinzipien der Erhaltung der Masse und der Energie absolut richtig und unerschütterlich sind.

4. Die weitgehende Anwendung der beiden Hauptsätze der Thermodynamik, d. h. des Prinzips der Erhaltung der Energie und des Prinzips der Zunahme der Entropie. Dabei wurde der zweite Hauptsatz als Tatsache, als Eigenschaft unserer Welt angenommen, deren Vorhandensein nur dadurch bewiesen war, daß alle aus ihm erhaltenen Schlüsse und Vorhersagungen bei ihrer experimentellen Prüfung sich bestätigten. Die tieferen Wurzeln des zweiten Hauptsatzes, jene der unmittelbaren Beobachtung

verborgenen Ursachen, welche die Urquellen der Eigenschaften unserer Welt vorstellen, blieben unbekannt.

5. Die glänzende Entwicklung der Theorie des Lichtes, als einer schwingenden Bewegung der Teilchen eines elastischen Äthers, welcher gleichfalls den Gesetzen der Mechanik unterworfen ist.

6. Actio in distans, also Fernwirkung, welche von Magneten, elektrischen Ladungen und elektrischen Strömen ausging; Einfluß des Zwischenmediums als etwas Zufälliges und Unselbständiges.

7. Die Teilung der Physik in Abschnitte, welche nichts miteinander Gemeinsames hatten und durch nichts verbunden waren; Abwesenheit von solchen Kapiteln, welche gewissermaßen einen Übergang, eine Verbindungsbrücke zwischen ihnen schaffen konnten. Das Gesagte bezieht sich nicht nur auf die Abschnitte der Physik, sondern auch — und das ist besonders wichtig und charakteristisch — auf die ganze Physik, wenn man sie neben einige andere Wissenschaften, vor allem Chemie und Astronomie, stellt. Physik und Chemie waren zwei sehr wenig miteinander verbundene Wissenschaften. Selbstverständlich mußte der Physiker einige Kenntnisse in der Chemie besitzen, aber von ganz elementarer Art und fast ausschließlich aus dem Gebiete der anorganischen Chemie. Bedeutend wichtiger war für den Chemiker die Bekanntschaft mit der Physik, aber auch mehr als Hilfsfach, insofern er sich für solche Größen interessierte, wie die Dichte der festen, flüssigen Körper und besonders der Gase und Dämpfe, ferner Volumen, Druck, Temperatur, spezifische Wärme, latente Wärme bei Zustandsänderungen und eine Reihe anderer physikalischer Größen. Doch hatte dieses Interesse für die Physik einen gewissermaßen zufälligen Charakter und unterschied sich wenig von dem Interesse, welches die Chemie z. B. den biologischen Wissenschaften entgegenbrachte. Eine tiefere innere Verbindung zwischen Physik und der Chemie war nicht vorhanden; die Aufgaben, die sich diese Wissenschaften stellten, die Ziele, die sie verfolgten, waren wesentlich verschieden. In noch höherem Maße kann man dasselbe über die Wissenschaften Physik und Astronomie behaupten. Sie waren einander noch fremder als die Physik und die Chemie, brauchten füreinander überhaupt kein Interesse zu besitzen und von einer Brücke, einer Übergangswissenschaft zwischen ihnen, war keine Rede.

Die Abschnitte der Physik standen ebenfalls vereinzelt da; zwischen ihnen bestand kein Übergang, keine verbindende Brücke.

Sie entwickelten sich unabhängig voneinander. Die Molekularphysik, die Akustik, die Optik, die Wärmelehre und die Lehre von der Elektrizität und vom Magnetismus bezogen sich scheinbar auf ganz verschiedene, nichts miteinander Gemeinsames besitzende physikalische Erscheinungsgruppen. Nur die Wärmeerscheinungen drängten sich gewissermaßen in alle Abschnitte der Physik ein, indem sie dort eine mehr oder weniger merkliche Rolle spielten. Genauer gesagt war es der Einfluß der Temperatur auf alle physikalischen Größen, welcher sich überall bemerkbar machte, unabhängig davon, zu welchem Gebiete man sonst die betrachteten Größen zu rechnen pflegte.

In der Teilung der Physik in ihre Abschnitte und auch in einigen Zügen der verschiedenen Hypothesen kann man nicht umhin, deutliche Spuren von Anthropomorphismus zu bemerken. Die physikalischen Erscheinungen wurden nach solchen Merkmalen in Gruppen zusammengefaßt, welche auf die Art ihrer Einwirkung auf den Menschen, auf die Empfindung, welche sie bei ihm hervorriefen, Bezug hatten. Eine nicht geringe Rolle spielte das empfindende Sinnesorgan: für das Licht — das Auge, für den Schall — das Ohr, für die Wärme — der Tastsinn. Wir lassen vorläufig dieses interessante Thema beiseite, um später darauf zurückzukommen.

Kapitel III.

Was konnte sich im Verlauf der letzten 50 Jahre nicht ändern?

§ 1. **Einleitung.** Im vorhergehenden Kapitel waren wir bestrebt, eine nach Möglichkeit vollständige Charakteristik „der Physik vor 50 Jahren“ zu geben. Unser hauptsächliches Ziel war: Vorführung und Erläuterung des Geistes dieser Wissenschaft, jener Weltauffassung, an welche sie gebunden war und von der sie sich dazumal nicht befreien konnte. Obwohl wir auch in einigen Punkten gezwungen waren, auf ihren Inhalt, wenn auch sehr oberflächlich, einzugehen, so geschah dies nur in der Absicht, das nötige Material, welches zu der Illustration der zu erläuternden charakteristischen Züge dienen sollte, vor Augen zu führen.

Nun treten wir an dieselbe Aufgabe bezüglich der modernen Physik, deren charakteristische Züge wir aufzudecken beabsichtigen,

um im Endergebnis zu einer klaren Vorstellung über die tiefgehende Evolution, welche die Physik in den letzten 50 Jahren erfahren hat, über die Abänderung der alten und das Auftreten von neuen charakteristischen Zügen und über die damit eng verbundene wesentliche Veränderung der wissenschaftlichen Weltauffassung zu gelangen. Auch hier werden wir natürlich viel Raum dem historischen Elemente, d. h. der Darstellung neuer, großer Errungenschaften der Wissenschaft im verflorbenen Halbjahrhundert widmen müssen. Doch werden wir hier ebenfalls nicht danach streben, eine einigermaßen erschöpfende Darstellung selbst sehr wichtiger Ergebnisse der wissenschaftlich schöpferischen Arbeit zu geben; auch hier werden diese Resultate uns nur als Material dienen, auf welchem wir unsere endgültigen Schlußfolgerungen aufbauen werden.

Bevor wir aber zu unserer nicht nur recht schweren und verwickelten, sondern auch, man kann sagen neuartigen Aufgabe übergehen, muß ich einiges pro domo mea vorbringen. Der Leser wird sich des Gedankens nicht erwehren können, daß nur derjenige darauf hoffen kann den Geist der Evolution der Physik zu erfassen, welcher im Verlaufe dieser ganzen Zeit wirklich sich mit Physik beschäftigte und ihre Eroberungen, ihre innere und äußere Entwicklung verfolgte. Um den recht natürlichen Zweifel in dieser Hinsicht einigermaßen zu beheben, erlaube ich mir auf folgendes hinzuweisen. Ich begann mein Studium an der Universität St. Petersburg im Jahre 1869 und absolvierte die Universität im Jahre 1873, d. h. genau vor 50 Jahren. Von diesem Zeitpunkte ab habe ich mich ausschließlich mit Physik beschäftigt (zunächst ein Jahr lang an der Leipziger Universität) und war stets nach Kräften bestrebt, ihre Entwicklung zu verfolgen.

In der Absicht, zu untersuchen, welche äußeren und inneren Veränderungen die Physik im letzten Halbjahrhundert erlitten hat, müssen wir vor allen Dingen auf diejenigen Grundzüge dieser Wissenschaft hinweisen, welche sich nicht ändern konnten. Diese Frage ist nicht zu verwechseln mit der Frage, was sich in dem betrachteten Zeitraume, d. h. bis jetzt, tatsächlich nicht verändert hat, aber vielleicht in der Zukunft sich ändern wird. Wir wollen jene Züge der Physik in den Vordergrund rücken, welche dieser Wissenschaft für immer als unveränderliche Kennzeichen verbleiben werden, ohne welche die Physik aufhören würde, „Physik“ zu sein, und einen anderen Namen erhalten müßte. Solcher ewiger Kennzeichen oder Züge der Physik, welche sich nie ändern können, gibt es drei, nämlich:

- I. Gegenstand oder Aufgabe der Physik.
- II. Das Schema der praktischen allmählichen Lösung dieser Aufgabe.
- III. Das Schema des Aufbaues physikalischer Theorien.

Die wichtigsten sind hier I und III; hier kann niemals eine Änderung eintreten. Über II könnte man vielleicht streiten; hier ist es schwer, Prophet zu sein. Doch ist in diesem Punkte bisher jedenfalls eine Änderung weder eingetreten, noch läßt sich eine solche vorhersehen oder vorahnen, und es wäre recht schwierig, eine Richtung anzugeben, in welcher eine Änderung dieser Seite der Physik vor sich gehen sollte. Der Betrachtung dieser drei Grundzüge ist das vorliegende Kapitel gewidmet.

§ 2. Gegenstand und Aufgabe der Physik. Entdeckung und Erforschung der Erscheinungen. Die Aufgabe der Physik kann man im weitesten Sinne folgendermaßen formulieren: Erforschung der Eigenschaften der toten (nicht organisierten) Materie, aller Erscheinungen, welche in dieser Materie zutage treten und der Gesetze, welchen sich diese Erscheinungen unterordnen. Diese Definition der Aufgabe der Physik muß etwas eingengt werden, denn es gibt noch eine Wissenschaft, welche mit der nichtorganisierten Materie zu tun hat, nämlich die Chemie. Doch erforscht sie nur jene spezielle Gruppe von Erscheinungen, bei welchen Änderungen der Zusammensetzung der Materie stattfinden. Ihre Aufgabe besteht in der Analyse und Synthese der Stoffe. Daher müssen wir zu der oben angeführten Definition noch die Worte hinzufügen: mit Ausschluß der Erscheinungen, bei welchen eine (chemische) Analyse oder Synthese der Materie stattfindet.

Es könnte scheinen, daß es noch eine Reihe von Wissenschaften gibt, welche ebenfalls mit der toten, nichtorganisierten Materie zu tun haben, nämlich: Astronomie nebst Astrophysik, Mineralogie, Kristallographie und Geophysik. Doch passen diese Wissenschaften nicht unter die von uns gegebene Definition des Gegenstandes der Physik, denn sie haben es nicht mit der Materie als solcher, sondern mit bestimmten, wenn auch aus nicht organisierter Materie bestehenden Körpern zu tun. Dieses wird sofort klar, wenn man sich die Aufgaben der eben erwähnten Wissenschaften vergegenwärtigt.

Die von uns formulierte allgemeine Aufgabe der Physik konnte sich nicht ändern und wird sich auch nie ändern. Die Eigenschaften der organisierten Materie und die besonderen, nur für sie charakteristischen Erscheinungen, welche sich in ihr abspielen, werden niemals in das Gebiet der Forschungen, mit welchen

die Physiker beschäftigt sind, einbezogen werden. Als Phantasiegebilde könnte man sich vielleicht das Entstehen in der Zukunft einer ganz neuen, ebenfalls mit der nichtorganisierten, toten Materie sich befassenden Wissenschaft vorstellen, welche, wie gegenwärtig die Chemie, derart in sich abgeschlossen sein wird, daß man sie ohne Zwang nicht als ein Teil der Physik wird betrachten können. Dann wird man gezwungen sein, zu den oben erwähnten, auf die Chemie bezüglichen beschränkenden Worten noch eine neue Klausel hinzuzufügen. Doch wird man selbst in diesem Falle nicht sagen können, daß die Aufgabe der Physik eine andere geworden sei.

Die Aufgaben der Physik werden in drei Schritten der Lösung zugeführt: Entdeckung, Erforschung und Erklärung der Tatsachen, welche in der nichtorganisierten Materie stattfinden, und welche wir im weiteren einfach als physikalische Erscheinungen bezeichnen werden. Die ersten zwei Schritte sind Gegenstand der experimentellen Physik, wenn man von den seltenen Fällen absieht, wo eine neue Erscheinung durch die Theorie entdeckt, d. h. vorausgesagt wird. Wir haben bereits drei Beispiele solcher Entdeckungen angeführt, nämlich die Unabhängigkeit der Wärmeleitung und der inneren Reibung der Gase von ihrem Verdichtungs- und Verdünnungsgrade und die Erscheinung der konischen Refraktion. Im allgemeinen kann man sagen, daß die Entdeckung physikalischer Erscheinungen 1. zufällig, 2. nicht zufällig und 3. auf Grund theoretischer Voraussagen geschehen kann. Der erste und dritte Weg zur Entdeckung kamen außerordentlich selten vor. Es könnte wohl scheinen, daß zufällige Entdeckungen recht oft geschehen, — das ist aber nicht richtig. Es dürfte schwer fallen, viele Beispiele solcher Entdeckungen aufzufinden, deren Zufälligkeit verbürgt wäre. Der italienische Arzt Galvani (vielleicht auch seine Frau) bemerkte zufällig krampfartige Zuckungen von Froschmuskeln — eine mehr physiologische Erscheinung, welche erst hinterher den italienischen Physiker Volta auf die — nunmehr nicht zufällige — Entdeckung des elektrischen Stromes führte. Es wird behauptet, daß Oerstedt (1820) auf einer Vorlesung die Beobachtung machte, daß eine Magnetnadel, welche zufällig in der Nähe eines stromführenden Drahtes sich befand, in Bewegung geriet, und daß auf diese Weise also zum ersten Male der Zusammenhang zwischen den elektrischen und magnetischen Erscheinungen entdeckt wurde. Andere hingegen behaupten, daß Oerstedt eine Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel gesucht hat und also diese große Entdeckung (vgl. weiter unten) „nicht zufällig“ gemacht

hat.¹⁾ Röntgen bemerkte (1895) zweifellos zufällig, daß eine fluoreszierende Platte, welche bei der Bestrahlung durch ultraviolettes Licht leuchtet, zu leuchten anfang, obgleich keine solche Strahlen auf sie fielen. Sie befand sich zufällig auf dem Tische, auf welchem Röntgen Versuche über das Leuchten verdünnter Gase beim Durchgang eines elektrischen Stromes anstellte, wobei die Röhre, in welcher das Gas sich befand, mit einem schwarzen, die ultravioletten Strahlen nicht durchlassenden Papier umwickelt war. Es war klar, daß die Röhre gewisse Strahlen aussandte, welche durch das Papier gingen — das waren eben die Röntgenstrahlen. Es fällt schwer, noch weitere Beispiele unzweifelhaft zufälliger Entdeckungen wichtiger physikalischer Erscheinungen anzuführen; sie sind ebenso selten wie die Entdeckungen auf dem dritten Wege der Voraussagung auf Grund rein theoretischer Betrachtungen. Man kann sagen, daß fast alle Entdeckungen physikalischer Erscheinungen nicht zufällig gemacht worden sind. Wir wollen versuchen, den Sinn dieser Worte aufzuklären. Weiter unten werden wir betrachten, wie eine physikalische Theorie auf Grund einer im voraus aufgestellten Hypothese aufgebaut wird, einer Hypothese über die hinter den Kulissen verborgenen Ursachen, welche unserer unmittelbaren Beobachtung unzugänglich sind und als Urquellen der erforschten physikalischen Erscheinungen betrachtet werden. Es erweist sich, daß ein Forscher keinen Schritt bei seinen wissenschaftlichen Arbeiten ohne irgendeine vorgefaßte Hypothese machen kann. In der Tat, wie auch diese wissenschaftliche, schöpferische Arbeit im übrigen beschaffen sein mag, wenn man in den „Mechanismus“ ihrer Entstehung einzudringen versucht, so sieht man, daß der Forscher bei seiner Arbeit sich von einer Hypothese leiten ließ. Jede wissenschaftliche Arbeit muß planmäßig betrieben werden. Vermöge seiner Kenntnisse und seiner Erfahrung stellt sich der Forscher ganz deutlich alle schon bekannten Einzelheiten der Erscheinungen vor, in deren Gebiet die ihn interessierende und zum Studium erwählte Frage gehört. Seine Kenntnisse und Erfahrung veranlassen ihn vorausszusehen, daß bei bestimmten neuen Bedingungen man etwas Neues zu erwarten hat. Offenbar wird niemand einen Versuch anstellen, wenn er von ihm nichts erwartet, und in dieser Erwartung, in dieser Voraussetzung, daß etwas Neues herauskommen wird, steckt schon die leitende Hypothese. In diesem Falle geht der Forscher von der Hypothese der Existenz der Er-

¹⁾ Die 1919 erschienene Lebensbeschreibung Oerstedts läßt die Frage offen.

scheinung aus, wobei die Erscheinung selbst, ihr Charakter und Aussehen ihm noch unbekannt sind oder nur verschwommen und in großen Zügen vor Augen stehen. Die Frage über die Richtigkeit oder Falschheit der Hypothese entscheidet sich, sobald das Experiment ausgeführt ist. Im zweiten Falle wird der Forscher seine Hypothese etwas abändern und die erwartete Erscheinung bei so oder anders abgeänderten Umständen zu finden suchen.

Auf ähnlichen Wegen werden neue Gesetze gefunden. Nehmen wir an, die Untersuchung irgendeiner Erscheinung hat dem Forscher gezeigt, daß zwischen zwei physikalischen Größen eine Beziehung vorhanden ist, welche sicher durch irgendein quantitatives Gesetz sich ausdrücken lassen muß. Der Forscher sucht nach diesem Gesetze und probiert zu diesem Zwecke eine Reihe von Gesetzen, welche ihm als möglich erscheinen, d. h. probiert wiederum nacheinander eine Reihe von Hypothesen, daß dieses oder jenes Gesetz „passen“ könne.

Einen anderen Fall der wissenschaftlich schöpferischen Arbeit haben wir vor uns, wenn ein Forscher auf Grund von manchmal sehr allgemeinen Betrachtungen auf den Gedanken geführt wird, daß zwischen zwei Erscheinungsgruppen, welche bis dahin nichts Gemeinsames zu haben schienen, eine Beziehung bestehen muß, z. B. ein Einfluß der einen Erscheinung auf das Eintreten oder die Gestalt der anderen. Das ist dann eine Hypothese des Zusammenhangs, welche wegen ihrer unbestimmten Form nicht unmittelbar geprüft werden kann. Ausgehend von seiner Hypothese sucht nun der Forscher nach diesem Zusammenhang und macht dabei eine Reihe von neuen Hypothesen darüber, in welcher Gestalt und unter welchen Bedingungen dieser Zusammenhang sich kund tun könnte. Eine jede solche Zusatzhypothese veranlaßt ihn, ein entsprechendes Experiment auszuführen, in der Hoffnung, auf dem von der Hypothese bezeichneten Wege den gesuchten Zusammenhang aufzufinden. Wenn es sich herausstellt, daß der gewählte Weg richtig ist, so ist damit auch die Hypothese über das Vorhandensein des Zusammenhangs bestätigt. So suchte Faraday einen Zusammenhang zwischen den Lichterscheinungen und den magnetischen Erscheinungen und fand schließlich (1845) jene magnetische Drehung der Polarisationssebene, über welche wir schon gesprochen haben. Wir haben oben die, möglicherweise zufällige, Entdeckung des Zusammenhangs zwischen den elektrischen und magnetischen Erscheinungen durch Oerstedt erwähnt. Später stellte es sich heraus, daß dieser Zusammenhang viel tiefer ist, und es wurde die Erregung des Magnetismus durch Ströme (Elektromagnete) und darauf von

Faraday die Erregung von (Induktions-) Strömen durch Magnete und andere Ströme entdeckt. Claude Bernard, der berühmte Physiologe sagte: „Eine vorgefaßte Meinung oder Hypothese ist der notwendige Ausgangspunkt einer jeden experimentellen Untersuchung. Ohne sie ist es undenkbar, etwas Neues zu entdecken.“ Von der Geschicklichkeit, eine richtige Hypothese zu machen, d. h., einen solchen Weg einzuschlagen, welcher zum Ziele führt, hängt der Erfolg der wissenschaftlichen Arbeit ab und dadurch bewerten wir das Talent der Forscher, unter denen an führender Stelle solche geniale Forscher wie Newton, Faraday, Fresnel, Hertz und andere zu nennen sind, auf welche die Menschheit stolz sein kann. Alles Dargelegte erklärt zur Genüge, worin die „Nichtzufälligkeit“ fast aller Entdeckungen in Gebiete der physikalischen Erscheinungen besteht und welche Rolle dabei Kenntnisse, Erfahrung und Talent bei der Aufstellung der führenden Hypothesen, welche den blinden Zufall zu ersetzen haben, spielen.

Der zweite von den drei Teilen, in welche die Lösung der allgemeinen Aufgabe der Physik zerfällt, besteht in der Erforschung der physikalischen Erscheinungen. Das ist das Hauptwirkungsfeld des Physikers als Forschers. Die Erforschung kann sich sowohl auf neuentdeckte, als auch auf längst bekannte Erscheinungen beziehen. Im zweiten Falle ist der Boden mehr vorbereitet und der Forscher hat es leichter, jene Richtungen zu finden, in welchen er arbeiten kann mit einiger Hoffnung, daß es ihm gelingen wird, etwas Neues an der betreffenden Erscheinung aufzufinden. Die Erforschung kann qualitativ und quantitativ sein. Im ersten Falle handelt es sich um die verschiedenen Formen, welche die zu untersuchende Erscheinung unter verschiedenen speziellen Bedingungen annimmt, z. B. bei verschiedenen Temperaturen oder Drucken und überhaupt bei verschiedenen Intensitäten der Einwirkungen, welche den Charakter der Erscheinung verändern können. Es kann das die Einwirkung von Licht, elektrischen und magnetischen Kräften, verschiedenen anderweitigen Stoffen usw. sein.

Wichtiger erscheint die Erforschung der quantitativen Seiten der physikalischen Erscheinungen, d. h. der quantitativen Beziehungen zwischen den verschiedenen Größen, welche diese oder jene Rolle in der betrachteten Erscheinung spielen. Das Ergebnis solcher quantitativen Untersuchungen ist die Entdeckung der Gesetze, welchen die gegebenen physikalischen Erscheinungen gehorchen. Diese Gesetze bilden oft die am meisten charakteristischen und die wichtigsten Züge der untersuchten Erscheinungen, welche uns ermöglichen,

am tiefsten in das Wesen der Erscheinung einzudringen, in die uns verborgenen Wurzeln, aus denen sie entspringt, und in die Ursachen, welche ihre Gestalt und ihren Verlauf bestimmen. Die quantitative Erforschung beruht stets auf der Ausführung von irgendwelchen Messungen. Die Physik hat es mit einer ungeheuren Anzahl der verschiedenartigsten Größen zu tun. Für die Messung dieser Größen gibt es besondere Instrumente, welche manchmal eine sehr verwickelte Einrichtung besitzen. Sie werden beständig abgeändert und nach verschiedenen Richtungen vervollkommen, um eine möglichst große Genauigkeit und zugleich Bequemlichkeit und Geschwindigkeit der Messungen zu erreichen. Man muß im Auge behalten, daß in der Physik die bloße Beobachtung ohne Messung eine ziemlich untergeordnete Rolle spielt. Die Ausführung genauer Messungen ist eine große Kunst, welche, wie eine jede Kunst, nicht jeder erlernen kann. Die Aufgabe besteht darin, mit Hilfe eines gegebenen Apparates die besten, d. h. die genauesten Resultate zu erhalten, mit anderen Worten: der Fehler, welcher bei jeder Messung unvermeidlich ist, soll möglichst klein ausfallen, soll einen möglichst kleinen Prozentsatz der gemessenen Größe ausmachen. Das Wichtigste, aber auch das Schwierigste an der Sache besteht in der Notwendigkeit, alle jene äußeren Umstände zu berücksichtigen, welche die Messungen beeinflussen und das Resultat fälschen könnten. Man muß dermaßen alle Eigenschaften des Instruments und alles das, was auf seine Anzeigen Einfluß haben kann, studiert haben, daß man nicht nur die äußerste Genauigkeit in den Resultaten erreicht, sondern gleichzeitig auch den Grad der erreichten Genauigkeit, die wahrscheinliche Größe des unvermeidlichen Fehlers abschätzen kann. Aus allem hier Dargestellten sehen wir, daß die Lösung des zweiten Teiles der Aufgabe der Physik, nämlich die Erforschung der Erscheinungen, in der Anstellung von Experimenten und fast immer in der Ausführung von Messungen verschiedener physikalischer Größen besteht.

Die Entdeckung und Erforschung der Erscheinungen ist Aufgabe der experimentellen Physik. Darin ist dasjenige enthalten, was wir oben „das Schema der praktischen allmählichen Lösung der Aufgabe der Physik“ genannt haben. Dieses Schema hat im letzten Halbjahrhundert keine Änderungen erlitten, und auch wenn man die Phantasie zu Hilfe nimmt, läßt es sich schwer vorstellen, daß es sich jemals wesentlich ändern könnte.

§ 3. Die Erklärung der physikalischen Erscheinungen. Der Aufbau physikalischer Theorien. Die Entdeckung und Erforschung

der Erscheinungen führt im Endresultat dazu, daß die Menschheit eine ungeheure Menge von Tatsachen kennen lernt. Solche Tatsachen sind offenbar alle Erscheinungen mit ihren vielseitigen charakteristischen Besonderheiten, ferner auch alle jene Gesetze und Regeln, welche diesen Erscheinungen unterworfen sind und welche strenggenommen als Bestandteile in das Wesen der Erscheinungen selbst eingehen und jedenfalls den wesentlichsten und unabtrennbaren Teil ihrer einigermaßen vollständigen Beschreibung bilden. Doch machen diese Tatsachen, so zahlreich, verschiedenartig und interessant sie auch sein mögen, alle zusammengenommen noch nicht dasjenige aus, was den Namen einer Wissenschaft verdienen könnte. Das ist nicht mehr als ein ungeheurer Haufen von Ziegeln und Bausteinen, aus denen das Gebäude der Wissenschaft selbst erbaut werden soll. Dazu ist es notwendig, vor allem aus dem großen Haufen eine möglichst große Gruppe solcher Tatsachen abzusondern, welche mehr oder weniger augenfällig als untereinander verwandt erscheinen. In dem wissenschaftlichen Gebäude, welches errichtet werden soll, werden alle Erscheinungen, welche eine solche, manchmal sehr umfangreiche, manchmal aber auch eine wenig zahlreiche Gruppe bilden, durch einen gemeinsamen Gedanken verbunden, auf ein gemeinsames Fundament gestellt, welches eben zur Erklärung aller in der betreffenden Gruppe inbegriffenen Erscheinungen dienen soll. Je umfangreicher die Gruppe ist, deren Erklärung von einem gemeinsamen Fundamente aus möglich ist, um so höher ist die Entwicklung der Wissenschaft. Wäre für jede einzelne Erscheinung eine besondere, selbständige Erklärung nötig, so würde das niemanden befriedigen, und einen solchen Haufen von Tatsachen und Erklärungen würde niemand eine Wissenschaft nennen.

Was kann nun als verbindende Grundlage bei der Erklärung einer Gruppe von physikalischen Erscheinungen dienen, worin besteht jenes Fundament, auf welchem das wissenschaftliche Gebäude, die Theorie der von uns abgesonderten Erscheinungsgruppe, errichtet wird? Alle diese Tatsachen befinden sich vor uns sozusagen auf der offenen Bühne; hinter den Kulissen dieser Bühne befinden sich aber die unserer unmittelbaren Beobachtung unzugänglichen Urquellen dieser Tatsachen mit ihren charakteristischen qualitativen und quantitativen Gesetzen. Über diese verborgenen Urquellen können wir nur Vermutungen aufstellen, Annahmen uns ausdenken, d. h. eine bestimmte Hypothese machen. Diese Hypothese bildet eben das Fundament jenes wissenschaft-

lichen Gebäudes, welches wir die Theorie der Erscheinungsgruppe genannt haben. Sie ist das zusammenfassende Prinzip, aus welchem diese Erscheinungen als notwendige und logische Folgerungen hervorgehen. Somit erscheint die Theorie als Resultat des Übergangs vom Haufen der Tatsachen, dieser Ziegel und Bausteine, zur Errichtung eines entsprechenden Teiles des Gebäudes der Wissenschaft. Von der Hypothese ausgehend, leitet man durch logische Schlußfolgerungen (mathematische Deduktion) die Erklärung der Erscheinungen ab, d. h. alle ihre qualitativen und quantitativen Merkmale, alle beobachteten Regeln und Gesetze. Doch sind wir berechtigt, von einer physikalischen Theorie noch mehr zu erwarten, als die bloße Erklärung aller schon bekannten Tatsachen; wir erwarten, daß sie imstande sein wird, auch neue Erscheinungen vorauszusagen. In der Tat, aus der der Theorie zugrunde gelegten Hypothese muß es möglich sein, alle aus ihr fließenden Folgerungen abzuleiten, d. h. eine erschöpfende Antwort auf die Frage zu geben: 1. welche Erscheinungen müssen vorhanden sein, welchen Regeln und Gesetzen müssen sie gehorchen, wenn jene hinter den Kulissen verborgene Ursache, deren Existenz in der von uns angenommenen Hypothese vorausgesetzt ist, wirklich vorhanden ist? Es ist höchst unwahrscheinlich, daß alle Erscheinungen, welche zufolge der betrachteten Hypothese existieren müssen, schon entdeckt und erforscht wären. Es kann also die Theorie uns einen Hinweis auf solche Erscheinungen geben, welche noch unbekannt sind, und manchmal auch auf solche, deren Vorhandensein auch nicht geahnt werden konnte, wenn auch nur wegen ihrer vollständigen Neuartigkeit. In anderen Fällen ist die Theorie imstande, irgendwelche neue qualitative Züge und quantitative Gesetze von längst bekannten Erscheinungen vorherzusagen, wobei das, was die Theorie darüber aussagt, noch nicht bemerkt worden war. Alle solche Vorhersagungen der Theorie müssen experimentell geprüft werden. Wenn das Experiment zeigt, daß die Erscheinung oder das Gesetz wirklich vorhanden sind, so können wir sagen, daß die Theorie triumphiere; sie hat ihre Macht gezeigt, indem sie nicht nur Bekanntes erklärte, sondern Neues, bisher Unbekanntes aufdeckte.

Man darf aber solchen gelungenen Voraussagungen einer Theorie doch keine allzu große Bedeutung beimessen und es wäre leichtsinnig, auf Grund weniger oder gar nur einer richtigen Voraussagung zu behaupten, daß die gewählte Hypothese zutreffend, die ganze Theorie richtig aufgebaut sei und für immer als unerschütterlich feststehender Teil der Wissenschaft verbleiben werde. Zweifellos

spricht eine klare und zwanglose Erklärung zahlreicher bekannter Erscheinungen und Gesetze und die richtige Voraussagung neuer stark zugunsten der gegebenen Hypothesen und der auf ihr erbauten Theorie. Doch können diese Umstände niemals einen unwiderlegbaren Beweis der Richtigkeit der Hypothese liefern. Es kann nämlich ein und dieselbe Erscheinungsgruppe eine Folge mehrerer verschiedener hinter den Kulissen verborgener Ursachen sein; die Aufgabe der Wissenschaft besteht eben darin, daß sie diejenige Ursache aus der Zahl der möglichen aufsucht, welche als die wahrscheinlichste erscheint.

Jede Hypothese samt der auf ihr erbauten Theorie ist, wie die Geschichte der Physik uns lehrt, etwas Vergängliches, Leichtverletzbares, das von einem verhältnismäßig geringen Stoße zugrunde gehen kann. Soviel die gegebene Hypothese auch an Erscheinungen und Gesetzen erklärt und vorhergesagt hat, wird sie von der Wissenschaft unverzüglich fallen gelassen, sobald auch nur eine Folgerung durch den Versuch nicht bestätigt wird oder eine neue Erscheinung entdeckt wird, welche in den Rahmen der Theorie nicht paßt, d. h. auf Grund der gegebenen Hypothese sich nicht erklären läßt oder ihr geradezu widerspricht. Dann ist man gezwungen, die nunmehr nicht haltbare Hypothese durch eine andere zu ersetzen und den betreffenden Teil des Gebäudes der Wissenschaft mehr oder weniger gründlich umzubauen. Wir haben oben die glänzende Blütezeit der Theorie der elastischen Ätherschwingungen beschrieben; wir werden sehen, wie diese Theorie in den ersten Tagen der neuen Physik zusammenbrach. Je größer die Zahl der verschiedenen Erscheinungen, welche durch eine Hypothese erklärt werden, um so besser. Einen idealen Zustand der Vollkommenheit würde die Wissenschaft erreicht haben, wenn in ihr nur eine einzige Hypothese übrigbliebe, aus welcher die Gesamtheit aller beobachteten Erscheinungen mit allen ihren quantitativen Gesetzen sich folgern ließe.

Wir haben die Hypothesen und die auf ihnen begründeten Theorien als vergänglich bezeichnet. Sie erfreuen sich im allgemeinen keiner langen Lebensdauer; nach einer zuweilen üppigen und glänzenden Blüte beginnen sie allmählich zu verfallen, erweisen sich als veraltet, genügen den neuen Anforderungen der Wissenschaft nicht mehr und müssen schließlich auf immer verworfen werden. Ist das aber wirklich so der Fall, so fragt es sich, welche Bedeutung haben denn alle diese Hypothesen und Theorien, welche offenbar falsch gewesen sind, da man sie durch andere hat ersetzen müssen? Doch wollen wir hier die wichtige Frage über die historische Bedeutung

der Hypothesen nicht erörtern. Man findet sie in meinem Buche „Die Physik und ihre Bedeutung für die Menschheit“, Braunschweig, Vieweg, 1924, Kap. II, § 6.

Wenn wir über Theorien sprechen, so schließen wir solche Teile der Physik vollständig aus, welche nichts anderes als Folgerungen aus irgendeinem experimentell festgestellten physikalischen Gesetze sind und auch „Theorien“ genannt werden. Dazu gehören: die Theorie der Wärmeleitung, die Elastizitätstheorie, die Potentialtheorie u. a. Diese Theorien, welche immer sehr viel Mathematik und manchmal sehr wenig Physik enthalten, sind ewig, weil sie auf feststehender Grundlage erbaut sind.

Auf Grund des soeben Gesagten wollen wir jetzt zusammenfassend formulieren, worin jener dritte Teil der Aufgabe der Physik besteht, in welchem die Erscheinungen erklärt werden sollen. Wir sehen, daß die Erklärung durch eine Theorie gegeben wird, welche nach folgendem Schema aufgebaut ist:

1. Als Grundlage der Theorie dient eine Hypothese über die hinter den Kulissen verborgene Ursache einer physikalischen Erscheinungsgruppe.

2. Aus dieser Hypothese muß die Existenz aller Erscheinungen der betrachteten Gruppe als notwendige logische Folgerung hervorgehen. Darin besteht eben die „Erklärung“.

3. Neu entdeckte Erscheinungen derselben Gruppe müssen in den Rahmen der Theorie hinein passen, d. h. auf Grund derselben Hypothese zu erklären sein.

4. Alle Voraussagungen der Theorie müssen sich im Experimente bewähren.

Alles, was nicht streng unter dieses Schema paßt, verdient nicht den Namen einer physikalischen Theorie.

Zum Schlusse wollen wir das Fazit unter dieses Kapitel ziehen, in welchem wir zeigen wollten, was sich in der Physik im Verlaufe der letzten 50 Jahre nicht verändern konnte. Wir hatten oben die drei ewigen Kennzeichen, die drei für immer unveränderlichen Seiten der Physik angegeben. Wir wollen sie in einer etwas abgeänderten Fassung wiederholen:

- I. Der Gegenstand oder die Aufgabe der Physik.

- II. Die experimentelle Methode der Entdeckung und Erforschung physikalischer Erscheinungen.

- III. Diejenige Methode der Erklärung der physikalischen Erscheinungen, oder, was dasselbe besagt, das

Schema des Aufbaus der physikalischen Theorien, welche wir soeben in vier Punkte zusammengefaßt haben.

Diese drei Seiten der Physik haben sich nicht geändert, konnten sich nicht ändern und werden sich auch nie ändern (vgl. die obige Bemerkung zum Punkte II). Wenn wir über Erscheinungen sprachen, so meinten wir darunter nicht nur ihre qualitative Seite, ihr Aussehen, sondern auch die quantitative Seite, d. h. die Gesetze, welchen diese Erscheinungen gehorchen.

Kapitel IV.

Die neue Physik als Erweiterung der alten.

§ 1. Einleitung. Im zweiten Kapitel haben wir eine Charakteristik der Physik zu Anfang der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts gegeben und im dritten Kapitel jene Grundzüge der Physik unterstrichen, welche für immer unerschütterlich fest bestehen müssen, weil auf ihnen das Wesen dieser Wissenschaft beruht. Nun müssen wir zur neuen Physik übergehen, d. h. zur Betrachtung jener Evolution, welche aus der fünfzigjährigen schöpferischen Tätigkeit der Forscher hervorgegangen ist. Vor allem müssen wir unsere Aufgabe genauer formulieren und klarlegen, was wir eigentlich unter der Bezeichnung „Evolution der Physik“ verstehen. Im § 1 des ersten Kapitels ist bereits erwähnt worden, daß wir nicht den Geist der Evolution der Physik, sondern vielmehr „die Evolution des Geistes der Physik“ im Auge haben. Daher müssen wir erklären, welche Eigentümlichkeiten der Physik den „Geist“ der Physik eigentlich bestimmen? Wollen wir uns noch einmal jenes Bild ins Gedächtnis rufen, welches wir dem Theater entnommen haben, jene Teilung in eine offene Bühne und das Gebiet hinter den Kulissen. Auf der Bühne sehen wir die Tatsachen, welche wir unmittelbar beobachten können, d. h. die physikalischen Erscheinungen mit ihren qualitativen und quantitativen Kennzeichen; zu den letzteren gehören alle Gesetze und Regeln, welchen diese Erscheinungen unterworfen sind. Ihre Entdeckung gehört fast gänzlich und ihre Erforschung vollkommen in das Gebiet der Experimentalphysik. Wenn auch ein kleiner Teil der Erscheinungen auf Grund der Voraussagen der Theorie entdeckt wurde, so hat das für uns an dieser Stelle keine Bedeutung, denn auch in diesem

Falle wurde die Erscheinung für uns erst dann zur reellen Tatsache, nachdem die Theorie durch das Experiment bestätigt worden war. Hinter den Kulissen befinden sich die unserer Beobachtung unzugänglichen Urquellen der physikalischen Erscheinungen. Eine Hypothese über deren Wesen ist der Theorie zugrunde gelegt; die Theorie baut nun das wissenschaftliche Gebäude aus jenen Ziegeln und Bausteinen auf, welche die offene Bühne als „Tatsachen“ anfüllen. Wir hatten die Absicht, die Physik von allen Seiten, d. h. sowohl die offene Bühne mit ihren Tatsachen, als auch das Gebiet hinter den Kulissen mit den Hypothesen und Theorien, welche ja den wesentlichen Inhalt der Physik als Wissenschaft ausmachen, zu beleuchten. Besonders interessiert uns aber die Evolution des Geistes der Physik, und wir müssen deshalb uns darüber klar werden, was denn eigentlich diesen Geist der Physik charakterisiert und bestimmt, die Tatsachen oder die Theorien? Selbstverständlich sind es ausschließlich die Theorien. Die Ansammlung neuer Tatsachen, d. h. der Erscheinungen und der Gesetze, ist sicherlich charakteristisch für die Evolution der Wissenschaft, hat aber keine Beziehung zu jener Evolution des Geistes, welche wir in diesem Buche hauptsächlich im Auge haben. Wenn also die Zahl der Tatsachen 2-, 3- oder selbst 10mal größer wird, so ist das eben eine rein quantitative Evolution, jedoch nicht jene qualitative, welche den Geist der Physik ändert. Freilich unterliegt es keinem Zweifel, daß eine ungeheure Anzahl neuer Tatsachen im engsten Zusammenhang mit den neuen Theorien steht; in dem Thema, welches wir hier behandeln, spielt aber die Geschichte des Entstehens neuer Tatsachen überhaupt keine Rolle. Wir können daher die ganze Masse der neuen Tatsachen als etwas Gegebenes, als historisches Ereignis, als wichtiges Glied der Evolution der Physik betrachten. Sie bestimmen teilweise den „Geist der Evolution“, haben aber mit der Evolution des Geistes nichts zu schaffen.

Somit liegt die Antwort auf die von uns gestellte Frage klar vor uns. Um die Hauptaufgabe dieses Buches zu lösen, haben wir unsere ganze Aufmerksamkeit auf das Gebiet hinter den Kulissen zu richten, d. h. wir müssen die Evolution der theoretischen Physik untersuchen. Aus zwei Gründen können wir jedoch jene quantitativen Veränderungen nicht mit Stillschweigen übergehen, welche auf der offenen Bühne vor sich gegangen sind, d. h. die Resultate der experimentellen Physik. Erstens, weil diese Resultate die allgemeine Evolution der Physik kennzeichnen, zweitens, und das ist die Hauptsache, weil die Er-

forschung des jenseits der Bühne Gelegenen, ausschließlich durch das sowohl hervorgerufen als auch geleitet wird, was auf der offenen Bühne sich befindet. Einfacher gesagt, die neue theoretische Physik ist das Resultat der neuen Experimentalphysik. Beide sind innig miteinander verknüpft und natürlich kann die erste ohne Kenntnis der letzten nicht verstanden werden. Aus dem Gesagten ist es aber klar, daß wir uns auf die einfache Aufzählung der neuentdeckten physikalischen Erscheinungen beschränken können, wobei wir eine besondere Aufmerksamkeit jenen Erscheinungen widmen wollen, welche auf das engste verbunden sind mit den neuen Theorien und mit unserer Hauptaufgabe: die Evolution des Geistes der Physik im Laufe der letzten 50 Jahre darzustellen.

§ 2. Neue Tatsachen. Die Molekularphysik. Unter der Bezeichnung „Tatsachen“ verstehen wir, wie bereits verabredet, physikalische Erscheinungen; ihre Entdeckung erfolgte fast immer, ihre Erforschung, sowohl in qualitativer, als auch in quantitativer (Gesetze) Hinsicht ausschließlich durch die Experimentalphysik. Die Zahl der auf der offenen Bühne im Laufe der letzten 50 Jahre erschienenen neuen Tatsachen beläuft sich, unzweifelhaft auf mehrere Tausende und falls man noch die weniger wichtigen hinzurechnet, sogar auf Zehn- oder Hunderttausende. Wir wollen uns auf die einfache Aufzählung der wichtigsten Tatsachen beschränken, nämlich solcher, welche neue wissenschaftliche Gebiete eröffnet und die Entwicklung der Theorien und unsere Weltauffassung beeinflußt haben. Als solche wählen wir 27 neue Tatsachen, welche wir in der üblichen Reihenfolge der Abschnitte der Physik aufzählen wollen. Dabei wird es oft vorkommen, daß unter einer Nummer nicht bloß eine einzelne Tatsache Platz findet, sondern eine ganze Gruppe neuer, eng miteinander verbundener Tatsachen, welche letztere schon an sich in manchen Fällen ein recht umfangreiches neues Kapitel der Physik bilden und zu ihrer einigermaßen vollständigen Darstellung eine Reihe von Bänden beanspruchen würden. Wir nehmen dabei durchaus keine Rücksicht auf jene Hunderttausende neuer Tatsachen, welche bloß eine Vermehrung der Anzahl der bereits vor 50 Jahren bekannten Tatsachen derselben Art darstellen. Über deren Anzahl kann man sich eine klare Vorstellung machen, wenn man die Tabellen der physikalischen Größen vom Jahre 1923 (Landolt-Börnstein) mit ähnlichen Tabellen vom Jahre 1873 vergleicht. Übrigens kommen wir noch einmal, allerdings nur in Kürze, auf diese Frage zurück. Zu den neuen Tatsachen von der größten Bedeutung rechnen wir folgende:

1. Atome und Moleküle. Die Existenz der Atome und Moleküle ist zur Tatsache geworden. Vor fünfzig Jahren konnte man bloß von einer diesbezüglichen, wenn auch sehr wahrscheinlichen Hypothese reden; nichtsdestoweniger bestand unter einigen Forschern dieser Frage gegenüber ein ausgeprägter Skeptizismus, welcher im Laufe der Jahre merklich zunahm. In den neunziger Jahren war es so weit gekommen, daß einige der hervorragendsten Forscher sich äußerst ablehnend dem Gedanken an eine reelle Existenz der Atome und Moleküle gegenüber verhielten. Die weitere Entwicklung der Wissenschaft jedoch bewirkte die Verwandlung der mehr oder weniger großen Wahrscheinlichkeit der Atomhypothese in eine Gewißheit, und infolgedessen wurde aus der Hypothese eine sicher gestellte Tatsache. Durch die neuen experimentellen Untersuchungen wurde die Existenz der Atome sichergestellt, und zwar so augenscheinlich, daß auch die Skeptiker ihren Widerstand aufgaben und sich für überwunden erklärten. Ohne uns bei diesen neuen Untersuchungen weiter aufzuhalten, wollen wir bloß jene Versuche erwähnen, bei denen man Heliumatome (welche nach Verlust zweier Elektronen sogenannte α -Teilchen bilden) durch einen engen Spalt in ein geschlossenes zylindrisches Gefäß einfliegen ließ, wobei man den Durchgang jedes einzelnen Teilchens bemerken und registrieren konnte. Die Atome und Moleküle sind nun aus dem Gebiete hinter den Kulissen, welches der unmittelbaren Beobachtung unzugänglich war, auf die offene Bühne getreten, auf welchen die beobachtbaren Tatsachen sich befinden.

2. Der kinetische Zustand der Atome und Moleküle. Alles soeben über die Existenz der Atome und Moleküle Gesagte bezieht sich gleichfalls auf den kinetischen Zustand derselben. Die Vorstellung, daß die Atome und Moleküle sich in ununterbrochener Bewegung befinden und daß ihr Wärmeverrat durch die lebendige Kraft dieser Bewegung bestimmt ist, hat aufgehört eine Hypothese zu sein und ist zur Tatsache geworden. Die allseitige Erforschung der von Brown, einem englischen Arzte, entdeckten Erscheinung hat viel dazu beigetragen, diese Evolution, diesen Übergang aus dem geheimnisvollen und immer zweifelhaften Gebiet hinter den Kulissen auf die offene Bühne zu ermöglichen. Brown machte bereits im Jahre 1827 die Beobachtung, daß äußerst kleine feste, in einer Flüssigkeit (Pflanzensaft) suspendierte Teilchen unter dem Mikroskop eine ununterbrochene Bewegung zeigen, welche an ein unregelmäßiges Zittern erinnert. Diese niemals aufhörende Bewegung hängt von verschiedenartigen äußeren Einflüssen fast gar nicht ab.

Im Verlaufe vieler Jahre fand diese Beobachtung keine ihr gebührende Aufmerksamkeit und erst vor kurzem wurde dieselbe einer allseitigen, systematischen Untersuchung unterzogen, welche jeden Zweifel darüber benahm, daß die sichtbaren Bewegungen der Teilchen durch Stöße hervorgerufen werden, welche sie von den in Bewegung begriffenen Molekülen der Flüssigkeit, in welcher sie suspendiert sind, erfahren.

3. Der Bau der Kristalle. In der Frage über den Bau der Kristalle, d. h. der Gruppierung ihrer Teilchen oder Atome, hat die neue Physik nicht nur die Hypothese in eine sichergestellte Tatsache verwandelt, sondern hat auch das hypothetisch angenommene Bild durch höchst bemerkenswerte und unerwartete Einzelheiten bereichert. Schon in der alten Physik nahm man an, daß in den Kristallen die Teilchen in den Ecken der Parallelepipeda, deren Kanten aus drei Systemen paralleler Linien, dem sogenannten Raumgitter, gebildet werden, gelegen sind. In den Kristallen des regelmäßigen Systems werden diese Gitterzellen zu Würfeln. Mit Hilfe der Röntgenstrahlen gelang es auch diese Hypothese als solche aufzuheben und sie in eine unumstößliche Tatsache zu verwandeln. Augenblicklich ist die innere Struktur der Kristalle einer großen Anzahl von Stoffen genau bekannt. Dabei wurde ein sehr unerwarteter und wichtiger Umstand entdeckt, nämlich daß in den Ecken der Gitterzellen nicht die Moleküle ihren Sitz haben, sondern einzelne Atome oder Atomgruppen, aus denen die Moleküle des betreffenden Kristalls zusammengesetzt sind. So liegen z. B. beim Chlornatrium (Steinsalz), welches im regelmäßigen Systeme kristallisiert, in den Ecken der Würfel nicht die Moleküle des Chlornatriums, sondern einzelne Atome des Natrium und des Chlors, und zwar untereinander abwechselnd längs jeder dem Raumgitter angehörigen Geraden. Es ist klar, daß um jedes Natriumatom, in gleicher Entfernung von ihm sechs Chloratome gelegen sind und jedes Chloratom genau ebenso von sechs Natriumatomen umgeben ist. Die Lehre von der Struktur der Kristalle, deren Grundlage nunmehr keine Hypothese, sondern eine sichergestellte Tatsache ist, bildet augenblicklich ein umfangreiches und interessantes Kapitel der Physik.

4. Neue Grundstoffe und die Isotopen. In den letzten 50 Jahren ist eine ganze Reihe neuer Grundstoffe, deren Gesamtzahl sich jetzt auf 89 beläuft, entdeckt worden. Diese Zahl gilt übrigens nur unter der Voraussetzung, daß man die Isotopen, auf deren Besprechung wir sogleich zurückkommen werden, nicht als selbständige Grundstoffe zählt. Zu den neu entdeckten Elementen gehören: einatomige Edelgase (Neon, Argon, Krypton, Xenon

und Helium), ferner eine ganze Reihe seltener Erdmetalle, die radioaktiven Grundstoffe und eine Reihe anderer. Als letzte wurden entdeckt das Hafnium (1922), das Masurium (1925) und das Rhenium (1925). In den folgenden Kapiteln werden wir sehen, daß gegenwärtig der Ordnungszahl Z der Grundstoffe eine außerordentliche Bedeutung beigemessen wird, jener Zahl nämlich, die wir erhalten, wenn wir im periodischen System Mendelejeffs alle Grundstoffe der Reihe nach numerieren. Weiter unten werden wir sehen, daß die Anzahl der Grundstoffe vom Wasserstoff bis zum Uran 92 betragen muß; fünf solcher Grundstoffe sind auf der Erdoberfläche noch nicht gefunden worden. Als man die radioaktiven Stoffe (siehe unten) entdeckte, erwies es sich, daß man unter eine und dieselbe Ordnungszahl (oder Nummer) Z mehrere Grundstoffe einreihen mußte. So befinden sich z. B. unter der Nummer $Z = 82$ sechs Grundstoffe: *RaG*, Blei, *ThD*, *RaD*, *AcB*, *ThB* und *RaB*. Solche Grundstoffe bezeichnet man als Isotopen. Der Streit darüber, ob man die Isotopen für verschiedene Grundstoffe halten soll oder ob sie bloß Abarten eines und desselben Grundstoffs sind, im oben zitierten Beispiel — Abarten des Bleies, ist bisher noch nicht endgültig entschieden, obgleich, wie es scheint, die Mehrzahl der Forscher, jedoch nicht alle (Sommerfeld) sich zugunsten der zweiten Annahme neigen. Die Isotopen besitzen vollkommen gleiche chemische Eigenschaften und können daher auf chemischem Wege nicht voneinander getrennt werden. Auch die physikalischen Eigenschaften der Isotopen sind identisch, mit Ausnahme jener Eigenschaften, welche von der Masse der Atome oder, was dasselbe bedeutet, von ihrem Atomgewichte, welches in der Gruppe der Isotopen derselben Ordnungszahl verschieden ist, abhängen. So kennen wir für die sechs Isotopen der Bleigruppe ($Z = 82$) folgende Atomgewichte:

<i>RaG</i>	Blei	<i>ThD</i>	<i>RaD</i>	<i>AcB</i>	<i>ThB</i>	<i>RaB</i>
206,2	207,2	208,0	210	(210)	212	214

Die ersten drei Größen sind durch direkte Messungen bestimmt worden; die beiden letzten sind durch Berechnung gefunden; das Atomgewicht von *AcB* (Actinium *B*) ist bloß mutmaßlich geschätzt. Man ersieht daraus, daß die Atomgewichte der Isotopen tatsächlich sich beträchtlich voneinander unterscheiden.

Bis zum Jahre 1919 kannte man nur die Isotopen der schwersten Elemente mit den Ordnungszahlen $Z = 81$ bis $Z = 92$, d. h. aus der Gruppe der radioaktiven Stoffe. Im Jahre 1919 wurde die große

Entdeckung gemacht, daß auch unter den leichteren, nicht radioaktiven Grundstoffen Isotopen vorkommen. Wir brauchen uns nicht bei der Beschreibung der experimentellen Methode, welche zu dieser unerwarteten Entdeckung geführt hat, aufzuhalten. J. J. Thomson legte den Grundstein zu dieser Methode, Aston hat dieselbe vervollkommenet. Nach den neuesten Angaben Astons (Dezember 1923) steht fest, daß *Li, B, Ne, Mg, Si, Cl, A, K, Ca, Fe (?)*, *Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Se, Bn, Kn, Rb, Ag, Sn, Sb, X* und *Hg* Isotopen besitzen oder, genauer ausgedrückt, aus Isotopen bestehen. Die Isotopie des Eisens ist noch fraglich. Damit ist gemeint, daß jene Stoffe, die wir gewöhnlich in der Natur antreffen oder aus ihren chemischen Verbindungen ausgeschieden erhalten, Gemische mehrerer Abarten desselben Grundstoffes sind. So gibt es z. B. zwei Abarten Chlor, zwei Isotopen, deren Atomgewicht 35 und 37 betragen; das gewöhnliche Chlor ist ein Gemisch aus annähernd drei Teilen Cl_{35} und einem Teil Cl_{37} . Das gewöhnliche Quecksilber (Atomgewicht 200,6) ist ein Gemisch aus sechs Isotopen, gleichsam sechs verschiedener „Quecksilber“, deren Atomgewichte zwischen 197 und 204 schwanken. *Li, B, Ne, Si, Cl, A, K, Ca, Ni, Cu, Ga, Kr, Rb, Ag* und *Sb* haben jedes bloß zwei Isotopen; *Mg* und *Ge* haben drei, *Se, Kr* und *Hg* je sechs, *Sn* und *X* je sieben Isotopen. Die Atomgewichte der Isotopen des Kryptons schwanken zwischen 78 und 86. Das allerwichtigste Resultat dieser Entdeckungen besteht in der Tatsache, daß die Atomgewichte der Isotopen, dieser natürlichen Grundstoffe oder Urstoffe, ganze Zahlen sind. Diese Entdeckung hat eine sehr große Bedeutung.

5. Die Zertrümmerung der Atome. Bei der Aufzählung der neu entdeckten „Tatsachen“ vermeiden wir es, theoretische Fragen zu berühren, welche mit den verschiedenen Hypothesen über das „hinter den Kulissen befindliche“ verbunden sind. Aus diesem Grunde haben wir diesen Abschnitt „Zertrümmerung der Atome“, und nicht Zertrümmerung der Atomkerne betitelt. Wir wollen uns mit dem Hinweis auf die Tatsache begnügen, welche im folgenden besteht. Oben wurde bereits erwähnt, daß die α -Teilchen Atome des Heliums sind, von denen jedes eine bestimmte Ladung positiver Elektrizität besitzt oder eine bestimmte Ladung negativer Elektrizität verloren hat, nämlich, wie wir weiter sehen werden, zwei Elementarladungen, d. h. zwei Elektronen. Rutherford entdeckte nun, daß wenn rasch bewegte α -Teilchen Stickstoffatome treffen, diese letzteren zertrümmert werden, wobei als eines der Zertrümmerungsprodukte ein Wasser-

stoffatom zum Vorschein kommt. Es bedarf keines besonderen Hinweises auf die enorme Bedeutung dieser Tatsache; sie beweist geradezu handgreiflich, daß die Atome keine homogenen Körperchen sind, wie man sich dieselben früher vorgestellt hatte; sie müssen einen komplizierten Bau, eine gewisse Struktur besitzen. Wir brauchen uns nicht bei den weiteren Experimenten Rutherfords aufzuhalten, in denen an Stelle des Stickstoffs andere Körper der Einwirkung der α -Teilchen unterworfen wurden. Die Hauptsache ist, daß die Atome verschiedener Elemente unter dem Einfluß genügend starker Stöße zertrümmert werden und daß unter den Trümmern stets als ein Bestandteil das Wasserstoffatom auftritt.

§ 3. Neue Tatsachen. Die Lehre von den Wärmeerscheinungen.

6. Die Verflüssigung der Gase und die Erzielung niedriger Temperaturen. Im Jahre 1873 waren alle zu jener Zeit bekannten gasförmigen Stoffe in den flüssigen und teilweise in den festen Zustand übergeführt worden, ausgenommen folgende sechs Stoffe: Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Stickoxyd (NO), Kohlenoxyd (CO) und Methan (CH_4), außerdem waren Fluor, Ozon und noch etliche Gase in flüssigem Zustande nicht bekannt. Die ersten fünf Gase wurden zu jener Zeit permanente Gase genannt. Indessen gelang es 1877 Cailletet und unabhängig von ihm Pictet sowohl Sauerstoff als Kohlenoxyd in flüssigem Zustande zu erhalten. In der Folge gelang es den beiden, wie auch anderen Forschern, die übrigen Gase, jedoch mit Ausnahme des Wasserstoffs, zu verflüssigen. Letzteren verwandelte als erster Dewar in flüssigen Zustand im Frühjahr 1888. Darauf gelang es Fluor (1897), Ozon und COS in den flüssigen Zustand überzuführen. Ebenso gelang es bald nach deren Entdeckung, auch die Edelgase: Neon, Argon, Krypton und Xenon zu verflüssigen. Als man jedoch das Helium auf der Erdoberfläche entdeckte, erwies es sich, daß dasselbe noch viel schwieriger als Wasserstoff zu verflüssigen war, und erst am 10. Juli 1908 erhielt Kamerlingh-Onnes das Helium in flüssigem Zustande, wobei der Siedepunkt des letzteren, bei normalem atmosphärischem Drucke bei $4,29^{\circ}$ der Skala der absoluten Temperatur, d. h. gleich $-268,71^{\circ} C$ sich erwies. Unter fortgesetzter Abkühlung bereits verflüssigter Gase wurde es möglich alle Gase mit Ausnahme von Helium in festem Zustande zu erhalten. Kamerlingh-Onnes erzielte eine Temperatur von $0,9^{\circ}$ der absoluten Skala, wobei aber das Helium noch nicht fest wurde.

Die Verflüssigung und die Überführung in den festen Zustand der erwähnten Gase konnte nur dadurch erreicht werden, daß es

allmählich gelang, immer niedrigere Temperaturen zu erzielen. Die tiefsten Temperaturen, welche man vor 50 Jahren erreichen konnte, waren nicht viel niedriger als -100° . Wir haben soeben erwähnt, daß neuerdings eine Temperatur von -272° erreicht wurde, welche bloß um einen Grad oder sogar etwas weniger vom Nullpunkte der absoluten Skala absteht. Dank dieser enormen Erweiterung des Gebietes der erreichten Temperaturen hat sich ein neuer Zweig unserer Wissenschaft gebildet, nämlich „Die Physik der niedrigen Temperaturen“. Es erweist sich nun, wie auch zu erwarten war, daß die Eigenschaften verschiedener Stoffe, die quantitativen und qualitativen Züge vieler physikalischer Erscheinungen sich bei sehr niedrigen Temperaturen wesentlich ändern.

7. Die spezifische Wärme. Die Lehre von der spezifischen Wärme ist im Laufe der letzten 30 Jahre von Grund aus umgestaltet worden. Indem wir auch hier theoretische Fragen vollkommen beiseite lassen, wollen wir uns auf die Aufzählung der wichtigsten Tatsachen, welche auf experimentellen Wegen gefunden wurden, beschränken. Es sind dies folgende Tatsachen:

a) Es war schon längst bekannt, daß die spezifische Wärme vieler Körper, besonders der festen, beim Sinken der Temperatur abnimmt. Als man imstande war die obenerwähnten, niedrigen Temperaturen zu erreichen, konnte man viel vollständiger als früher die Abhängigkeit der spezifischen Wärme von der Temperatur untersuchen. Dabei erwies es sich, daß bei sehr niedrigen Temperaturen die spezifische Wärme vieler Stoffe rasch abnimmt. In einigen Fällen wurde die spezifische Wärme so klein, daß man dieselbe nicht mehr messen konnte, praktisch war sie gleich Null. Als Beispiel wollen wir einige Zahlengrößen für den Diamanten anführen, dessen Atomwärme (das Produkt der spezifischen Wärme mit dem Atomgewicht 12) bei Zimmertemperatur gleich 1,35 ist. Bei einer Temperatur von 220° abs. (-153°) ist seine Atomwärme bereits 0,72, bei 205° abs. (-168° C) gleich 0,62, bei 92° abs. (-181° C) 0,03; unter 46° abs. (-227° C) unmeßbar klein. Dasselbe gilt auch für Karborund (*SiC*). Die Atomwärme des Kupfers bei Zimmertemperatur ist 5,9, bei 50° abs. (-223° C) gleich 1,434 und bei $14,5^{\circ}$ abs. ($-258,5^{\circ}$ C) sinkt sie bis auf 0,0396, d. h. wird fast 150mal kleiner. Kamerlingh-Onnes und Holst bestimmten die spezifische Wärme (nicht die Atomwärme) des Quecksilbers bei einer Temperatur zwischen $2,93^{\circ}$ abs. und $3,97^{\circ}$ abs. ($-270,07^{\circ}$ C und $-269,03^{\circ}$ C) und fanden die Zahl 0,000534; bei Zimmertemperatur dagegen beträgt sie 0,333. Es ist interessant, daß es gelungen ist, die spezifische

Wärme sowohl der verflüssigten als auch der fest gewordenen Gase zu messen und auch in diesen Fällen war eine Abnahme der spezifischen Wärme bei sinkender Temperatur zu bemerken.

b) Die Atomwärme der einatomigen Gase hängt von der Temperatur überhaupt nicht ab und ist immer gleich 3; das hat sich z. B. beim Helium zwischen -258°C und $+2000^{\circ}\text{C}$ bestätigt.

c) Bei zwei- und vielatomigen Gasen steigt die spezifische Wärme mit der Temperatur: beim Wasserstoff ist die Molekularwärme 4,75 bei 0°C , bei 2000 ist sie 6,0, unter -223°C erreicht sie den Wert 3,0 (wie bei einatomigen Gasen!) und bleibt unverändert bis -238°C . Bei der Kohlensäure nimmt die Molekularwärme von 6,80 bei 0°C bis 11,5 bei 2000° zu.

d) Bei den einatomigen Gasen ist das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Drucke und konstantem Volumen gleich 1,66; diesen Wert haben Kundt und Warburg im Jahre 1876 für Quecksilberdampf gefunden; später haben andere Forscher denselben Wert für die Dämpfe von Kalium, Natrium und Kadmium und gleichfalls für Argon, Neon, Krypton, Xenon und Helium gefunden.

§ 4. Neue Tatsachen. Die Lehre von der Strahlung.

8. Infrarote und ultraviolette Strahlen. Wir haben gesehen, daß vor 50 Jahren sowohl das Spektrum des sichtbaren Lichtes vom roten bis zum violetten Ende, als auch die Spektre der unsichtbaren Strahlen, der infraroten und der ultravioletten, bekannt waren. Die Untersuchung des infraroten Spektrums (der Sonne) hatte erst begonnen; genaue Messungen der Wellenlänge in dem unsichtbaren Teile des Spektrums waren noch nicht ausgeführt worden. Die Gesamtheit aller sichtbaren und unsichtbaren Strahlen wollen wir strahlende Energie nennen. Erinnern wir uns, daß es angenommen ist, die Wellenlänge in folgenden Längeneinheiten auszudrücken: $\mu = 0,001\text{ mm}$, $\mu\mu = 0,001\mu = 10^{-6}\text{ mm}$ und $\text{Å} (\text{Ångström}) = 0,1\mu\mu = 10^{-7}\text{ mm}$; in der letzten Zeit beginnt man sich einer neuen Längeneinheit zu bedienen, welche die seltsame Bezeichnung „X“ erhalten hat; $X = 0,001\text{ Å} = 10^{-10}\text{ mm}$. Das sichtbare Spektrum erstreckt sich von der Wellenlänge $\lambda = 0,76\mu\mu = 7600\text{ Å}$ bis $\lambda = 0,4\mu = 4000\text{ Å}$; seine ganze Länge erreicht nicht einmal eine Oktave. Das ganze Gebiet der Strahlung, welches vor 50 Jahren als bereits entdeckt betrachtet werden konnte, überstieg nicht 2,5 Oktaven. Seitdem hat sich das erforschte Gebiet des Spektrums der Strahlung von dem sichtbaren Teil nach beiden

Seiten außerordentlich ausgedehnt. Der infrarote Teil des Spektrums ist, dank den Arbeiten von Rubens (geb. 1865, gest. 1923 in Berlin), ungefähr bis $\lambda = 340 \mu = 0,34 \text{ mm}$, d. h. bis λ gleich etwa $\frac{1}{3} \text{ mm}$ verfolgt worden. Die ganze Länge dieses Spektrums beträgt 8,5 Oktaven. Der ultraviolette Teil ist untersucht von $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ bis $\lambda = 136 \text{ \AA}$, was etwa 5 Oktaven umfaßt. Die ganze Länge des Spektrums zwischen den äußersten infraroten und ultravioletten Strahlen beträgt heutzutage etwa 14,5 Oktaven, wovon auf den sichtbaren Teil weniger als eine Oktave fällt. Wir haben hier weniger eine neue Entdeckung vor uns, als vielmehr eine enorme Erweiterung des Begriffes einer bereits bekannten Erscheinung. Die Anzahl Oktaven, aus denen das bisher besprochene Spektrum der Strahlung besteht, hat sich seit 1873 mindestens auf das Sechsfache vergrößert. Die Existenz weit (der Wellenlänge nach) vom sichtbaren Spektrum gelegener infraroter und ultravioletter Strahlen ist eine Tatsache, welche experimentell festgestellt ist.

9. Die Hertz'schen Strahlen (H. Hertz, geb. 1857, gest. 1894). Diese großartige Entdeckung (1888, siehe erstes Kapitel) gab uns den Anlaß, die Geburt der neuen Physik an dieses Datum zu knüpfen. An dieser Stelle lassen wir alle theoretischen Betrachtungen beiseite und begnügen uns mit der Beschreibung jenes Teiles der neuen Erscheinung, welcher durch das Experiment zur Tatsache geworden ist.

Allgemein bekannt ist die Erscheinung der elektrischen Entladung, welche zwischen zwei ungleich elektrisierten, d. h. bis zu verschiedenen Potentialen aufgeladenen Leitern entsteht, wenn diese Leiter einander hinreichend genähert sind. Denken wir uns zwei Metallkugeln A und B , welche sich in einiger Entfernung voneinander befinden. Wir verbinden dieselben mittels eines dicken Metalldrahtes und schneiden dann genau aus der Mitte des Drahtes zwischen A und B ein kleines Stück heraus. An die so entstandenen Enden der Drähte befestigen wir zwei kleine Kugeln a und b . Nehmen wir weiter an, daß die Kugel A positiv, die Kugel B negativ geladen sei. Wenn die Kugeln a und b genügend nahe beieinander stehen, so entsteht zwischen den Kugeln A und B eine elektrische Entladung und zwischen den Kugeln a und b wird ein elektrischer Funke überspringen. Schon längst wußte man, daß unter gewissen Bedingungen die elektrische Entladung keine einfache, sozusagen momentane Erscheinung ist, sondern aus einer ganzen Reihe von Teilentladungen besteht, welche abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen vor sich gehen, mit anderen Worten,

die elektrische Entladung ist eine Schwingungserscheinung und wir sprechen von elektrischen Schwingungen. W. Thomson (in der Folge Lord Kelvin) hatte diese Erscheinung theoretisch schon im Jahre 1853 vorhergesagt; W. Feddersen, im Jahre 1859, stellte die Existenz derselben durch das Experiment fest. Rein äußerlich kann man diese Erscheinung folgendermaßen beschreiben: Nehmen wir an, daß die Kugel *A* anfangs positiv geladen war, die Kugel *B* negativ. Nach der ersten Teilentladung erweisen sich beide Kugeln umgeladen, d. h. Kugel *A* negativ, Kugel *B* positiv geladen. Darauf folgt die zweite Teilentladung, und Kugel *A* ist wieder positiv, während Kugel *B* negativ geladen erscheint; nach der dritten Teilentladung ist die Kugel *A* wiederum negativ, Kugel *B* positiv geladen usw. Die Periode (Dauer) der elektrischen Schwingungen ist in erster Linie von der Gestalt und den Abmessungen der Körper, zwischen denen die Entladung erfolgt, abhängig. Je kleiner die Abmessungen der Körper bei gegebener Gestalt sind, um so kleiner ist die Schwingungsdauer, d. h. um so rascher folgen die Schwingungen aufeinander. Die elektrischen Schwingungen sind fast immer stark gedämpft, ihre Zahl bei einer Entladung ist von der Ordnung 10—20. Das bedeutet, daß die aufeinanderfolgenden Ladungen der Kugeln *A* und *B* immer kleiner und kleiner werden, bis schließlich die weiteren Teilentladungen unmöglich werden; mit anderen Worten, es nimmt die Potentialdifferenz der Kugeln *A* und *B* nach jeder Teilentladung ab. Um sich eine Vorstellung von der Schnelligkeit der Schwingungen bei einer elektrischen Entladung machen zu können, wollen wir folgendes Beispiel anführen: Gesetzt, der Durchmesser der gleich großen Kugeln *A* und *B* sei 30 cm, die Länge des ganzen Drahtes 1 m und seine Dicke 5 mm; dann beträgt die Schwingungsdauer etwa ein Dreißigmillionstel einer Sekunde.

Hertz entdeckte nun, daß von der Stelle aus, wo die schwingende elektrische Entladung stattfindet, sich eine besondere Art von Strahlen ausbreitet, welche alle Eigenschaften der sichtbaren, infraroten und ultravioletten Strahlen besitzt. Die Strahlen, welche senkrecht zur Richtung der elektrischen Schwingungen sich ausbreiten, besitzen die größte Intensität; in der Richtung der elektrischen Schwingungen ist die Intensität gleich Null. Diese neuen Strahlen nennt man elektrische oder Hertz'sche Strahlen, sie finden in der drahtlosen Telegraphie und Telephonie ihre großartige Verwendung. Die Geschwindigkeit ihrer Ausbreitung im leeren Raume ist gleich der Geschwindigkeit der Ausbreitung der strahlenden

Energie, z. B. des Lichtes (300000 km in der Sekunde). Sie werden reflektiert, gebrochen, und interferieren nach denselben Gesetzen wie die Lichtstrahlen; sie zeigen die Erscheinung der Beugung, der Polarisation und der doppelten Strahlenbrechung; auch können sie stehende Wellen bilden. Alles Gesagte beweist unzweifelhaft, daß die Hertz'schen Strahlen eine spezielle Art der strahlenden Energie sind. Die Zahl der Schwingungen der Hertz'schen Strahlen in der Sekunde ist gleich der Zahl der elektrischen Schwingungen, welche sie hervorrufen. Hertz benutzte bei seinen ersten Versuchen zwei Kugeln und einen Draht von den oben angeführten Abmessungen; wir haben gesehen, daß sie etwa 30 Millionen elektrischer Schwingungen in der Sekunde geben würden, wenn sie nicht so stark gedämpft wären. Daraus folgt, daß ebenso groß die Schwingungszahl der Strahlen gewesen ist, welche in der ersten Versuchsanordnung von Hertz erregt wurden. Wenn wir die Geschwindigkeit der Ausbreitung dieser Strahlen (300000 km in der Sekunde) durch die Schwingungszahl teilen, so finden wir die Wellenlänge $\lambda = 10$ m. Eine genauere Rechnung zeigt, daß die Wellenlänge 9 m beträgt. Wenn wir nun diese Wellenlänge mit den Wellenlängen der äußersten roten Strahlen vergleichen, so finden wir, daß jene Strahlen, welche Hertz bei seinen ersten Untersuchungen entdeckte, im Spektrum der Strahlung sehr weit von den infraroten Strahlen liegen. Später gelang es Hertz, solche Strahlen zu erhalten, deren Wellenlänge 66 cm betrug. P. Lebedew (in Moskau) war der erste, welcher im Jahre 1895 Strahlen erhielt, deren Wellenlänge bloß 6 mm betrug. Die aller kürzesten Wellen, welche man bisher erhalten hat, besitzen eine Länge von 1,8 mm.

Der Apparat, in welchem elektrische Schwingungen entstehen und der zur Erregung der Hertz'schen Strahlen dient, wird Vibrator genannt. Wenn wir nun die Abmessung dieses Apparates vergrößern, so erhalten wir langsamere elektrische Schwingungen und dementsprechend Strahlen mit größerer Wellenlänge. In dieser Richtung gibt es keine Grenze. Wenn wir einfach mit der Hand eine elektrisch geladene Kugel mit einer Geschwindigkeit von einer Schwingung in der Sekunde hin und her bewegten, so würden wir Strahlen von 300000 km Wellenlänge erhalten; solche Strahlen haben keine wissenschaftliche Bedeutung. Wenn wir uns auf solche Strahlen beschränken, welche in der drahtlosen Telegraphie benutzt werden, so wollen wir als Grenzstrahl jenen Strahl wählen, dessen Wellenlänge 4 km und die Zahl der Schwingungen 75000 in der Sekunde beträgt. Die ganze Länge des Spektrums der

Hertzschen Strahlen von dem von uns willkürlich gewählten Strahl $\lambda = 4$ km bis zum Strahl $\lambda = 2$ mm beträgt $20^{1/2}$ Oktaven. Streng genommen ist dieses Spektrum in der Richtung der großen Wellenlängen unbegrenzt; beschränken wir uns aber auf jenen Teil, der ein praktisches oder rein wissenschaftliches Interesse bietet, so finden wir, daß dieser Teil mehr als zwanzigmal länger ist als das Spektrum der sichtbaren Strahlen. Wenn wir uns das ganze Spektrum der Strahlung so zeichnen, daß die Wellenlängen von links nach rechts abnehmen, so können wir sagen, daß das Spektrum der Hertzschen Strahlen weit links von den infraroten Strahlen gelegen ist.

10. Die Röntgenstrahlen. Stellen wir uns ein mit verdünntem Gase gefülltes Glasrohr oder eine Glaskugel vor, in welcher zwei Metallplatten angebracht sind; von den Metallplatten sind zwei Drähte durch die Glaswand geleitet und mit einer Stromquelle, z. B. einer Ruhmkorff-Spirale verbunden. Unter solchen Bedingungen geht durch das Gas ein elektrischer Strom, wobei zwischen den Platten bei einem nicht sehr hohen Grade der Verdünnung des Gases ein leuchtender Streifen entsteht. Die Metallplatte, durch welche die negative Elektrizität in das Gas eintritt, heißt die Kathode, die andere die Anode. Das Bild ändert sich bei hohem Verdünnungsgrade des Gases: Von der Kathode aus verbreiten sich dann, senkrecht zu ihrer Oberfläche, geradlinige Strahlen, deren Weg schwach leuchtet. Diese Strahlen heißen Kathodenstrahlen; wir kommen später noch auf dieselben zu sprechen. Die Stelle der Glasfläche jedoch, auf welche die Strahlen auffallen, leuchtet recht intensiv und je nach der Sorte des Glases in verschiedener Farbe — gewöhnlich grün. Röntgen (gest. 1923) entdeckte 1895, daß von der leuchtenden Fläche des Glases besondere Strahlen ausgehen, und nannte dieselben X-Strahlen; wir nennen sie Röntgenstrahlen. Erst im Jahre 1912 gelang es, die eigentliche Natur dieser Strahlen zu ergründen. Es erwies sich, daß sie gleichfalls einen Spezialfall der strahlenden Energie bilden; ihr Spektrum liegt weit hinter den ultravioletten Strahlen, d. h. nach rechts von ihnen. Ihre Wellenlänge ist um vieles kürzer, als die der ultravioletten Strahlen; in dieser Hinsicht bilden sie das äußerste Gegenstück zu den Hertzschen Strahlen. Wir können, mit Umgehung einiger neuen Untersuchungen, deren Resultate noch nicht genügend geklärt sind, und unter Benutzung älterer Beobachtungen, sagen, daß das Spektrum der Röntgenstrahlen das Gebiet von $\lambda = 16,7 \text{ \AA}$ bis $\lambda = 0,071 \text{ \AA}$ einnimmt. Zum Vergleiche wollen

wir uns in Erinnerung bringen, daß die Grenze des erforschten Teils der ultravioletten Strahlen jenen Strahlen entspricht, deren Wellenlänge 136 \AA gleich ist. Das Röntgenspektrum nimmt 7 Oktaven ein; seine Mitte liegt in einer Entfernung von 13 Oktaven von der Mitte der sichtbaren Strahlen und sein Ende ($\lambda = 0,071 \text{ \AA}$) fast 15 Oktaven entfernt von den äußersten sichtbaren violetten Strahlen. Die Entfernung von den sichtbaren Strahlen bis zum Anfang der Röntgenstrahlen ($\lambda = 16 \text{ \AA}$) ist annähernd gleich derjenigen, welche zwischen den sichtbaren Strahlen und dem Anfang der Hertzschen Strahlen ($\lambda = 2 \text{ mm}$) besteht. Wenn wir das Spektrum der Hertzschen Strahlen von seiten der großen Wellenlängen willkürlich durch den Strahl abgrenzen, dessen $\lambda = 4 \text{ km}$ ist (siehe oben), so erhalten wir für das ganze Spektrum der Strahlung von $\lambda = 4 \text{ km}$ bis $\lambda = 0,071 \text{ \AA}$ etwa 50 Oktaven. In Wirklichkeit hat das Spektrum in der Richtung der langsamen Schwingungen kein Ende. Das Verhältnis der Wellenlängen $\lambda = 4 \text{ km}$ und $\lambda = 0,071 \text{ \AA}$ ist gleich $4 \cdot 10^{14}$, d. h. fast einer halben Million Milliarden, und ebenso groß ist auch das Verhältnis der Schwingungszahlen 75000 zu $3 \cdot 10^{19}$. Der von uns angenommene äußerste Strahl links hat seine Länge von 4 km, während die Länge des äußersten Strahles rechts ungefähr $\frac{1}{15}$ der linearen Abmessungen eines Atoms gleich ist.

In dem Spektrum der Strahlung bleiben zurzeit zwei unausgefüllte Gebiete. Das eine liegt zwischen den äußersten Grenzen der infraroten Strahlen ($\lambda = 0,34 \text{ mm}$) und dem Anfang des Spektrums der Hertzschen Strahlen ($\lambda = 2 \text{ mm}$); die Länge dieses Gebietes beträgt 2,5 Oktaven. Das andere befindet sich zwischen den äußersten ultravioletten Strahlen und dem Anfang der tatsächlich untersuchten Röntgenstrahlen ($\lambda = 16 \text{ \AA}$); die Länge dieses Intervalles beträgt etwa 3 Oktaven. Übrigens finden wir bereits Andeutungen über das mögliche Auftreten von Strahlen, welche diesem Gebiete angehören, und es unterliegt keinem Zweifel, daß in der nächsten Zeit diese Lücke ausgefüllt wird. Man kann hoffen, daß dasselbe mit der Zeit auch in dem ersten oben erwähnten, bis jetzt noch nicht erforschten Gebiete geschehen wird.

Fassen wir nun alles zusammen, was wir unter Nr. 8, 9 und 10 dargestellt haben. 50 Jahre zurück kannte man: das sichtbare Spektrum, einen Teil des ultravioletten und den Anfang des infraroten. Das ganze untersuchte Spektrum der Strahlung hatte eine Länge von etwa 2,5 Oktaven; das Verhältnis der Wellenlängen der äußersten Strahlen war annähernd gleich 6. Augenblicklich beträgt die Länge des infraroten Spektrums allein 8,5 Oktaven;

die Länge des ultravioletten Spektrums ist fast um das Vierfache gewachsen, außerdem sind die Hertzschen und die Röntgenstrahlen entdeckt worden. Das Spektrum der Strahlung, falls wir deren Anfang vollkommen willkürlich von der Wellenlänge $\lambda = 4$ km an rechnen, hat sich bis auf 50 Oktaven ausgedehnt. Halten wir an der Grenze $\lambda = 4$ km fest, so finden wir, daß das Verhältnis der äußersten Wellenlängen von sechs bis zu einer halben Million Milliarden gestiegen ist. Es hat sich erwiesen, daß das sichtbare Licht einen verschwindend kleinen Teil der in ihrer Mannigfaltigkeit der Formen unbegrenzten Strahlung bildet und deren eigentlichen Charakter uns, wie wir weiter unten sehen werden, die Hertzschen Strahlen erschlossen haben. Alles, was hier dargelegt wurde, gibt uns ein Bild von einer der größten Errungenschaften des letzten Halbjahrhunderts.

11. Die Gesetzmäßigkeiten in den Spektren. Wir haben oben gesehen, daß man bereits von 50 Jahren die Spektre einer großen Anzahl leuchtender Gase und Dämpfe gut kannte. Es gab bereits Tabellen der Wellenlängen der einzelnen Linien dieser Spektre und nicht nur für die sichtbaren, sondern auch für die ultravioletten Strahlen. Das Studium dieser Tabellen hatte aber zu keiner Auffindung von Gesetzmäßigkeit geführt. Augenblicklich bildet die umfangreiche Lehre von den Gesetzmäßigkeiten nicht nur in den Linienspektren, sondern auch in den Bandenspektren einen der wichtigsten und interessantesten Abschnitte der Physik. Die erste Gesetzmäßigkeit fand Balmer im Jahre 1885 im Spektrum des Wasserstoffes und verewigte damit seinen Namen; die Gesamtheit der Wasserstofflinien, deren Gesetzmäßigkeit von ihm entdeckt wurde, bildet jetzt die sogenannte Balmerserie. Diese Gesetzmäßigkeit kann durch die Formel

$$\nu = A \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

ausgedrückt werden.

In dieser Formel bedeutet ν die Schwingungszahl eines bestimmten Strahles, A eine konstante Zahl, $k = 3, 4, 5$ usw., wobei $k = 3$ die Zahl ν für die erste (rote) Linie des Wasserstoffspektrums gibt, $k = 4$ die Schwingungszahl der zweiten (grünen), $k = 5$ der dritten (blauen) usw. Späterhin sind 29 Linien gefunden worden (24 derselben sind im ultravioletten Gebiet des Spektrums gelegen), welche den Werten von $k = 3$ bis $k = 31$ entsprechen. Wenn die Zahl A passend bestimmt wird, so gibt die Balmerische Formel die Zahlen ν für alle 29 Linien mit einer Genauigkeit, die ihres-

gleichen in den übrigen Teilen der Physik nicht besitzt. Dank dieser Entdeckung Balmers und den Arbeiten einer großen Anzahl von Forschern, gelang es in den Spektren vieler Grundstoffe Serien von Spektrallinien aufzufinden, welche offenbar einen gewissen Zusammenhang besitzen, wobei die Größe ν für alle Linien derselben Serie sich durch eine allgemeine Formel von der Gestalt:

$$\nu = C - F(k)$$

ausdrücken läßt, worin C eine für die gegebene Serie konstante Zahl, $F(k)$ einen Ausdruck bedeutet, der die Größe k enthält, welche für die aufeinander folgenden Linien einer Serie gleichfalls aufeinander folgende ganze Zahlenwerte annimmt, angefangen mit den Werten 2, 3, seltener 4 oder 5. In dem Spezialfalle der Wasserstoffserie von Balmer haben wir $C = A : 4$, $F(k) = A : k^2$ und k beginnt mit $k = 3$. Serien, welche durch eine Formel derselben Art wie die Balmersche sich ausdrücken lassen, sind noch im Wasserstoffspektrum (drei weitere Serien, außer der Balmerschen) und im Heliumspektrum (des ionisierten Heliums, vgl. unten) gefunden worden. In den Spektren anderer Grundstoffe ist eine große Anzahl Serien gefunden worden, für welche $F(k)$ einen komplizierteren Bau hat, als in der Balmerschen Formel. Wir brauchen auf irgendwelche weitere Einzelheiten nicht einzugehen, es genügt, zu wiederholen, daß augenblicklich eine umfangreiche und äußerst wichtige Wissenschaft von den Gesetzmäßigkeiten in den Spektren erblüht ist.

Leuchtende Dämpfe chemischer Verbindungen geben gestreifte Spektren (Bandenspektren), wobei an jedem Streifen (Bande) die eine Kante scharf gezeichnet ist, die andere aber undeutlich, verschwommen aussieht. Bei einer genügend starken Dispersion läßt sich eine solche Bande in eine große Zahl feiner Linien auflösen. Zahlreiche Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung dieser Linien, wie auch der Banden selbst, sind zuerst von Deslandres entdeckt worden.

12. Die Satelliten der Spektrallinien. Bis zum Jahre 1892 hielt man die Spektrallinien für monochromatische Linien, d. h. schrieb ihnen eine bestimmte Wellenlänge zu. In diesem Jahre zeigte Michelson als erster, daß einige Spektrallinien einen komplizierten Bau haben, d. h., daß sie aus einer Gruppe von sehr nahe beieinander gelegenen Linien bestehen. Von einer Reihe von Forschern wurde später diese Struktur untersucht, wobei es sich erwies, daß sehr oft eine von den Linien, die Hauptlinie, besonders stark ist, während die übrigen verhältnismäßig schwach sind. Man

nennt diese letzteren Satelliten oder Trabanten. In den Spektren von *Zn*, *Al*, *Mg*, *Ag*, *Sn* und *Ne* hat man keine Satelliten gefunden. Die rote Kadmiumlinie ($\lambda = 6438, 47 \text{ \AA}$) hat gleichfalls keine Satelliten. Viele Linien mit Satelliten fand man bei *Mn* und *Hg*. Die grüne Linie des Quecksilbers ist ganz besonders interessant. Sie besteht nämlich aus 11 oder 12 einzelnen Linien, und zwar kann man nicht sagen, daß sie aus einer Hauptlinie und deren Satelliten bestehe, weil mehrere ihrer Komponenten eine fast gleiche Helligkeit besitzen. Der Abstand der Satelliten voneinander ist sehr klein; der Unterschied der Wellenlängen benachbarter Satelliten beträgt meist nur einige Hundertstel von Ångströmeinheiten. Das Auftreten von Satelliten wurde erst von Sommerfeld 1917 erklärt, worüber wir im weiteren berichten werden.

13. Der absolut schwarze Körper. Das Emissions- und Absorptionsvermögen eines bestimmten Körpers sind Funktionen der absoluten Temperatur T des Körpers und der Wellenlänge λ der Strahlen, auf welche sie sich beziehen; wir bezeichnen sie mit $e(\lambda, T)$ und $a(\lambda, T)$. Wir meinen hier die kalorische Emission und Absorption, welche nur durch den Wärmezustand bedingt werden, zum Unterschiede von der Lumineszenz, zu welcher z. B. die Phosphoreszenz und die Fluoreszenz gehören. Nach dem Gesetz von Kirchhoff haben wir für zwei beliebige Körper die Gleichung:

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \frac{e_1(\lambda, T)}{a_1(\lambda, T)},$$

wo e und a auf den einen, e_1 und a_1 auf den anderen Körper Bezug haben. Absolut schwarz wollen wir einen solchen Körper nennen, welcher bei allen Temperaturen die Strahlung jeder beliebigen Wellenlänge vollständig absorbiert. Führt man für einen solchen Körper anstatt e und a die Bezeichnungen E und A ein, so haben wir, laut Definition, $A(\lambda, T) = 1$ bei allen λ und T . Für zwei absolut schwarze Körper liefert die vorstehende Formel:

$$\frac{E(\lambda, T)}{A(\lambda, T)} = \frac{E_1(\lambda, T)}{A_1(\lambda, T)},$$

oder, da

$$A(\lambda, T) = A_1(\lambda, T) = 1$$

ist,

$$E(\lambda, T) = E_1(\lambda, T). \quad (1)$$

Daraus folgt, daß das kalorische Emissionsvermögen $E(\lambda, T)$ für alle absolut schwarzen Körper dieselbe Funktion von

T und λ ist. Das ist eine gewisse Weltfunktion, welche von der Beschaffenheit (vom Material) des absolut schwarzen Körpers nicht abhängt. Einen solchen Körper darf man sich übrigens durchaus nicht als schwarz im gewöhnlichen Sinne des Wortes vorstellen; er ist wirklich schwarz bei niedrigen Temperaturen; bei hinreichend hohen Temperaturen strahlt er sichtbares Licht aus, und kann weißglühend erscheinen. Nimmt man an, daß der zweite Körper in der Kirchhoffschen Formel ein absolut schwarzer ist, so ist $e_1(\lambda, T) = E(\lambda, T)$ und $a_1(\lambda, T) = A(\lambda, T) = 1$, so daß wir erhalten

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = E(\lambda, T).$$

Das bedeutet, daß das Verhältnis des kalorischen Emissionsvermögens zu dem kalorischen Absorptionsvermögen für alle Körper ein und dieselbe Funktion von T und λ ist, und zwar dieselbe, welche das kalorische Emissionsvermögen des absolut schwarzen Körpers bestimmt. Die Gestalt dieser Weltfunktion wurde theoretisch zuerst von Planck etwa 1900 gefunden. Es entstand die sehr wichtige Aufgabe, den absolut schwarzen Körper praktisch zu verwirklichen. Schon Kirchhoff selbst hatte in wenigen Worten folgende Lösung dieser Aufgabe angedeutet. Stellen wir uns ein Gefäß vor, mit lichtundurchlässigen, z. B. metallischen Wänden, sonst vollkommen geschlossen, aber mit einer kleinen Öffnung in der Wand. Das ganze Gefäß soll eine bestimmte Temperatur T besitzen. Dann kann man beweisen, daß die aus der kleinen Öffnung austretende Strahlung ihrer Zusammensetzung nach identisch mit der von einem absolut schwarzen Körper bei der Temperatur T ausgestrahlten ist. Indem man diese Strahlung spektral zerlegt, kann man die Abhängigkeit der Funktion $E(\lambda, T)$ von λ bei gegebenem T praktisch untersuchen. Läßt man noch die Temperatur T alle Werte von den niedrigsten bis zu den höchsten durchlaufen, so kann man die Werte der Funktion $E(\lambda, T)$ für alle λ und T bestimmen. Einen solchen absolut schwarzen Körper hatten gleichzeitig Christiansen und Boltzmann 1884 verwirklicht, jedoch sozusagen nebenbei und zufällig. Späterhin wurde ein solcher Körper zuerst von Lummer und Wien 1895 konstruiert und die Untersuchung der aus der oben erwähnten kleinen Öffnung austretenden Strahlung begonnen. Von diesen Forschern pflegt man zu sagen, daß sie den absolut schwarzen Körper entdeckt oder erfunden hätten. 1901 gaben Lummer und Kurlbaum eine genaue Beschreibung „des elektrisch geheizten

absolut schwarzen Körpers“. Die beste Ausführungsart eines solchen Körpers ist zylindrisch, doppelwandig, aus feuerfestem Material. Im Zwischenraume zwischen den Wänden befindet sich ein Platinzylinder, welcher durch einen elektrischen Strom auf die Temperatur T erwärmt wird, welche durch ein im inneren Zylinder befindliches Thermoelement gemessen wird. Eine der Grundflächen dieses Zylinders hat eine kleine Öffnung, aus welcher die schwarze Strahlung, deren Spektrum der Weltfunktion $E(\lambda, T)$ bei der gegebenen Temperatur T entspricht, heraustritt. Die Erfindung oder Entdeckung des absolut schwarzen Körpers hat in der Geschichte der Physik eine große Rolle gespielt.

14. Der Strahlungsdruck. Die von Maxwell begründete elektromagnetische Theorie des Lichtes führt zu dem bemerkenswerten Resultate, daß die Oberfläche eines Körpers, auf welchen eine Strahlung auftrifft, einem Drucke ausgesetzt ist, dessen Betrag auf die Flächeneinheit numerisch gleich ist der vollen Energiemenge, welche in der Volumeneinheit enthalten ist, falls die Oberfläche absolut schwarz ist und von der Strahlung senkrecht getroffen wird. Andere Fälle wollen wir beiseite lassen. Auf Grund thermodynamischer Betrachtungen gelangte Bartoli zu demselben Resultat. Interessant ist es, daß bereits Kepler (1619) den Gedanken an den Lichtdruck ausgesprochen hatte; er versuchte sogar auf Grund dieses Druckes die Entstehung der von der Sonne abgewandten Kometenschweife zu erklären. Der erste Forscher, der den Lichtdruck experimentell nachwies, war P. Lebedeff in Moskau. Seine bemerkenswerte Arbeit, die ihm einen Weltruf einbrachte, erschien im Jahre 1892; der Druck erwies sich dem durch die Theorie von Maxwell und Bartoli vorhergesagten gleich. Auch Nichols und Hull führten Messungen des Strahlungsdruckes aus und kamen zu Resultaten, welche mit der Theorie im vollen Einklange standen. Wenn die Strahlen schief auf die Oberfläche des Körpers auffallen, so muß auf diesen Körper eine tangential Kraft, parallel zur Oberfläche, wirken. Poynting gelang es (1904), das Vorhandensein dieser Kraft nachzuweisen und ihre Größe zu messen.

Der lichtausstrahlende Körper muß ebenfalls einem Drucke ausgesetzt sein, welcher der Richtung der abgesandten Strahlen entgegengesetzt ist; dieser Druck ist einem „Rückstoß“ zu vergleichen, wie z. B. bei einem Kanonenschuß. Poynting (1910) hat das Vorhandensein dieses Rückstoßes experimentell nachgewiesen.

Auf Grund dieser Arbeiten tauchte von neuem der von Kepler bereits ausgesprochene Gedanke an die Rolle, welche der Licht-

druck in den kosmischen Erscheinungen spielen könnte, auf, wie z. B. bei der Bildung der Kometenschweife. P. Lebedeff (1892) war der erste, der die abstoßende Wirkung des Lichtdruckes mit der Newtonschen Anziehungskraft verglich und darauf hinwies, daß für genügend kleine Körper die Abstoßung die Anziehung überwiegen könne. Der Grund ist der, daß die Anziehung mit der dritten Potenz, die Abstoßung aber mit dem Quadrat der linearen Abmessungen der Körper abnimmt. Man muß auch in Betracht ziehen, daß die Intensität der Strahlung an der Sonnenoberfläche etwa 46000mal größer ist als in der Entfernung der Erde, während die Newtonsche Anziehungskraft nur 27,5mal die Schwerkraft an der Erdoberfläche übertrifft. Daher kann es kommen, daß in der Nähe der Sonne der Strahlendruck auf kleine Körper die Anziehungskraft überwiegt.

15. Die stehenden Lichtwellen und die Farbenphotographie. Wenn in einem elastischen Medium zwei schwingende Bewegungen gleicher Schwingungszahl und gleicher Amplitude in entgegengesetzten Richtungen sich ausbreiten, so entstehen sogenannte stehende Wellen, in denen Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten abwechseln. In den ersteren ist die Amplitude der Schwingungen am größten, in den letzteren ist sie, unter den angenommenen Bedingungen, gleich Null. Der Abstand der Bäuche sowie auch der Knoten voneinander ist gleich der halben Wellenlänge; der Abstand eines Bauches von dem benachbarten Knotenpunkte gleich einem Viertel der Wellenlänge. Solche stehende Wellen können leicht beobachtet werden bei der Überlagerung zweier in entgegengesetzter Richtung sich ausbreitender Schwingungsbewegungen in festen und gasförmigen Körpern, weniger leicht in flüssigen Körpern. In den festen Körpern entstehen die stehenden Wellen sowohl bei longitudinalen als auch bei transversalen Schwingungen. In den Orgelpfeifen haben wir z. B. stehende Schallwellen.

In der Voraussetzung, daß das Licht eine sich ausbreitende, schwingende Bewegung ist, konnte man erwarten, daß sich auch stehende Lichtwellen bilden könnten. Solches gelang O. Wiener im Jahre 1889, indem er auf eine lichtempfindliche Schicht (Kollodium mit Chlorsilber) die von einer Lichtquelle (Natriumflamme) direkt kommenden und gleichzeitig die von einer Glasplatte senkrecht zurückgeworfenen homogenen Lichtstrahlen einwirken ließ. Die direkten und reflektierten Strahlen bilden stehende Wellen; nach der Entwicklung der lichtempfindlichen Platte werden sie sichtbar, wobei die größte photographische Wirkung in den Bäuchen und

die geringste oder keine in den Knoten erfolgt. Wir wollen uns bei den näheren Einzelheiten dieser historisch wichtigen Entdeckung nicht weiter aufhalten.

Im engen Zusammenhang mit der Arbeit von Wiener steht die von Lippmann 1891 erfundene Farbenphotographie. Ihre Aufgabe ist die Verwirklichung des langgehegten Wunsches, das photographische Bild nicht in grauen und schwarzen Tönen, sondern in den Farben, welche dem Gegenstande eigen sind, zu erhalten. Wir werden die Lippmannsche Methode nicht näher beschreiben; man erzielt damit besonders schöne Resultate beim Photographieren des Spektrums. Ganz besonders reine (homogene) farbige photographische Aufnahmen des Spektrums erhielt Ussagin in Moskau. Übrigens muß man sagen, daß die Lippmannsche Erfindung nicht den an sie gestellten Erwartungen entsprochen hat und der Wunsch, eine praktisch ausführbare, bequeme und den Resultaten nach befriedigende Methode der Farbenphotographie zu verwirklichen, bisher noch unerfüllt bleibt.

§ 5. Neue Tatsachen. Magnetische Erscheinungen.

16. Der Zeemaneffekt. In den letzten 50 Jahren ist die Physik um zwei neue umfangreiche Kapitel bereichert worden, nämlich die Magnetooptik und Elektrooptik. Zwei neue Gruppen von Erscheinungen, beide von großer Bedeutung für die Theorie, werden in diesen Kapiteln behandelt; in allen diesen Erscheinungen haben wir es mit dem Einfluß starker magnetischer und elektrischer Felder auf die Lichterscheinungen zu tun. Bis 1873 kannte man bloß eine derartige Erscheinung, von Faraday im Jahre 1845 entdeckt, nämlich die Drehung der Polarisationssebene des Lichtstrahls, der sich im Innern eines durchsichtigen Körpers längs den Kraftlinien des Magnetfeldes ausbreitet; wir haben diese Erscheinung oben bereits erwähnt. Von der ganzen Reihe magnetooptischer und elektrooptischer Erscheinungen, welche seitdem entdeckt und studiert sind, stellen wir allen voran die im Jahre 1896 vom holländischen Forscher Zeeman entdeckte Erscheinung. In dieser Erscheinung offenbarte sich zum erstenmal der Einfluß des Magnetfeldes (der magnetischen Kräfte) auf die Lichtausstrahlung leuchtender Körper, nämlich der Dämpfe und Gase, welche Linienspektren ergeben. Die Erscheinung besteht in folgendem: Bringen wir einen leuchtenden Dampf oder ein Gas in ein starkes Magnetfeld, z. B. zwischen die Pole eines großen Elektromagneten, und beobachten dann mit Hilfe eines Spektroskops mit großem Auflösungsvermögen

eine von seinen Spektrallinien. Solange kein Strom in der Wicklung des Elektromagneten fließt und folglich auch kein Magnetfeld vorhanden ist, sehen wir eine einzelne, feine Spektrallinie; wir setzen voraus, daß die Satelliten nicht zu sehen sind. Sobald aber der Strom geschlossen und der leuchtende Körper der Wirkung des Magnetfeldes ausgesetzt wird, bemerken wir eine Spaltung der Spektrallinie in mehrere einzelne Linien, wobei der Abstand derselben voneinander mit dem Wachsen der magnetischen Feldstärke zunimmt. Der Zeemaneffekt tritt in verschiedener Form auf, je nachdem, ob wir Strahlen, welche längs den Kraftlinien oder senkrecht zu ihnen ausgesandt werden, beobachten. Im ersten Falle sprechen wir von dem longitudinalen Zeemaneffekte, im zweiten — von einem transversalen. Es hat sich erwiesen, daß der Zeemaneffekt für verschiedene Linien und verschiedene leuchtende Stoffe verschieden ist. Man unterscheidet eine normale und eine anomale Form dieser Erscheinung. Die erste Form der Erscheinung besteht in folgendem: Wenn man die Beobachtung senkrecht zu den Magnetkraftlinien anstellt, so findet man, daß die Spektrallinie in drei Linien gespalten erscheint, von denen die mittlere die Stelle der anfangs bestandenen Linie einnimmt, die beiden anderen aber auf beiden Seiten in gleicher Entfernung von der Mittellinie liegen. Diese Linien bilden das sogenannte normale Triplet, und wir haben den normalen transversalen Zeemaneffekt vor uns. Ferner erweist es sich, daß alle drei Linien vollkommen linear polarisiert sind; die Schwingungen in der Mittellinie gehen parallel den Kraftlinien, in den beiden Seitenlinien dagegen senkrecht zu den letzteren vor sich. Die beiden Seitenlinien sind um das Doppelte schwächer als die Mittellinie. Beobachtet man dagegen die Strahlen, welche in der Richtung der Magnetkraftlinien ausgesandt werden, so zerfällt die Spektrallinie in zwei Linien, welche in gleichen Abständen zu beiden Seiten von dem ursprünglichen Orte der Spektrallinie liegen. Dieses ist das normale Dublet des longitudinalen Zeemaneffekts. Beide Strahlen sind vollkommen polarisiert, aber die Polarisation ist eine zirkulare, dabei geht die Drehung in dem einen Strahle in der Richtung des Uhrzeigers, in dem anderen in entgegengesetzter Richtung vor sich. Beide Linien haben gleiche Intensität. Man kann diese Erscheinung, welche bei der Ausstrahlung beobachtet wird, als direkten Zeemaneffekt bezeichnen, zum Unterschiede vom umgekehrten (inversen) Effekt, welcher bei der Absorption der Strahlung in einen im Magnetfelde befind-

lichen Körper beobachtet wird. Wenn man zwischen die Pole eines Elektromagneten einen schwach leuchtenden Dampf einbringt und durch denselben weiße Strahlen einer starken Lichtquelle durchgehen läßt, so beobachtet man beim Fehlen des Magnetfeldes die bekannte Erscheinung der Umkehrung des Spektrums: Auf dem Grunde des kontinuierlichen Spektrums der weißen Strahlen erscheinen, gemäß dem Kirchhoffschen Gesetze, dunkle Linien. Bei der Erregung des Magnetfeldes beobachtet man eine Spaltung der dunklen Linien, welche der Zerlegung der hellen Emissionslinien desselben Dampfes genau entspricht.

Wir haben oben den „normalen“ Zeeman-Effekt beschrieben. Weitere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß der Zeeman-effekt für die große Mehrzahl der Spektrallinien viel verwickelter aussieht. Beschränken wir uns auf den Transversaleffekt. Man hat gefunden, daß anstatt dreier Linien 4, 6, 7, 9, 13 und sogar 15 Linien entstehen können; überdies kann auch das Triplet anomal auseinandergerückt sein. Die Linie D_1 von Natrium gibt ein Quadruplet, die Linie D_2 ein Sextett. Augenblicklich bildet die Lehre von dem Zeemaneffekt ein umfangreiches Kapitel der Physik, selbst wenn man sich auf die Tatsachen, d. h. auf die Beschreibung der unmittelbar beobachteten Erscheinungen, beschränkt. Verschiedene Gesetzmäßigkeiten sind entdeckt worden; wir wollen bloß das Prestonsche Gesetz anführen: Der Spaltungstypus der Linie, die Polarisation und die relative Stärke der einzelnen Komponenten sind für alle Linien derselben Serie gleich, unabhängig von dem Grundstoffe, dem diese Serie angehört. Der Einfluß des Magnetfeldes auf die Satelliten der Spektrallinien ist gleichfalls genau studiert. Weiter wollen wir in die Einzelheiten nicht eingehen, denn unseren Zwecken genügt vollkommen der Hinweis auf die experimentell bewiesene Tatsache des Einflusses des Magnetfeldes auf die Emission und Absorption der Strahlung. Der amerikanische Astronom Hale fand im Jahre 1908 die Spaltung der Spektrallinien von Strahlen, welche aus jenen Stellen der Sonnenoberfläche ausgehen, wo Wirbelbewegungen stattfinden; auf diese Weise ist das Vorhandensein starker Magnetfelder auf der Sonne bewiesen worden.

17. Andere magnetische Erscheinungen. Außer der Faradayschen Erscheinung und dem Zeemaneffekt ist noch eine Reihe anderer magnetooptischer Erscheinungen entdeckt worden. Wir wollen sie kurz aufzählen.

I. Der Kerreffekt. Der amerikanische Forscher Kerr entdeckte 1877 folgende Erscheinung, welche sich auf die Reflexion

eines polarisierten Lichtstrahles von einer polierten Oberfläche magnetisierten Eisens oder eines anderen ferromagnetischen Stoffes bezieht.

Wir erinnern an die Tatsache, daß, falls ein linear polarisierter Strahl auf eine Metallfläche auffällt, der reflektierte Strahl im allgemeinen elliptisch polarisiert wird, d. h. gleichsam als ob er aus zwei linear polarisierten Strahlen bestehe, wobei die Polarisations Ebenen zueinander senkrecht und die Schwingungsamplituden und Phasen verschieden sind. Der Kerreffekt offenbart sich unter verschiedenen Verhältnissen, sowohl was die Magnetisierung des Eisens als auch die Richtung der auffallenden Strahlen betrifft. Wir wollen bloß auf den Hauptfall hinweisen, den der sogenannten polaren Magnetisierung, in welchem die Magnetkraftlinien aus dem Eisenspiegel senkrecht zu dessen Oberfläche austreten. Wenn der polarisierte Strahl senkrecht oder fast senkrecht auf eine derartige Fläche auffällt, so erscheint die Polarisations Ebene des reflektierten Strahles gegen den auffallenden Strahl gedreht. Die Drehung wird positiv genannt, wenn sie in der Richtung des elektrischen Stromes, welcher das Eisen magnetisiert (oder der Ampèreschen Ströme im Eisen) erfolgt, und negativ, wenn die Drehung in entgegengesetzter Richtung geschieht. Die Drehung ist negativ in den Spiegeln aus Eisen, Stahl, Kobalt, Nickel, Invar ($\text{Fe} + 36\% \text{Ni}$), Heußlerscher Legierung (siehe unten) und für Fe_3C ; sie ist positiv im Magnetit (Fe_3O_4) und Pyrrhotit (Fe_7O_8). Genauere Untersuchungen haben gezeigt, daß der reflektierte Strahl nicht vollkommen linear, sondern in einer sehr langgestreckten Ellipse polarisiert ist. Wenn der linear polarisierte Strahl auf den Metallspiegel unter einem Winkel auffällt, so ist der reflektierte Strahl, im allgemeinen, elliptisch polarisiert. Die Größe der Drehung hängt bei der gegebenen Intensität der Magnetisierung des Spiegels von der Wellenlänge des auffallenden Strahles ab; es kommen Fälle vor, daß die Drehung bei Änderung der Wellenlänge das Zeichen ändert und durch Null geht. Die Einwirkung des Magnetspiegels auf den polarisierten Strahl findet auch in dem Falle statt, daß die Magnetisierung parallel der Spiegelfläche verläuft. Weiter wollen wir in die Einzelheiten nicht eingehen; uns genügt, auf die wichtige Tatsache hingewiesen zu haben, daß magnetisierte Stoffe auf den Lichtstrahl, der von ihrer Oberfläche reflektiert wird, einwirken.

II. Die von Macaluso und Corbino entdeckte Erscheinung. Diese Forscher entdeckten im Jahre 1898 den Einfluß des Magnetfeldes auf einen Strahl, der sich in einem Körper mit

Absorptionslinien oder Banden ausbreitet. Wir haben es hier mit einer besonderen Einwirkung des Feldes zu tun, welche die Faradaysche Erscheinung als Spezialfall umfaßt. In der Erscheinung von Macaluso und Corbino beobachten wir eine sehr starke Drehung der polarisierten Strahlen, deren Wellenlänge nahe gleich ist der Wellenlänge der von dem Medium absorbierten Strahlen. Wenn dieses Medium eine Flamme ist, welche Natriumdampf enthält, (die Faradaysche Erscheinung ist in diesem Falle kaum sichtbar) und diese Flamme in ein Magnetfeld gebracht wird, so werden die polarisierten Strahlen, welche durch die Flamme in der Richtung der Kraftlinien gehen, um sehr große Winkel gedreht, wenn ihre Wellenlänge denen der Strahlen D_1 und D_2 nahe kommen. Macaluso und Corbino haben in der Nähe der Absorptionslinie eine Drehung bis 27° beobachtet. Wood erzielte in einer 10 cm dicken Schicht Natriumdampf eine Drehung um 1350° .

III. Die doppelte Strahlenbrechung im Magnetfelde. Betrachten wir wiederum ein Medium, welches Absorptionslinien oder Banden besitzt und in ein Magnetfeld gebracht ist. Wenn ein Strahl, dessen Wellenlänge der eines absorbierten Strahles nahe kommt, durch dieses Medium geht, so beobachtet man eine Doppelbrechung. Diese Erscheinung wurde zuerst von Voigt 1892 und später auch von einer Reihe anderer Forscher beobachtet. Majorana 1902 und besonders Cotton und Mouton 1910 haben die doppelte Strahlenbrechung in Flüssigkeiten im Magnetfelde beobachtet; Majorana in einigen Präparaten von Eisenhydroxyd, Cotton und Mouton in verschiedenen organischen Flüssigkeiten und im Schwefelkohlenstoff. In diesen letztgenannten Fällen ist die Doppelbrechung nicht an die Absorption des Lichtes gebunden.

18. Der Halleffekt und ähnliche Erscheinungen; galvanomagnetische und thermomagnetische Erscheinungen. Die Übersicht dieser Erscheinungen entnehme ich dem Aufsatz von K. Baumgardt, aus dem letzten Bande meines „Lehrbuchs der Physik“ (Kap. XIII, § 9). Alle hierher gehörigen Erscheinungen bestehen im Auftreten einer Potentialdifferenz (elektrischer Effekt) oder einer Temperaturdifferenz (thermischer Effekt) unter folgenden Bedingungen: Ein stromdurchflossener Leiter (Platte) wird in ein magnetisches Feld gebracht. Unter solchen Umständen können zwei elektrische (eine Längs- und eine Querdifferenz des Potentials) und zwei Wärmeerscheinungen (eine Längs- und eine Querdifferenz der Temperaturen) entstehen. Diese vier Erscheinungen werden

galvanomagnetische benannt. Wenn in dem Leiter nicht ein elektrischer, sondern ein Wärmestrom fließt (zwei Ränder der Platte werden bei verschiedenen Temperaturen gehalten), so können gleichfalls vier Erscheinungen beobachtet werden, nämlich: zwei elektrische und zwei thermische Erscheinungen; sie heißen dann thermomagnetische Erscheinungen. Alle Querscheinungen gehen senkrecht, sowohl zur Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes als auch zur Richtung des primären, elektrischen oder Wärmestromes, vor sich. Sie ändern ihr Vorzeichen sowohl beim Stromwechsel als auch beim Wechsel der Richtung des Magnetfeldes. Alle Längerscheinungen gehen in der Richtung des betreffenden Stromes vor sich und ändern ihr Vorzeichen nicht, wenn die Richtung des Magnetfeldes umgekehrt wird. In bezug auf die Lagerung der Platte im Magnetfelde kann man drei Fälle unterscheiden:

I. Die Kraftlinien des Magnetfeldes stehen senkrecht zur Ebene der Platte. Diese Anordnung wurde am häufigsten angewandt. Dabei beobachtet man sowohl Quer- als auch Längerscheinungen.

II. Die Kraftlinien des Magnetfeldes stehen senkrecht zur Stromrichtung, jedoch parallel der Plattenebene. Die Querscheinungen gehen dann in querer Richtung zur Platte, d. h. zwischen den Punkten, welche an den zwei Seitenflächen der Platte liegen, vor sich. Die Längerscheinungen gehen ebenso wie im ersten Falle längs der Plattenebene in der Stromrichtung vor sich. In dem Falle, wenn die Platte aus einem stark magnetischen Stoffe besteht, macht sich ein Unterschied zwischen den Lagen I und II bemerkbar.

III. Die Kraftlinien des Magnetfeldes stehen parallel zum primären Strome und zur Ebene der Platte. In diesem Falle sind nur Längerscheinungen möglich.

Die erste dieser acht beobachteten Erscheinungen wurde von Hall im Jahre 1879 entdeckt und trägt seinen Namen. Sie ist eine Querscheinung, galvanomagnetisch und elektrisch, und wird folgendermaßen beobachtet. Eine rechteckige Platte wird ins Magnetfeld in der Lage I gebracht. Man verbinde die Mittelpunkte der kurzen Ränder der Platte mit der Stromquelle; dann suche man sich, ungefähr in der Mitte der beiden langen Ränder der Platte, zwei Punkte aus, die ohne Magnetfeld gleiches Potential haben; verbindet man sie leitend mit einem Galvanometer, so erhält man in demselben keine Ablenkung. Wird nun das Magnetfeld erregt, so erscheint im Galvanometer ein Strom. Im Jahre 1886 entdeckten

W. Nernst und v. Ettingshausen im Wärmestrome eine der Hall'schen entsprechende Erscheinung, d. h. eine thermomagnetische elektrische Quererscheinung. Es tritt eine Potentialdifferenz in quere Richtung zum primären Wärmestrom und zu den Kraftlinien des Magnetfeldes auf. Darauf entdeckte v. Ettingshausen im Jahre 1887 eine galvanomagnetische thermische Quererscheinung, d. h. das Auftreten einer Querdifferenz der Temperaturen in der Hall'schen Versuchsordnung; die zum Galvanometer führenden Leitungsdrähte wurden durch zwei empfindliche Thermolemente ersetzt, welche die Entstehung der Temperaturdifferenz anzeigten. In demselben Jahre entdeckten Leduc und Righi, unabhängig voneinander, die thermomagnetische, thermische Quererscheinung; sie zeigten das Auftreten einer Querdifferenz der Temperaturen in dem Falle, wenn durch die im Magnetfelde aufgestellte Platte nicht ein elektrischer (Ettingshausen), sondern ein Wärmestrom fließt.

Bei den vier Längserscheinungen wollen wir uns nicht weiter aufhalten; die vier angeführten Erscheinungen genügen vollkommen, die experimentell festgestellte Tatsache einer neuen Wirkung des Magnetfeldes zu erläutern.

19. Die magnetischen Legierungen von nichtmagnetischen Metallen. Der deutsche Ingenieur Heusler entdeckte im Jahre 1900 die äußerst seltsame Tatsache, daß eine nicht magnetische Legierung aus 30% *Mn* und 70% *Cu* magnetische Eigenschaften erlangt, sobald man derselben eines der Metalle *Al*, *Sn*, *Sb*, *Bi* (diamagnetisch!), oder auch *As* und *B* zusetzt; während ein Zusatz von 1,2% *Fe* magnetische Eigenschaften nicht hervorruft. Die am stärksten ferromagnetischen Legierungen erhält man, wenn man Aluminium zusetzt, d. h. eine Legierung aus *Mn*, *Cu* und *Al* bildet, wobei als bestes Mischungsverhältnis ein solches sich erweist, welches der Verbindung *MnAl* entspricht, d. h. wenn von Mangan ungefähr das Doppelte des Gewichts wie von Aluminium zugesetzt wird. Eine geringe Menge Blei der Legierung zugefügt, verstärkt noch mehr die magnetischen Eigenschaften derselben. Besonders auffallend erscheint in diesem Falle der große Einfluß solcher absolut unmagnetischer Metalle wie Aluminium und Blei.

§ 6. Neue Tatsachen. Elektrische Erscheinungen.

20. Das Elektron und sein Magnetfeld. Wir haben beim Aufzählen der besonders wichtigen unter den Tausenden und Zehntausenden neuer Tatsachen, welche experimentell nachgewiesen sind und unsere „offene Bühne“ bereichert haben, unter Nr. 1 auf die Atome und Moleküle hingewiesen, deren Existenz im Laufe

langer Jahre eine Hypothese bildete, so daß die Atome und Moleküle selbst in dem Gebiete „hinter den Kulissen“ sich befanden. In der neuen Physik jedoch hat diese Hypothese aufgehört, Hypothese zu sein, und die Existenz der Atome und Moleküle ist zur unumstößlichen Tatsache geworden. Etwas vollkommen Ähnliches kann jetzt von den Elektronen gesagt werden, doch, entsprechend dem rascheren Tempo der Entwicklung der Physik, vollzog sich der Übergang aus dem Gebiete hinter den Kulissen auf die offene Bühne um vieles rascher. Die Elektronentheorie entstand verhältnismäßig vor nicht langer Zeit, etwa um das Jahr 1900; sie war begründet auf der Hypothese, daß die negative Elektrizität einen „atomartigen“ Bau hat, d. h. aus kleinsten Teilchen besteht, welche man Elektronen nannte. Augenblicklich, nach den Versuchen von A. Joffé und anderer Forscher, muß die Existenz der Elektronen als erwiesen betrachtet werden, und wir verlegen dieselben aus dem Gebiete der Hypothesen auf die offene Bühne der Tatsachen. Die negative elektrische Ladung ist nichts anderes als eine Ansammlung von Elektronen. Der elektrische Strom in Leitern ist ein Strom von Elektronen. Die Größe der Ladung und die Masse des Elektrons sind augenblicklich mit großer Genauigkeit bekannt. Wir kommen noch auf diese Fragen zurück.

Wir wissen, daß in der Umgebung eines stromführenden Leiters ein Magnetfeld entsteht. Daraus ziehen wir den Schluß, daß das in Bewegung begriffene Elektron in seiner Umgebung gleichfalls ein magnetisches Feld hervorruft. Wenn dieser Schluß richtig ist, dann muß auch bei der einfachen, mechanischen Fortbewegung einer Ladung ein Magnetfeld entstehen. Wir bemerken, daß eine mechanisch fortbewegte Ladung einen sogenannten Konvektionsstrom vorstellt, so genannt zum Unterschiede vom gewöhnlichen Leitungsstrom. Die Richtigkeit der obigen Folgerung wurde zuerst vom amerikanischen Forscher Rowland im Jahre 1876 im Helmholtzschen Laboratorium und späterhin von mehreren anderen Forschern bewiesen. Die Konvektionsströme können auch in Nichtleitern entstehen; sie wurden von Röntgen entdeckt und erschöpfend von A. Eichenwald (in Moskau 1901 und 1903—1904) untersucht. Als wir die Röntgenstrahlen besprachen, erwähnten wir die Kathodenstrahlen und bezeichneten sie als Ströme negativer Elektrizität. An dieser Stelle können wir uns genauer ausdrücken, indem wir sagen, daß es Ströme von rasch bewegten Elektronen sind. Aus diesem Grunde müssen Kathodenstrahlen in dem sie umgebenden Raume ein Magnetfeld hervorrufen. A. Joffé gelang

es, sowohl das Vorhandensein dieses Feldes zu beweisen als auch dessen Größe zu messen.

21. Elektrooptische Erscheinungen. Bei der Beschreibung der unter Nr. 17 angeführten magnetooptischen Erscheinungen war eine Doppelbrechung im Magnetfelde, welche an die Gegenwart von Linien und Banden im Absorptionsspektrum des gegebenen Stoffes nicht gebunden ist, erwähnt worden; diese Erscheinung wurde 1910 entdeckt. Bedeutend früher (1875) entdeckte Kerr, daß Glas in einem starken elektrischen Felde anisotrop wird und die Erscheinung der doppelten Strahlenbrechung zeigt. Im Jahre 1880 veröffentlichte Kerr die Resultate ähnlicher Beobachtungen an einer großen Zahl von Flüssigkeiten, welche gleichfalls doppelbrechend werden, sobald sie sich in einem elektrischen Felde befinden. Aus Gründen der Symmetrie ist es klar, daß die Strahlen die Flüssigkeit nicht parallel, sondern am vorteilhaftesten senkrecht zu den Kraftlinien des elektrischen Feldes durchsetzen müssen. Viele Forscher untersuchten diesen elektrooptischen Kerreffekt, wie man ihn, zum Unterschiede von der früher beschriebenen magnetischen Erscheinung bei der Reflexion der Strahlen von Magneten nennt; unter anderem wurde diese Erscheinung auch bei einigen Gasen und Dämpfen, so z. B. an CO_2 , NH_3 , HCN , CH_3Cl , CH_3Br , C_2H_5Cl und anderen beobachtet.

22. Erscheinungen, welche beim Durchgang der Elektrizität durch Gase beobachtet werden. Auch hier werden wir unter einer Nummer eine enorme Anzahl von Erscheinungen, welche in den letzten 50 Jahren entdeckt und allseitig untersucht worden sind, zusammenfassen. Eine einigermaßen vollständige Beschreibung dieser Erscheinungen erfordert dicke Bände. Wir wollen zunächst zwei Erscheinungen hervorheben:

I. Kathodenstrahlen, deren Entstehung bereits unter Nr. 10 (Röntgenstrahlen) beschrieben wurde; Hittorf hatte dieselben bereits im Jahre 1869 bemerkt; von Crookes sind sie im Jahre 1879 näher erforscht worden. Oben haben wir bereits auseinandergesetzt, daß die Kathodenstrahlen Ströme von Elektronen vorstellen.

II. Kanalstrahlen, 1876 von Goldstein entdeckt. Wenn man in der Kathodenplatte der unter Nr. 10 beschriebenen Röhre eine Reihe kleiner Öffnungen (Kanäle) anbringt, so entsteht in dem Raume hinter der Kathode ein schwaches, in der Luft gelbliches, im Wasserstoff rosa Leuchten, hervorgerufen durch Strahlen, die aus den Öffnungen oder Kanälen der Kathodenplatte austreten. Wir haben gesehen (siehe Nr. 20), daß die Kathodenstrahlen Ströme

von Elektronen sind. Nähere Untersuchungen haben ergeben, daß die Kanalstrahlen aus materiellen Teilchen, d. h. Atomen und Molekülen, bestehen; der Strom dieser Teilchen, als Ganzes, trägt eine positive Ladung mit sich. Eine genaue Untersuchung hat jedoch ergeben, daß die einzelnen Teilchen, aus denen die Kanalstrahlen bestehen, sehr verschiedenartig elektrisch geladen sind; einige unter ihnen tragen eine positive Ladung, welche der Größe, nach der negativen Ladung eines Elektrons gleich ist, andere haben eine zweimal größere Ladung positiver Elektrizität; ferner befinden sich in dem Strome neutrale Teilchen, die überhaupt keine Ladung tragen; endlich trifft man auch solche Teilchen, freilich in der Minderzahl, welche negativ elektrisch geladen sind. Die Kanalstrahlen entstehen in dem Raume, der an der vorderen Seite der Kathode liegt; hier bestehen sie aus materiellen Teilchen von der ersten oben aufgezählten Art, d. h. alle sind sie anfangs positiv elektrisch geladen; sie werden von der negativ geladenen Kathode angezogen, wobei diejenigen, welche durch die Kanäle hinter die Kathode gelangen, die Kanalstrahlen bilden. Auf ihrem Wege erfahren die Teilchen mehrmalige Umladungen, wobei die anderen oben aufgezählten Arten der Teilchen entstehen.

III. Die Ionisation der Gase. Oben wurde bereits erwähnt, daß wir in unserer Darstellung unter einer Nummer die Gesamtheit einer ungeheuren Anzahl neuer Tatsachen, welche in den letzten 50 Jahren entdeckt und untersucht worden sind, zusammenfassen. Dieses gilt ganz besonders für das weit ausgedehnte Gebiet der Erscheinungen, welche wir unter der gemeinsamen Bezeichnung der Ionisation der Gase vereinigen. Wir haben bei der Aufzählung der wichtigsten neuen Tatsachen jegliche Andeutung an die entsprechenden Abschnitte der theoretischen Physik, welche auf irgendwelchen Hypothesen aufgebaut sind, sorgfältig vermieden. In der Lehre von der Ionisation der Gase jedoch haben wir es mit einer sozusagen bereits überwundenen Hypothese zu tun, welche aufgehört hat, Hypothese zu sein und aus dem Gebiet hinter den Kulissen in das der unumstößlichen Tatsachen übergegangen ist. Und über diese Tatsache, welche eine der wichtigsten Errungenschaften der heutigen Physik vorstellt, wollen wir schon hier einige Worte sagen. Wir bezeichnen mit dem Ausdruck *neutral* ein solches Atom oder ein solches Molekül, welches uns elektrisch nicht geladen erscheint; von einem solchen Teilchen gehen keine elektrischen Kräfte aus. Man könnte denken, daß ein solches Atom oder Molekül überhaupt keine Elektrizität enthält; das wäre jedoch nicht richtig. Die Wissen-

schaft hat als unumstößliche Tatsache festgestellt, daß die Atome und Moleküle sowohl negative als auch positive Elektrizität enthalten. Wie sich letztere im Atom oder im Molekül gruppieren, und welche Rolle diese Ladungen spielen, gehört in die Theorie, und hier beginnt das Gebiet der Hypothese. Im neutralen Atom oder Molekül sind beide Ladungen gleich groß. Als Tatsache ist festgestellt, daß von einem Atom oder Molekül ein oder mehrere Elektronen abgetrennt werden können, wonach der Rest als positiv geladen erscheint. Es sind auch solche Fälle möglich, in denen ein Atom oder ein Molekül sich ein oder mehrere Elektronen aneignet und dadurch negativ geladen wird. Sobald die Gasteilchen aufhören, neutral zu sein, sprechen wir von einer Ionisation des Gases. Gewöhnlich hat man den Fall einer Abtrennung von Elektronen im Auge. Wir sagen, daß das Gasteilchen bei der Ionisation in zwei Teile zerfällt, welche Ionen heißen. Das eine von ihnen, das negative, ist das freie Elektron, das andere, das positive, ist das Gasteilchen, welches ein Elektron verloren hat und scheinbar eine positive Ladung erworben hat, welche der Ladung eines Elektrons gleich ist. Ein Gas, dessen sämtliche Teilchen neutral sind, ist nicht imstande, den elektrischen Strom zu leiten; es ist ein idealer Nichtleiter. Die Ionisation des Gases verwandelt ihn in einen Leiter. Als Erreger der Ionisation nennen wir: chemische Prozesse, besonders die Verbrennung, Kathodenstrahlen, Röntgenstrahlen, ultraviolette Strahlen, den elektrischen Funken, glühende Körper (siehe unten unter Nr. 23), hohe Gastemperaturen, einen starken Stoß auf die neutralen Teilchen von seiten eines sich rasch bewegendes Elektrons, Strahlen, welche von radioaktiven Stoffen ausgehen (siehe unten Nr. 27) und andere. Zu den letztgenannten gehören die α -Strahlen, die ja Ströme der erwähnten α -Teilchen sind; diese Teilchen sind doppelt ionisierte Heliumatome, von denen jedes zwei Elektronen verloren hat. Aus der Menge der Fragen, welche einer vielseitigen Untersuchung unterzogen wurden, wollen wir bloß folgende erwähnen: Die Beweglichkeit der Ionen, die Entstehung neuer Ionen im elektrischen Felde, die Bildung neutraler Teilchen infolge der Wiedervereinigung der Ionen, der Niederschlag von Dämpfen auf den Ionen; die Entstehung der Ionenansammlungen (Aggregate), das Aussehen einer Gassäule, durch die der elektrische Strom geht, die Potentialverteilung längs einer solchen Säule. Ein ganz besonderes Interesse erweckt die Frage über die Ionisation durch Stöße; es handelt sich hierbei um die Geschwindigkeit, welche das Elektron haben muß, um beim Stoß

auf ein neutrales Teilchen (Atom oder Molekül) dessen Ionisation hervorzurufen. Diese äußerst wichtige Frage hat besonders in den letzten Jahren eine reiche Literatur gezeitigt.

23. Die Emission von Elektronen durch glühende Körper. Diese bemerkenswerte Tatsache ist von vielen Forschern untersucht worden. In einigen Fällen scheiden glühende Körper materielle Teilchen aus, welche positiv geladen sind, d. h. von denen jedes ein Elektron verloren hat.

24. Die photoelektrischen Erscheinungen. Das Wesen dieser wichtigen Erscheinungsgruppe besteht darin, daß viele Körper Ströme von Elektronen aussenden, sobald auf ihre Oberfläche sichtbare oder ultraviolette oder Röntgenstrahlen fallen. Im Jahre 1887 bemerkte H. Hertz, daß das ultraviolette Licht eines elektrischen Funkens die Entladung in einer benachbarten Funkenstrecke erleichtert, wenn die negative Elektrode bestrahlt wird. Im Jahre 1888 entdeckte Hallwachs, daß unter dem Einfluß des Lichtes negative Elektrizität von den Körpern abgegeben wird. Wenn der Körper bereits negativ geladen ist, rufen die Strahlen, welche auf seine Oberfläche fallen, eine Zerstreuung der Ladung in das umgebende Gas hervor; die positive Ladung unterliegt keiner Zerstreuung. A. Stoletoff (in Moskau) und viele andere Forscher haben diese Erscheinungen genau untersucht; man nennt sie photoelektrische. Lenard hat gezeigt, daß diese Erscheinung auch im leeren Raume vor sich geht. Elster und Geitel machten die Entdeckung, daß Alkalimetalle, namentlich Kalium, Natrium und Rubidium, sich sehr empfindlich auch sichtbaren Strahlen gegenüber verhalten. Aus der großen Zahl der diesbezüglichen Gesetzmäßigkeiten wollen wir bloß eine erwähnen: Die Geschwindigkeit, mit welcher die Elektronen aus dem gegebenen Körper herausfliegen, hängt nicht von der Intensität des auffallenden Lichtstroms ab. Diese Geschwindigkeit ist nur von der Wellenlänge der auffallenden Strahlen abhängig. Die Geschwindigkeit der Elektronen wächst mit der Verkürzung der Wellenlänge, d. h. mit der Zunahme der Schwingungszahl. Von großer Wichtigkeit ist der Umstand, daß ein selektiver Effekt vorhanden ist: Für eine bestimmte Wellenlänge findet ein plötzliches Anwachsen des Effekts statt. Photoelektrische Erscheinungen werden nicht nur an Metallen beobachtet sondern auch an Nichtleitern.

25. Der supraleitende Zustand. Unter Nr. 6 wurde erwähnt, daß Kamerlingh-Onnes in Leyden eine Temperatur er-

zielte, welche vom absoluten Nullpunkte (-273°C) nicht mehr als um einen Grad entfernt ist. Diese niedrigen Temperaturen haben ihre eigene Physik. Die Eigenschaften der Körper, die qualitativen und quantitativen Züge der physikalischen Erscheinungen können sich wesentlich von den unter weniger niedrigen Temperaturen beobachteten Erscheinungen unterscheiden. Wir haben bereits darauf hingewiesen, daß die spezifische Wärme der Körper rasch abnimmt und in manchen Fällen praktisch verschwindet. Wir könnten noch erwähnen, daß der Wärmeausdehnungskoeffizient für viele Stoffe in ähnlicher Weise abnimmt. Die auffallendste von den hierher gehörenden Tatsachen entdeckte aber Kamerlingh-Onnes (1911): Der elektrische Widerstand einiger Leiter wird praktisch gleich Null bei der Temperatur des flüssigen Heliums (gegen 4° der abs. Temperatur). Einen solchen Leiter nennt man einen Supraleiter.

Wir sind an den Gedanken gewöhnt, daß der elektrische Strom in einer geschlossenen Leitung beständig von einer in dem Leiterkreise wirkenden elektromotorischen Kraft unterhalten werden muß; mit dem Verschwinden der letzteren verschwindet auch momentan der Strom, weil die Energie der in Bewegung begriffenen Elektronen, die den Widerstand des Leiters zu überwinden haben, sofort in Wärmeenergie übergeht. Wenn wir aber einen geschlossenen Leitungsdraht bis auf 4° abs. (-269°C) abkühlen, so fließt der in ihm erzeugte und unter gewöhnlichen Umständen kurz dauernde Induktionsstrom ununterbrochen längere Zeit (eine volle Stunde und länger), ohne daß in dem Leiter eine elektromotorische Kraft wirksam wäre. Die Elektronen setzen ihren Lauf nach dem Trägheitsgesetz fort, weil sie auf ihrem Wege keinen Widerstand finden.

26. Der Starkeffekt. Unter Nr. 16 lernten wir den Zeemaneffekt kennen. Er bestand in einer Einwirkung des Magnetfeldes auf die Lichtemission der Gase und Dämpfe, welche sich in der Spaltung der Spektrallinien in zwei, drei und mehr einzelne Linien äußert. Im Jahre 1913 entdeckte der deutsche Forscher Stark, daß das elektrische Feld die Fähigkeit besitzt, auf die Lichtemission der Gase und Dämpfe einzuwirken und gleichfalls eine Spaltung der Spektrallinien hervorzurufen. Fast zur selben Zeit beobachtete diesen Effekt der italienische Forscher Lo Surdo, jedoch in weniger vollständiger Form. Auch dieser Entdeckung ist eine ausgedehnte Literatur gewidmet. Wir wollen hier bloß die Tatsache hervorheben, daß in den Linien einer

Spektralserie beim Übergang zu Strahlen kürzerer Wellenlänge sowohl die Zahl der Linien (Komponenten) als auch die Größe der Spaltung zunimmt. Letztere kann bis zu einigen Zehnern von Angström ansteigen und folglich die Spaltung beim Zeemaneffekte beträchtlich übertreffen.

27. Radioaktive Erscheinungen. Wenn man sich die Frage vorlegt, welche Ereignisse in der Geschichte der Physik als die allerwichtigsten bezeichnet zu werden verdienen, d. h. welche den größten Einfluß auf die weitere Entwicklung dieser Wissenschaft ausgeübt haben, und wenn wir die Entwicklung neuer Theorien, die wir weiter unten besprechen werden, beiseite lassen, so müssen wir ohne allen Zweifel an erster Stelle die Hertzschen Strahlen, die Röntgenstrahlen und die von H. Becquerel (1896) und dem Ehepaar Curie (Peter und Marie) 1898 entdeckten radioaktiven Erscheinungen setzen. Wir wollen uns mit einer kurzen Aufzählung der wichtigsten hierher gehörigen Tatsachen begnügen. Radioaktive Stoffe trifft man fast ausschließlich nur unter den aller schwersten Grundstoffen an; sie haben ein Atomgewicht nicht unter 204 und eine Ordnungsnummer nicht unter 81. Ausnahmen bilden Kalium und Rubidium, welche zweifellos, wenn auch schwach, radioaktiv sind. Die radioaktiven Stoffe und alle ihre chemischen Verbindungen senden ununterbrochen hauptsächlich drei Arten Strahlen aus: 1. α -Strahlen, aus α -Teilchen, 2. β -Strahlen, aus β -Teilchen bestehend, 3. γ -Strahlen. Die von uns bereits erwähnten α -Teilchen sind Heliumatome, welche zwei Elektronen verloren haben. Die β -Teilchen sind identisch mit den Elektronen, so daß die β -Strahlen vollkommen analog den Kathodenstrahlen sind; die γ -Strahlen sind Röntgenstrahlen von äußerst kleiner Wellenlänge. Die γ -Strahlen begleiten die β -Strahlen und werden von den letzteren hervorgerufen, genau so, wie die Röntgenstrahlen von den Kathodenstrahlen hervorgerufen werden. Die α -Strahlen sind bloß in wenigen Fällen von einer schwachen γ -Strahlung begleitet. Wir wollen noch hinzufügen, daß die Geschwindigkeit, mit welcher die β -Teilchen (Elektronen) hinausgeschleudert werden, 0,995 der Lichtgeschwindigkeit erreicht. Weder physikalische, noch chemische Bedingungen haben irgendeinen Einfluß auf die radioaktiven Erscheinungen, woraus man schließen muß, daß die Erscheinung der Radioaktivität ihren Sitz ausschließlich in den Atomen hat. Verschiedene radioaktive Grundstoffe (nicht deren Gemische) senden entweder α -Strahlen oder β -Strahlen aus, und bloß in wenigen Fällen sendet ein und derselbe Grundstoff Strahlen beider Art aus. Die radioaktiven

Stoffe besitzen noch die Eigentümlichkeit, daß in ihnen ununterbrochen eine Wärmeentwicklung vor sich geht, welche die radioaktive Ausstrahlung begleitet. Ein Gramm reines Radium entwickelt im Laufe einer Stunde gegen 130 Grammkalorien. Die Hauptsache dabei ist jedoch der Umstand, daß der radioaktive Grundstoff bei jeder Aussendung eines α - oder β -Teilchens sich in einen anderen, im allgemeinen ebenfalls radioaktiven Grundstoff verwandelt. Das Metall Radium entsendet ein α -Teilchen, welches sich in ein Heliumatom verwandelt, nachdem es sich zwei von jenen freien Elektronen, welche, wenn auch in geringer Zahl, überall vorhanden sind, angeeignet hat; das, was nach dem Verluste des α -Teilchens nachgeblieben ist, stellt einen neuen gasförmigen Grundstoff vor und heißt Radiumemanation oder Niton. Hier haben wir ein typisches Beispiel des Zerfalls eines Grundstoffes in zwei neue und überdies eines metallischen in zwei gasförmige vor uns. Die Radiumemanation entsendet von neuem ein α -Teilchen, wobei wiederum Helium und ein neuer Grundstoff *Ra A* entsteht; auf dieselbe Weise entsteht aus *Ra A* das *Ra B*; letzteres entsendet ein β -Teilchen und es entsteht *Ra C* usw. Auf diese Weise entstehen Reihen radioaktiver Grundstoffe, ein jeder aus dem vorhergehenden durch Entsendung eines α - oder β -Teilchens. Es gibt zwei solche Reihen. Die Metalle Uran und Thorium sind deren Ahnen. Die ganze Uranreihe besteht aus 15 Gliedern. Nach fünf Verwandlungen geht Uran in Radium über (es wäre richtiger, zu sagen: vom Uran bleibt bloß Radium übrig); das Radium geht nach acht Verwandlungen in *Ra G*, ein nicht radioaktives Isotop des Bleies über. Bei den 14 Verwandlungen vom Uran bis zum *Ra G* werden in acht Fällen α -Teilchen und in sechs Fällen β -Teilchen ausgeschleudert. Ähnlich sieht auch die Thoriumreihe aus; auch hier gibt es fünf Verwandlungen bis zur gasförmigen Emanation des Thoriums, jedoch bloß zehn Verwandlungen bis *Th D*, ebenfalls einem Isotop des Bleies. Eine seitliche Abzweigung der Uranreihe bildet die Aktiniumreihe, welche mit *Ac D*, wieder einem Isotopen des Bleies, schließt.

In den radioaktiven Erscheinungen haben wir es mit der vollkommen offenbaren Tatsache des Zerfalls des Atoms zu tun, mit einer Verwirklichung des im Laufe des ganzen 19. Jahrhunderts für absurd gehaltenen Traumes der Alchemisten. Die Geschwindigkeit des Zerfalls der verschiedenen radioaktiven Stoffe ist sehr ungleich. Sie wird charakterisiert durch die Zeit, während welcher die Hälfte des ursprünglich vorhandenen reinen Stoffes zerfällt;

diese Dauer des halben Zerfalls kann man als Periode des gegebenen Stoffes bezeichnen. Für Thorium ist die Periode T gleich $1,5 \cdot 10^{10}$ Jahre, für Uran $T = 4,5 \cdot 10^9$ Jahre, für Ionium, aus welchem Radium entsteht, ist $T = 10^5$ Jahre, für Radium $T = 1600$ Jahre, für Aktinium ist T gegen 20 Jahre, für *Ra D* haben wir $T = 16$ Jahre, für Mesothorium I ist $T = 6,7$ Jahre, für *Ra F* $T = 163$ Tage, für die Radiumemanation $T = 3,81$ Tage, für *Ra B* $T = 26,8$ Minuten, für *Ra A* ist $T = 3$ Minuten, für Thoriumemanation 54,5 Sekunden, für Aktiniumemanation 3,92 Sekunden, für Thorium $A = 0,14$ Sekunden usw. Wir halten es nicht für nötig, in weitere Einzelheiten einzugehen; das Gesagte genügt, um die Wichtigkeit und das Unerwartete dieser neuen Tatsachen darzutun.

Schluß. Wir haben aus dem unermeßlichen Ozean der neuen Tatsachen, welche in den 50 Jahren die vor uns offene Bühne bereicherten, jene 27 ausgewählt, die, unserer Ansicht nach, die wichtigsten waren und den größten Einfluß auf das Erblühen, die Erweiterung und Vertiefung der neuen Physik ausgeübt haben. Wir behaupten durchaus nicht, daß diese Aufzählung etwas Abgerundetes und Vollendetes vorstellt; es wäre gar nicht so schwer, die Zahl 27 zu verdoppeln, zu verdreifachen, ja selbst zu verzehnfachen, ohne das Gebiet der wichtigen und interessanten Tatsachen zu verlassen, und wir werden nicht streiten, wenn man uns vorhält, daß unter den nicht angeführten Tatsachen nicht minder wichtige und interessante als einige von den erwähnten zu finden wären. Wir sind aber der Meinung, daß die 27 Tatsachen genügen, um den einen Teil der Evolution der Physik zu charakterisieren: die Anhäufung neuer Ziegel und Bausteine, als Material zum Umbau alter und Ausbau jener neuen Theorien, in denen das ganze Wesen der Physik als Wissenschaft gipfelt. Übrigens sollen auch noch einige neue Tatsachen aus der Zahl der besonders wichtigen im § 8 und in dem folgenden Kapitel besprochen werden.

§ 7. Die Experimentierkunst. Nicht nur die Resultate der Experimentalphysik, welche die „offene Bühne“ mit einer ungeheuer großen Anzahl neuer Tatsachen bereicherten, wurden von der E. berührt, sondern auch die Methoden, deren sich die Experimentalphysik bedient. Sowohl die Meßapparate als auch die zu Beobachtungszwecken dienenden sind unvergleichlich vollkommener konstruiert als vor 50 Jahren. Die Genauigkeit der Messungen und Beobachtungen übertrifft die frühere um vieles. Eine ganze Reihe neuer Apparate zum Messen physikalischer Größen, mit welchen es die alte Physik bereits zu tun hatte, sind erfunden

worden; wir erwähnen hier bloß das Stufengitter (Echelon) und die Mikrowage. Außerdem sind vollkommen neue Apparate zum Zwecke der Untersuchung jener neuen Erscheinungen, die wir in den vorhergehenden Paragraphen erwähnt haben, konstruiert und vervollkommnet worden; auch hier genügt ein Beispiel: die Apparate zur Untersuchung der radioaktiven Erscheinungen. Die Vervollkommnung der Apparate ging in vielen Fällen Hand in Hand mit der Entwicklung der Theorie dieser Instrumente. So ermöglichte z. B. die von Abbe entwickelte Theorie des Mikroskops die gewaltige Vervollkommnung dieses Instrumentes. Dasselbe läßt sich über die Konstruktion der optischen Instrumente überhaupt sagen. Es hat sich eine weitverzweigte Wissenschaft, die sogenannte Optotechnik, entwickelt, in welcher die Theorie und Praxis der optischen Instrumente eng miteinander verbunden sind. Dasselbe gilt auch in bezug auf Apparate, welche zu elektrischen Messungen und gleichfalls zur Messung von Längen, Winkeln, der Zeit usw. benutzt werden. Nicht unbedeutender ist die Vervollkommnung verschiedener Arten Hilfsgeräte, wie z. B. der Teilmaschinen, Pumpen, Pressen und dergleichen. Es ist möglich geworden, enorme Drucke herzustellen und äußerst niedrige Temperaturen, wovon bereits die Rede war, auch sehr hohe Temperaturen, z. B. in dem Moissanschen Ofen, oder nach der Methode von Lummer, vermutlich bis 6000° C, zu erzielen. Die neuen Apparate und Methoden ermöglichten genauere Messungen auszuführen, als es vor 50 Jahren geschehen konnte. Die Wellenlängen der Lichtstrahlen werden jetzt mit einer Genauigkeit von hundertstel und sogar tausendstel Ångström, d. h. bis 10^{-11} cm, gemessen! Es sind neue geistreiche Methoden ausgearbeitet worden, um ganz kleine Zeitintervalle genau messen zu können, so z. B. die Zeitdauer eines Stoßes zweier elastischer Körper (Kugeln, Zylinder). Eine ganz besonders große Bedeutung hat die Schaffung einer exakten Thermometrie; sogar das Quecksilberthermometer ist, infolge vieljähriger Arbeit einer ganzen Reihe von Forschern, zu einem sehr genauen Instrument geworden. Ein ganz besonders Interesse erweckt die neu entstandene genaue Pyrometrie, d. h. die Kunst, äußerst hohe Temperaturen zu messen. Erst im Laufe unseres Jahrhunderts entwickelte sich ein neuer Zweig dieser Kunst, nämlich die optische Pyrometrie, deren Aufgabe in der Bestimmung der Temperatur eines glühenden Körpers auf Grund der Untersuchung des von ihm ausgestrahlten Lichtes besteht.

Die zunehmende Genauigkeit der Messungen erforderte eine

bedeutend genauere Feststellung der Messungseinheiten für die verschiedenen physikalischen Größen. In dieser Richtung ist sehr viel geschehen. In bezug auf einige dieser Einheiten sind sogar internationale Verabredungen getroffen worden. Es ist nicht uninteressant, zu bemerken, daß man dabei zum Teil gezwungen war, von den anfangs theoretisch definierten Werten dieser Einheiten abzuweichen. Wir wollen einige Beispiele anführen:

1. Längen und Masseneinheiten. 1791 wurde in Frankreich verfügt, daß als Längeneinheit der zehnmillionste Teil eines Viertels des Erdmeridians und als Einheit der Masse (oder des Gewichtes) die Masse eines Kubikdezimeters reinen Wassers bei 4° C (oder genauer das Gewicht in 45° nördlicher Breite und im Meeresniveau) angenommen werden sollten. Im Jahre 1799 wurden die Prototypen des Meters und des Kilogramms, die sogenannten *mètre* und *kilogramme des archives* angefertigt. Es hat sich indessen im Laufe der Zeit erwiesen, daß diese zwei Prototypen ihrer Definition nicht genau entsprechen. Im Jahre 1872 beschloß eine internationale Gelehrtenkommission, die Definition vom Jahre 1791 fallen zu lassen und als Einheiten der Länge und Masse die zwei Prototypen von 1799, mit Beibehaltung der Bezeichnung *Meter* und *Kilogramm*, anzunehmen. Im Jahre 1875 wurde in Paris eine internationale Konvention abgeschlossen, auf Grund derer der Vorschlag von 1872 angenommen und beschlossen wurde, ein internationales Bureau für Maße und Gewichte zum Zwecke der Verfertigung von Kopien der Prototypen von 1799 zu gründen. Dieses Bureau wurde in der Nähe von Paris, im Parke Saint Cloud im Pavillon Breteuil, errichtet. Im Jahre 1889 waren die Kopien fertiggestellt und durch das Los unter den interessierten Staaten, welche die Konvention vom Jahre 1875 unterschrieben hatten, verteilt. Da nun das Meter und das Kilogramm eine voneinander unabhängige Definition erhalten hatte, so war damit die anfangs beabsichtigte Beziehung zwischen ihnen aufgehoben. Die Bezeichnung „Liter“ für das Volumen eines Kilogramms reinen Wassers bei 4° C wurde beibehalten. Ein Kubikdezimeter erwies sich gleich 0,99997 eines Liters. Im Jahre 1902 verglichen Michelson und Benoît die Länge eines Meters mit den Wellenlängen dreier Kadmiumlinien, der roten, grünen und blauen. Dieselbe Messung wurde im Jahre 1907 von Benoît, Fabry und Perot wiederholt. Sie fanden für die Wellenlänge der roten Kadmiumlinie:

$$\lambda = 6438,4696 J \cdot \text{Å} .$$

$J \cdot \text{\AA}$ bedeutet „internationale Ångströmeinheiten“. Es ist nämlich beschlossen worden, die angeführte Zahl als endgültig anzunehmen und keine weiteren Korrekturen an ihr vorzunehmen. Es ist klar, daß damit für die Spektroskopie eine spezielle Längeneinheit eingeführt wurde, und es ist wohl sicher, daß dieselbe nicht vollkommen identisch ist mit jenem Ångström, welches durch die Gleichung $1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ definiert ist.

2. Elektrische Einheiten. Ohm, Ampère und Volt als Bezeichnungen der Einheiten des Widerstandes, der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft wurden genau vor 50 Jahren eingeführt; vorher war die Siemenseinheit im Gebrauch; sie war gleich dem Widerstande einer Quecksilbersäule bei 0° , einem Meter Länge und einem Quadratmillimeter Querschnitt; als Einheit für die elektromotorische Kraft diente die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes. Nach der ursprünglichen Definition sollten ein Ohm = 10^9 CGS elektromagnetischer Widerstandseinheiten, ein Ampère = $0,1$ CGS elektromagnetischer Einheiten der Stromstärke, ein Volt = 10^8 CGS elektromagnetischer Einheiten der elektromotorischen Kraft sein. Um diese theoretischen Bestimmungen ins praktische Leben einzuführen, fanden eine Reihe Konferenzen, Kommissionen usw. von Gelehrten verschiedener Länder statt. Sie faßten (auf dem internationalen Kongreß in London 1908) folgenden Beschluß:

Das internationale Ohm ist dem Widerstande einer Quecksilbersäule bei 0° gleich, deren Querschnitt überall der gleiche ist, deren Masse 14,4521 Gramm beträgt und deren Länge 106,300 cm ist (die beiden Nullen sind hinzugefügt, um anzudeuten, daß diese Zahl in der Zukunft nicht weiter geändert werden soll).

Das internationale Ampère ist gleich einer Stromstärke, welche 1,11800 Milligramm Silber in einer Sekunde ausscheidet.

Das internationale Volt ist die elektromotorische Kraft, welche in einem internationalen Ohm einen Strom von einem internationalen Ampère hervorruft.

Eine Kommission von Gelehrten verschiedener Länder fand die elektromotorische Kraft des Westonschen Elements bei 20° C gleich 1,0183 internationale Volt. Der Inbegriff der ersten drei Festsetzungen bedeutet das Fallenlassen der oben angeführten, theoretischen Definitionen.

3. In der letzten Zeit wird, besonders in Amerika, ein System von Einheiten ausgearbeitet, welche in der Photometrie zu benutzen ist.

Die enorme Zunahme der Genauigkeit, welche man bei den verschiedensten Messungen erreichen kann, ergab die Möglichkeit, unvergleichlich genauer als früher die Zahlenwerte allerlei physikalischer Größen zu bestimmen. Dasselbe bezieht sich auch auf eine Anzahl von Weltkonstanten. Wir wollen einige Beispiele anführen. Die Avogadro'sche Zahl, d. h. die Anzahl der Teilchen in einem Grammmolekül, wurde noch vor kurzem zu $7 \cdot 10^{23}$ angenommen. Die neuesten Forschungen Millicans ergaben die Zahl $6,062 \cdot 10^{23}$. Für das mechanische Äquivalent der Grammkalorie bei 15° fand man die Zahl 4,1842 Joule (ein Joule ist gleich 10^7 Erg); für die Gaskonstante hat man die Zahl 1,985 in Grammkalorien für ein Grammmolekül gefunden. In diese Kategorie gehören die neuesten Bestimmungen der Ladung e des Elektrons; $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ der elektrostatischen CGS-Einheit.

In dem Kapitel, welches jenen Errungenschaften der neuen Physik gewidmet ist, die man als Erweiterung des Inhaltes der alten Physik ansehen kann, dürfen wir nicht mit Stillschweigen die Entstehung und blühende Entwicklung dreier neuer, äußerst umfangreicher Wissenschaften, welche ausschließlich auf dem von der Physik gelieferten Fundamente erbaut sind, übergehen. Wir haben im Auge die Elektrotechnik, die Astrophysik und die Physikalische Chemie. Dem haben wir nichts mehr hinzuzufügen; es genügt, diese drei Wissenschaften, auf welche die Menschheit ein Recht hat, stolz zu sein, zu nennen.

§ 8. Die Vertiefung des Verständnisses. Wir wollen in diesem Paragraphen einige der Errungenschaften der Physik untersuchen, in denen wir es nicht bloß mit der Erweiterung, sondern, und das ist wohl das Wichtigere, mit der Vertiefung der alten Physik zu tun haben. Selbstverständlich schließen wir das Gebiet hinter den Kulissen, d. h. alles hypothetische, aus. Es ist klar, daß das tiefere Verständnis vor allem und hauptsächlich ermöglicht wird durch die Einführung neuer Hypothesen, auf denen dann die Theorien der entsprechenden physikalischen Erscheinungen aufgebaut werden. Die Aufgabe der Hypothesen und Theorien besteht ja darin, die Erscheinungen zu erklären, d. h. sie verständlich zu machen. Allein wir wissen auch, daß die Hypothese ein unzuverlässiges Fundament für die Theorie bildet und eine Erscheinung, welche uns verständlich schien, plötzlich unverständlich wird, wenn wir die Hypothese und auch die auf ihr begründete Theorie fallen lassen müssen (siehe § 3 im dritten Kapitel). Die neuen Theorien werden wir später behandeln; hier wollen wir einige Fälle besprechen, in

denen das tiefere Verständnis ohne Benutzung irgendwelcher Hypothese erlangt wurde.

I. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Im § 5 des zweiten Kapitels besprachen wir den zweiten Hauptsatz und seine Auffassung durch die Forscher vor 50 Jahren; am Schlusse jenes Paragraphen gaben wir in sieben Punkten die Charakteristik dieser alten oder, wie sie heutzutage genannt wird, klassischen Thermodynamik. Wir wollen diese Punkte hier nicht wiederholen und bitten den Leser bloß, dieselben noch einmal durchzusehen. Die wichtigsten Punkte sind der zweite und der vierte: Die Welttendenz wurde als Tatsache betrachtet, doch blieb die Grundfrage über die Urquelle dieser Tendenz unbeantwortet, und im Zusammenhang damit konnte der im Punkte 4 angeführte unsinnige Pseudosyllogismus über die nicht umkehrbaren Prozesse nicht erklärt werden. Dank den Arbeiten Boltzmanns, Gibbs und anderer Forscher wurde die Welttendenz verständlich und das Rätsel jenes Pseudosyllogismus gelöst. Die ganze Frage kann so gestellt werden: Aus welchem Grunde verlaufen alle tatsächlich vor sich gehenden physikalischen Erscheinungen in einer bestimmten Richtung, welche, wie wir gesehen haben, verschiedenartig charakterisiert werden kann (Clausius, W. Thomson), oder noch einfacher: Weshalb sind alle physikalischen Erscheinungen nicht umkehrbar? Boltzmann gab die einfache Antwort: Alle tatsächlich vor sich gehenden physikalischen Erscheinungen sind umkehrbar, doch sind die umgekehrten Erscheinungen so unendlich **unwahrscheinlich**, daß ihr Auftreten selbst in Quadrillionen von Jahren nicht zu erwarten ist. Etwas, was wir nicht hoffen können, jemals zu erleben, weil es, obgleich möglich, jedoch so fabelhaft unwahrscheinlich ist, erscheint uns eben als unmöglich. Somit verwandelt sich unser Pseudosyllogismus in einen logisch regelrechten Syllogismus, denn die dritte Zeile muß man durch folgende Worte ersetzen: Alle physikalischen Erscheinungen sind umkehrbar.

Wir wollen das Gesagte durch ein Beispiel veranschaulichen; es soll uns darüber aufklären, woher die Ausdehnung eines Gases in den leeren Raum eine nicht umkehrbare Erscheinung ist. Stellen wir uns einen allseitig geschlossenen Kasten vor, der durch eine innere verschiebbare Scheidewand in zwei gleiche Abteilungen, eine rechte und eine linke, geteilt ist. Nehmen wir an, daß die rechte Hälfte vollkommen leer sei, in der linken aber sich ein Gas befindet. Setzen wir voraus, daß dieses Gas bloß aus vier sich rasch bewegenden

und von den Wänden des Kastens zurückprallenden Teilchen besteht (§ 4 des zweiten Kapitels). Ziehen wir die Scheidewand heraus; die Teilchen bewegen sich dann in den beiden Abteilungen des Kastens; das Gas hat sich ausgedehnt. Aber wir werden nicht lange zu warten haben, bis alle vier Teilchen zufällig sich wieder in der linken Hälfte des Kastens befinden. In diesem Augenblick schieben wir die Scheidewand vor, das ganze Gas ist in der linken Hälfte, die Ausdehnung des Gases erweist sich als ein umkehrbarer Prozeß. In diesem Falle bestehen $2^4 = 16$ mögliche Verteilungen der Teilchen zwischen den beiden Hälften des Kastens und die Wahrscheinlichkeit des Eintritts des Augenblicks, in dem alle Teilchen sich in der linken Hälfte ansammeln, ist gleich $\frac{1}{16}$, d. h. recht groß. Nehmen wir nun an, daß das Gas aus 10 Teilchen bestehe, dann wird die Zahl der verschiedenen möglichen Verteilungen der Teilchen zwischen den beiden Hälften des Kastens gleich $2^{10} = 1024$, und nur eine davon entspricht der Anwesenheit aller Teilchen in der linken Hälfte. Die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Ereignisses ist gleich $\frac{1}{2^{10}} = \frac{1}{1024}$; wir werden einige Zeit auf das zufällige Eintreffen dieses Ereignisses warten müssen. Wir schieben die Scheidewand wieder vor, und die Ausdehnung des Gases hat sich wieder als umkehrbar erwiesen. Bei 20 Teilchen haben wir 2^{20} , d. h. gegen eine Million möglicher Verteilungen der Teilchen zwischen den beiden Hälften des Kastens, und wieder entspricht nur eine derselben dem Übergange aller Teilchen in die linke Hälfte, so daß die Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses einem Millionstel gleich ist. Es wird nicht schwer fallen, den Eintritt dieses Ereignisses abzuwarten, und wir haben wiederum die umkehrbare Ausdehnung des Gases in dem leeren Raume vor uns. Bei 50 Teilchen fällt die Wahrscheinlichkeit bis auf $1:2^{50}$, oder $1:10^{15}$, und bei 100 Teilchen bis $1:2^{100}$, d. h. $1:10^{30}$. Hier ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, doch ist die Sache noch nicht hoffnungslos. Im allgemeinen werden wir bei n Teilchen finden, daß das zufällige Zusammentreffen aller Teilchen in der linken Hälfte ein Ereignis ist, dessen Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2^n}$ gleich ist.

Und dennoch, wie groß die Zahl der Teilchen n auch sei, die Wahrscheinlichkeit wird niemals Null; bei großem n wird sie aber unvorstellbar klein. Bei einem wirklichen Gase ist die Zahl der Teilchen sehr groß; sie ist beispielsweise bei einem Volumen der Hälfte des Kastens von 300 cm, Zimmertemperatur und atmo-

sphärischem Druck nahe gleich 10^{22} . Dann ist die Wahrscheinlichkeit eines umgekehrten Prozesses $= \frac{1}{2^n}$, wo $n = 10^{22}$, d. h. eine Eins geteilt durch eine Eins mit Drei mal 10^{21} Nullen! Das ist ein unfassbar kleiner Bruch, aber keine Null. Die Wahrscheinlichkeit des umgekehrten Prozesses ist nicht Null, aber sie ist so klein, daß wir das Ereignis, d. h. den umgekehrten Prozeß, selbst nach Quadrillionen von Jahren nicht erleben werden! Dieses Beispiel erklärt uns alles. Die Prozesse sind nicht deshalb nicht umkehrbar, weil die umgekehrten unmöglich seien, sondern weil sie fabelhaft wenig wahrscheinlich sind. Wir wollen uns nicht in weitere, wenn auch sehr interessante Einzelheiten vertiefen, und bloß noch einige Bemerkungen machen. In dem angeführten Beispiele erkennen wir erstens, wie eng die Nichtumkehrbarkeit physikalischer Prozesse mit dem molekular-kinetischen Bau der Materie verbunden ist und vor allem mit der ungeheuren Anzahl der Moleküle selbst in einem kleinen Volumen. Aber, je kleiner das betrachtete Volumen ist, um so öfter können darin lokale Abweichungen von dem zweiten Hauptsatz vorkommen; so müssen, z. B., in einem Gase örtliche kurzdauernde Verdünnungen und Verdichtungen vor sich gehen. Das sind die sogenannten Fluktuationen, deren ausführliche mathematische Theorie eingehend ausgearbeitet ist. Wir können jetzt dem zweiten Hauptsatz eine neue Fassung geben, welche jene von uns bereits besprochene Tendenz erklärt. Diese Tendenz ist nämlich nichts anderes als das Bestreben, aus einem weniger wahrscheinlichen Zustande in einen wahrscheinlicheren überzugehen.

Jene Methode der mathematischen Untersuchung der physikalischen Erscheinungen, die wir bei der Erklärung der Nichtumkehrbarkeit der Ausdehnung eines Gases in einen leeren Raum leicht gestreift haben, wird die statistische Methode genannt. Diese Methode wurde zur Erklärung verschiedener physikalischer Erscheinungen herangezogen und so entstand eine neue Wissenschaft: die statistische Physik. Wir können uns an dieser Stelle in keine Einzelheiten einlassen.

Dank den Arbeiten von Helmholtz, Gibbs und Duhem ist die klassische Thermodynamik um viele neue Kapitel bereichert worden. Außer der Energie und der Entropie wurde die Bedeutung einer ganzen Reihe anderer Zustandsfunktionen, wie z. B. der freien Energie und verschiedener thermodynamischer Potentiale, klar gelegt. Die freie Energie ist gleich $U - TS$, wo U

Energie, T absolute Temperatur und S Entropie bedeuten. Dieses alles bezieht sich auf die theoretische Thermodynamik. Auf diesem Boden entwickelte sich die berühmte Phasenregel, eine der Grundlagen der physikalischen Chemie; aus Mangel an Raum müssen wir die Erklärung derselben hier unterlassen. Das Gesagte bezieht sich auch auf das nicht minder berühmte Nernstsche Theorem (1906), welches man bisweilen als dritten Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet. Es bezieht sich auf äußerst niedrige Temperaturen und besteht in der Behauptung, daß die Energie des Systems und dessen freie Energie bereits in der Nähe des absoluten Nullpunktes einander gleich werden.

Parallel mit der Entwicklung der theoretischen Thermodynamik vollzogen sich die vielseitigen Anwendungen derselben bei der Analyse solcher Erscheinungen, an die sich die Wissenschaft vor 50 Jahren noch nicht gewagt hatte. Wir wollen bloß einige dieser neuen Errungenschaften erwähnen, aus denen ersichtlich wird, inwieweit die Thermodynamik immer wieder zeigte, welch mächtiges Werkzeug zur Untersuchung der uns umgebenden Erscheinungen sie vorstellt.

Helmholtz schuf im Jahre 1882 die Theorie des (sogenannten umkehrbaren) galvanischen Elementes auf thermodynamischer Grundlage und gab die genaue Formel, welche die elektromotorische Kraft des Elementes mit der Wärmetönung der in ihm stattfindenden chemischen Reaktionen verbindet. Auch war er der erste, der angab, in welcher Weise man die Thermodynamik zur Behandlung von chemischen Erscheinungen heranziehen kann. Planck (1887) entwickelte die Theorie der verdünnten Lösungen. Bartoli (1876, 1884) bewies auf thermodynamischem Wege, daß die Strahlung (z. B. das Licht) einen Druck auf die Oberfläche der Körper ausübt; er bewies gleichfalls die Richtigkeit des Stefanschen Gesetzes, laut welchem die volle Energieausstrahlung des absolut schwarzen Körpers proportional der vierten Potenz der absoluten Temperatur ist.

II. Das Prinzip der Erhaltung der Massen und der Energie. Diese zwei Prinzipien, von denen das zweite im § 3 des zweiten Kapitels besprochen wurde, bildeten vor 50 Jahren ein wesentliches und, wie es schien, unerschütterliches Fundament der Physik. Sie bestanden nebeneinander und unabhängig voneinander, durchaus nicht aneinander gebunden, als zwei Wahrheiten, welche die Gesetzmäßigkeit in den Erscheinungen kennzeichnen. Die neue Physik hat nach zwei Richtungen hin von Grund aus unsere Ansicht

über diese zwei Prinzipien und ihr Verhältnis zueinander geändert, indem sie beide zu einem unzertrennbaren Ganzen verband.

Die Masse eines Körpers wird durch die Kraft gemessen, welche notwendig ist, um dem Körper eine bestimmte Beschleunigung zu erteilen. Es wurde vorausgesetzt, daß diese Kraft überall und unter allen Umständen eine und dieselbe sei, d. h. die Masse eines gegebenen Körpers eine absolut unveränderliche Größe vorstelle. In physikalischen und chemischen Prozessen kann wohl eine Umgruppierung der Teilchen vor sich gehen, allein deren Gesamtmasse muß unverändert bleiben. Die neue Physik hat sich von dem Begriff der Unveränderlichkeit der Masse losgesagt und hat bewiesen, daß die Masse m eines gegebenen Körpers von dessen Geschwindigkeit v nach der Formel

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

abhängig ist. In dieser Formel ist m_0 die Masse des ruhenden Körpers und c die Geschwindigkeit des Lichtes. Das bedeutet, daß, wenn ein Körper sich relativ zu einem System bewegt, in diesem System eine um so größere Kraft auf ihn einwirken muß, damit er die gewünschte Beschleunigung w erhält, je größer seine relative Geschwindigkeit ist. Je größer v , desto größer ist die Masse m ; wenn $v = c$ wird, so wird die Masse unendlich groß, woraus hervorgeht, daß die Geschwindigkeit c nicht erreicht werden kann. Das hier Gesagte ist nicht bloß das Resultat der Theorie, das ist eine Tatsache, welche durch Versuche mit rasch bewegten Elektronen festgestellt ist.

Eine noch gründlichere Umwälzung in den Grundbegriffen ist mit der folgenden neuen Errungenschaft der modernen Physik verbunden. Die moderne Physik lehrt nämlich, daß Energie Masse besitzt und jede Masse gleichbedeutend ist einem gewissen Vorrat an Energie, und zwar einem verhältnismäßig ungeheuer großen. Die Formel

$$m = \frac{E}{c^2}$$

gibt die Masse m der Energie E . Da ja die Geschwindigkeit des Lichtes c sehr groß ist, so folgt daraus, daß selbst ein enormer Vorrat an Energie eine recht kleine Masse in sich birgt. So besitzen z. B. $2,2 \cdot 10^{10}$ Kilogrammkalorien eine Masse, die einem Gramm gleich kommt. Diese Tatsachen vernichten das Prinzip der Erhaltung

der Masse, wie man es früher auffaßte, und als Grundlage bei der Aufstellung der chemischen Reaktionsgleichungen benutzte. So werden bei der Verbindung von 2 g Wasserstoff mit 16 g Sauerstoff $2,87 \cdot 10^{27}$ Erg Wärme ausgeschieden, und infolgedessen nicht 18 g Wasser erhalten, wie es nach dem alten Prinzip der Erhaltung der Massen sein sollte, sondern um $3,2 \cdot 10^{-6}$ Milligramm weniger! Wenn jede Energie die Masse $E : c^2$ enthält, so läßt sich daraus folgern, daß Masse und Energie einander äquivalent sind, und daß, folglich, jede ruhende Masse m gleichwertig ist dem kolossalen Vorrat an Energie

$$E_0 = m_0 c^2 .$$

Diese Energie bleibt beim absoluten Nullpunkt fast vollständig im Körper erhalten. Der Leser kann die Bemerkung machen, daß wir mit den beiden letzten Formeln die offene Bühne, welcher dieses Kapitel gewidmet ist, verlassen haben und in das Gebiet der Theorien übergegangen sind. Das hat wohl seine Richtigkeit, allein ich bin der Meinung, daß diese zwei Formeln heutzutage vollständig sicher-gestellte Tatsachen vorstellen, und ich wollte nicht darüber schweigen in dem Paragraphen, welcher den Errungenschaften der neuen Physik gewidmet ist, die ein tieferes Verständnis der von der alten Physik entdeckten Wahrheiten in sich schließen.

III. Das periodische System der Grundstoffe und die Ordnungszahl. Im § 1 des zweiten Kapitels war über das periodische System von D. Mendelejeff berichtet worden. Die Periodizität in den Eigenschaften der Grundstoffe wurde bis zum Jahre 1913 als eine augenscheinlich sehr wichtige, jedoch geheimnisvolle und unverständliche Tatsache betrachtet; über ihre Urquelle hatte man gar keine Ahnung. Das tatsächliche Verständnis des periodischen Systems datiert erst von dem Augenblick, als man die Bedeutung der Ordnungszahl des Grundstoffs, d. h. einfach dessen Nummer in der Reihe der Grundstoffe im periodischen System erkannte. Es hat sich erwiesen, daß es bloß 92 Grundstoffe gibt, wenn man die Isotopen als Abarten der Grundstoffe (viertes Kapitel, § 2, Nr. 4) ausschließt. Die Ordnungszahl dient als Hauptmerkmal der Grundstoffe; sie tritt an Stelle des Atomgewichts; letzteres hat seine maßgebende Bedeutung verloren, seitdem es sich erwiesen hat, daß dasselbe eine zufällige Zahl vorstelle, abhängig von der relativen Menge der Isotopen, aus welchen die gewöhnlich untersuchten Grundstoffe zusammengesetzt sind. Das wahre, tiefe Verständnis des Wesens des periodischen Systems er-

langte man jedoch erst auf Grund der neuen Theorie des Atombaus. Wir kommen noch auf diese Frage zurück. Wir hielten es aber für notwendig, auch an dieser Stelle das periodische System zu erwähnen, da wir es ja auch in diesem Falle mit dem erlangten, richtigen Verständnis längst bekannter alter Tatsachen zu tun haben, welche nun in ganz neuem Lichte erscheinen.

IV. Der Ersatz alter, falscher Erklärungen durch neue, richtige, ohne Benutzung neuer Hypothesen. Solcher Fälle gibt es eine Menge. Es ist vollkommen klar, um was es sich hier handelt, und wir können uns auf ein Beispiel beschränken, nämlich auf die Einführung der Theorie der Diffraktion in die Untersuchung solcher Erscheinungen, welche man in der alten Physik für möglich hielt, als einfache Reflexionen und Strahlenbrechungen zu betrachten, d. h. auf Grund bloß der elementaren, geometrischen Optik zu analysieren. Hierher gehört die von uns bereits erwähnte genaue Theorie des Mikroskops von Abbe. Ein anderes Beispiel finden wir in der Theorie des Regenbogens, welche von Des Cartes aus dem Jahre 1673 stammt und welche bis jetzt noch am meisten bekannt ist, obgleich sie vollständig falsch ist und mehrere Erscheinungen nicht erklären kann, wie z. B. die Verteilung der Farben im Regenbogen, komplementäre Bogen usw. Die richtige Diffraktionstheorie gab bereits Airy im Jahre 1837, und andere Forscher hatten sich bis zum Jahre 1873 damit befaßt; allein man schenkte diesen Arbeiten keine genügende Beachtung. Erst nach den Untersuchungen von Mascart, Pulfrich (1888) und besonders Pernter (1897—1900) wurde die neue Theorie allgemein angenommen. Es ist klar, daß wir es auch in diesem Falle mit einem tieferen Verständnis für das, was früher bereits bekannt war, zu tun haben.

Kapitel V.

Neue Theorien im alten Geiste.

§ 1. Einleitung. Die Elektronen. Am Schlusse des § 9 des zweiten Kapitels haben wir den „Geist“ der alten Physik eingehend charakterisiert. In diesem Kapitel wollen wir aus der Zahl der in den letzten 50 Jahren entstandenen Theorien nur jene besprechen, welche ihrem allgemeinen Charakter nach sich von denen der alten Physik nicht unterscheiden. In diesen Theorien haben wir stets

eine klar ausgedrückte und uns „verständliche“ Hypothese vor uns, welche der mechanischen Weltauffassung entspricht; wir haben es mit Kräften und Bewegungen zu tun und machen von den Prinzipien der Mechanik und Thermodynamik Gebrauch. Diese neuen Theorien bilden nichts anderes als eine Erweiterung der alten Physik und hätten im vorhergehenden Kapitel ihre Erledigung finden können. Doch war jenes Kapitel den Tatsachen gewidmet; hier aber wenden wir uns den neuen Theorien zu. Sieben solcher Theorien sollen hier angeführt werden und unter ihnen an erster Stelle das Elektron. Wir meinen damit nicht etwa die Elektronentheorie, welche aus der Maxwellschen Theorie hervorgegangen ist. Hier soll bloß die Hypothese besprochen werden, daß die negative Elektrizität eine atomistische Struktur besitzt, d. h. aus einzelnen, unter sich gleichen Teilchen, welche wir Elektronen nennen, besteht. Nun aber hat unterdessen diese Hypothese aufgehört eine solche zu sein, und im sechsten Paragraphen des vierten Kapitels haben wir unter Nr. 20 die Existenz der Elektronen in das Verzeichnis der neuen Tatsachen aufgenommen. Dennoch halten wir es für angebracht, diese frühere Hypothese zu erwähnen, weil deren Einführung in die Wissenschaft (um das Jahr 1900) eines der wichtigsten und fruchtbarsten Ereignisse in der Geschichte der neuen Physik bedeutet. Übrigens hat diese Hypothese in bezug auf das Hauptthema dieses Buches für uns ein spezielles Interesse, weil sie uns zum ersten Male die Möglichkeit gibt, auf eine der Schattenseiten der Evolution der Physik hinzuweisen, die in einer gewissen Hinsicht unzweifelhaft einen Rückschritt bedeutet. Die alte Physik erkannte beide Elektrizitäten für gleichwertig an; indem sie dieselben einführte und ihnen bestimmte Kraftfelder zuschrieb, entwarf sie ein klares und verständliches Bild. Die neue Physik hat eine genaue Beschreibung der negativen Elektrizität gegeben und darin erblicken wir einen großen Fortschritt. Aber zu gleicher Zeit machte sie aus der positiven Elektrizität etwas Nebelhaftes, Unverständliches, man kann sagen — geradezu Unbekanntes. Sie erblickt die elementare Ladung der positiven Elektrizität in dem Kerne des Wasserstoffatoms (vgl. unten), spricht ihr eine Masse zu, welche 1840mal die Masse des Elektrons übertrifft und zu gleicher Zeit ein Volumen, welches sogar im Vergleich zum Volumen des Elektrons äußerst klein ist. Aber selbst dieses kaum annehmbare Bild ist noch lange nicht sichergestellt und allgemein angenommen. Ein einfacher, klarer und, man kann sagen, abgeschlossener Gedanke hat einem

verwickelten, unverständlichen und einstweilen sogar in den Hauptzügen unaufgeklärten Platz machen müssen.

§ 2. Die Lehre von den Lösungen. Die Elektrolyse. Die Nernst'sche Theorie des galvanischen Elementes. Die neue Lehre von den Lösungen entwickelte sich in engstem Zusammenhang mit der Lehre von der elektrischen Leitfähigkeit der Lösungen und den sogenannten chemischen Wirkungen des Stromes, welche gegenwärtig das weite Gebiet der „Elektrolyse“ umfassen. Im § 8 des zweiten Kapitels haben wir auseinandergesetzt, welchen Standpunkt die Wissenschaft vor 50 Jahren diesen Erscheinungen gegenüber einnahm. Rufen wir uns vor allem die Terminologie ins Gedächtnis. „Elektrolyte“ nennen wir solche Stoffe, deren Lösungen einer Einwirkung des elektrischen Stromes unterliegen, d. h. eben der Elektrolyse; man sagte früher, daß sie durch den Strom zerlegt werden. Zu diesen Stoffen gehören die Säuren, Basen und Salze. Die unmittelbar (primär) sich an den Elektroden ausscheidenden Stoffe heißen „Ionen“; an der Kathode wird das Kation, an der Anode das Anion ausgeschieden. Die jetzige Lehre von dem Durchgange des elektrischen Stromes durch die Elektrolyten zerfällt in zwei Teile; in dem einen wird die Frage über den elektrischen Widerstand der Elektrolyte — in dem anderen der Mechanismus der Elektrolyse und ihrer Begleiterscheinungen untersucht. Diese beiden Fragen sind unzertrennbar sowohl miteinander als auch mit der Frage über die innere Struktur der Lösungen verbunden. Beginnen wir mit der letzteren. Ionen sind die Bestandteile des Elektrolyten. In der Mehrzahl der Fälle ist das Kation ein Metall oder Wasserstoff, das Anion die Gruppe der übrigen Atome, aus denen das Molekül des Elektrolyten besteht. Ionen sind immer elektrisch geladen, und zwar das Kation positiv, das Anion negativ. Die Ladung des Kations besteht aus 1, 2 usw. Elektronen; die positive Ladung des Anions ist 1, 2 usw. Elektronen äquivalent, selbstverständlich sind die Ladungen des Kations und des Anions desselben Elektrolyten gleich groß, weil die Ionen bei dem Zerfalle des neutralen Moleküls frei werden. Man hat die positive Ladung des Kations als Resultat eines Verlustes von 1, 2 usw. Elektronen von seiten des Atoms, oder der Atomgruppe, welche das Kation bildet, anzusehen. Die jetzige Lehre setzt voraus, daß in den Lösungen der Elektrolyten ein Teil der Moleküle der letzteren in Ionen zerfallen (dissoziiert) ist; das ist die sogenannte elektrolytische Dissoziation. Den Gedanken an eine derartige Dissoziation hatten zuerst Williamson (1851)

und Clausius (1857) ausgesprochen. Helmholtz setzte voraus, daß die Dissoziation eine vollständige sei. Als eigentlichen Schöpfer der Lehre von der elektrolytischen Dissoziation muß Arrhenius angesehen werden. Er hat die Grundlagen seiner Theorie in den Jahren 1887 und 1888 auseinandergesetzt. Er nimmt an, daß in jeder Lösung eines Elektrolyten ein Teil seiner Teilchen dissoziiert ist. Der Dissoziationsgrad, d. h. das Verhältnis der Zahl der dissoziierten Teilchen zur Gesamtzahl der Teilchen in der Lösung, hängt von der Konzentration der Lösung ab und wächst mit der Abnahme derselben. Wenn man in die Lösung des Elektrolyten Elektroden eintaucht und den Strom schließt, so findet die Erscheinung der Elektrolyse statt und die Ionen erscheinen an den Elektroden. Die alte Physik nahm an, daß der Strom den Elektrolyten in seine Bestandteile zerlege, und daß die letzteren, ohne ihre Gegenwart im Inneren der Lösung irgendwie zu äußern, an der Oberfläche der Elektroden erscheinen und, falls keine sekundären, chemischen Reaktionen auftreten, dort ausgeschieden werden. Die alte Physik konnte keine befriedigende Erklärung für den Mechanismus der Fortbewegung der Ionen zu den Elektroden geben. Die neue Theorie sagt aus, daß der Strom die Elektrolyten nicht nur nicht zerlegt, sondern daß im Inneren der Lösung überhaupt kein solcher elektrischer Strom, wie er außerhalb des Elektrolyten in dem Stromkreise fließt, besteht, d. h. daß überhaupt kein Strom freier Elektronen vorhanden ist. Diese Theorie gibt folgendes Bild: Sobald wir die Elektroden in die elektrolytische Lösung eintauchen, wird die Kathode infolge der in dem Stromkreise wirkenden elektromotorischen Kraft negativ geladen, d. h. es erscheinen auf ihr freie Elektronen; die Anode wird positiv geladen, weil aus ihr Elektronen in den Leitungsdraht des Stromkreises übergehen. Infolgedessen beginnen die bereits in der Lösung vorhandenen Ionen in der Richtung zu den Elektroden hin zu wandern, die Kationen zur Kathode, die Anionen zur Anode. Sobald die letzteren an der Anode angelangt sind, verlieren sie ihre überzähligen Elektronen, welche auf die Anode übergehen und sich dann weiter dem Stromkreise entlang bewegen; die Anionen selbst werden neutral und scheiden sich an der Anode aus. Die Kationen, an der Kathode angelangt, entnehmen derselben die ihnen fehlenden Elektronen, werden ebenfalls neutral und werden an der Oberfläche der Kathode ausgeschieden. Auf diese Weise wird in dem äußeren Schließungskreise ununterbrochen der Strom der Elektronen von der Anode zur Kathode, d. h. der

elektrische Strom, unterhalten. In der Lösung selbst gibt es einen derartigen Strom nicht; der elektrische Strom in derselben besteht bloß in der Bewegung der Anionen und Kationen in zwei entgegengesetzten Richtungen. Die verschiedenen Anionen und Kationen besitzen bestimmte, ihnen eigentümliche Beweglichkeiten. In verdünnten Lösungen hängt die Beweglichkeit eines bestimmten Ions von der Natur des anderen Ions nicht ab, d. h. von jenem Elektrolyten, dessen Bestandteil er ursprünglich bildete. Die elektrische Leitfähigkeit der elektrolytischen Lösung wird durch die Summe der Beweglichkeiten der beiden Ionen bestimmt, in welche der Elektrolyt zerfällt.

Wir sehen keine Notwendigkeit, in Einzelheiten einzugehen. Die hier angedeuteten Gedanken geben einen flüchtigen Abriß der Grundgedanken der Elektrochemie, jener Lehre, welche zu einer weitverzweigten Wissenschaft, reich an speziellen Lehrbüchern, Laboratorien, Lehrstühlen und Zeitschriften, herangewachsen ist.

Nachdem wir einige Zeilen der Lehre von der elektrolytischen Dissoziation in den Lösungen gewidmet haben, wollen wir, ebenso kurz, eine andere Lehre erwähnen, welche sich gleichfalls auf Lösungen bezieht und von van't Hoff 1885 geschaffen wurde. Diese Lehre, welche sich auf experimentelle Ergebnisse stützt, behauptet, daß eine ganze Reihe wichtiger Eigenschaften von gelösten Stoffen einerseits und von Gasen andererseits eine auffallende Ähnlichkeit, wenn nicht geradezu Gleichheit aufweisen, wobei an Stelle des Gasdrucks der osmotische Druck der Lösungen tritt. Der osmotische Druck war auch in der alten Physik bekannt, und wir haben es nicht nötig, diese Erscheinung hier zu beschreiben. Die erwähnten Eigenschaften der Lösungen entsprechen vollkommen den Gesetzen von Boyle-Mariotte, Gay-Lussac und Avogadro und können folgendermaßen ausgedrückt werden:

I. Der osmotische Druck ist bei unveränderlicher Temperatur proportional der Konzentration der Lösung, oder umgekehrt proportional dem Volumen der Lösung bei einer gegebenen Menge des gelösten Stoffes (Boyle-Mariotte).

II. Der osmotische Druck ist der absoluten Temperatur proportional, d. h. sein Temperaturkoeffizient ist gleich 0,00367 (Gay-Lussac).

III. Gleiche Volumina isotonischer Lösungen, d. h. solcher, welche einen gleichen osmotischen Druck haben, enthalten bei gegebener Temperatur dieselbe Anzahl von Molekülen, wie ein Gas,

welches in demselben Volumen bei derselben Temperatur und bei einem Drucke, welcher dem osmotischen Drucke der Lösung gleich ist, sich befindet (Avogadro).

Diese Gesetze gelten für die Lösungen der Nichtelektrolyten, wie z. B. für eine Zuckerlösung. Für Elektrolyte muß notwendigerweise, genau so wie für teilweise dissoziierte Gase, wie z. B. J_2 und NH_4Cl -Dampf bei hoher Temperatur, die infolge der Dissoziation der Moleküle vergrößerte Anzahl der einzelnen Teilchen berücksichtigt werden.

Die Theorie der elektrolytischen Dissoziation und die van't Hoff'sche Lehre bilden die Grundlage eines umfangreichen Teiles der physikalischen Chemie. Von den zahlreichen Anwendungen dieser Lehre wollen wir bloß der osmotischen Theorie des Galvanischen Elementes gedenken, welche Nernst im Jahre 1889, im Zusammenhang mit seiner Theorie der Diffusion gelöster Stoffe und Flüssigkeiten, gab. Nernst wandte seine Theorie auf die Berechnung folgender Größen an: 1. der elektromotorischen Kraft, welche bei der Berührung zweier verschieden konzentrierten Lösungen desselben Elektrolyten entsteht; 2. der elektromotorischen Kraft bei der Berührung einer Elektrode mit einer Lösung, welche ein Salz des Metalles der Elektrode enthält; 3. der elektromotorischen Kraft eines Konzentrationselements, welches aus zwei gleichen, in verschieden konzentrierte Lösungen desselben Salzes getauchten Elektroden besteht; 4. der elektromotorischen Kraft der Elemente vom Daniell-Typus. Es muß aber bemerkt werden, daß die von Nernst entwickelten Formeln nur für verdünnte Lösungen gelten.

§ 3. Noch einige wichtige neue Theorien. Aus der großen Zahl der neuen Theorien, die keine wesentliche Abweichung vom „alten Geiste“ der Physik vorstellen, wollen wir hier bloß einige besonders wichtige erwähnen:

I. Die Theorie des Durchganges der Elektrizität durch Gase. Diese Theorie wurde bereits erwähnt, als wir (im § 6 des vierten Kapitels unter Nr. 22) auf die Ionisation der Gase als auf eine der neuen Tatsachen hinwiesen. Als Gründer der Lehre von dem Durchgang der Elektrizität durch Gase, hauptsächlich der verdünnten, muß J. J. Thomson angesehen werden (neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts). Seiner Lehre gemäß besteht eine gewisse, wenn auch geringe Analogie zwischen der Art des Stromdurchganges durch verdünnte Gase und durch Lösungen von Elektrolyten. In beiden Fällen bilden die Ionen die Träger des Stromes, jedoch mit dem wesentlichen Unterschiede, daß in den Lösungen

beide Ionen Atome oder Gruppen von Atomen sind, während in den Gasen die Rolle der negativen Ionen in vielen Fällen die freien Elektronen übernehmen, obgleich das Auftreten von negativen materiellen Ionen ebenfalls möglich ist. Im allgemeinen muß man sagen, daß der Mechanismus des Durchgangs des Stromes durch Gase unvergleichlich komplizierter ist und das Auftreten von mannigfaltigen speziellen Erscheinungen weit mehr begünstigt als der beim Durchgang des Stromes durch elektrolytische Lösungen. Wir brauchen nicht in weitere Einzelheiten einzugehen. Es genügt, zu sagen, daß die Theorie J. J. Thomsons, die von vielen Forschern weiter entwickelt worden ist, mit Kräften und Bewegungen operiert, und von den Theorien der alten Physik sich ihrem Charakter nach im wesentlichen nicht unterscheidet.

II. Neue Theorien des Magnetismus. Die Aufgabe dieser Theorien besteht in der Erklärung der ferromagnetischen, paramagnetischen und diamagnetischen Eigenschaften der Körper; sie knüpfen teilweise an die alte Ampèresche Theorie des Magnetismus an. Man kann im allgemeinen sagen, daß die Hauptrolle in allen neuen Theorien die in kreisförmigen Bahnen sich bewegendenden Elektronen spielen. Hierher gehören die von J. J. Thomson (1903), W. Voigt (1900—1903), Langevin (1904) und besonders P. Weiß (angefangen von 1907) und W. Arkadjeff (in Moskau, angefangen von 1913) entwickelten Theorien. Die Theorie von P. Weiß führte zur Lehre vom Magneton. Weiß bezeichnete mit diesem Namen einen elementaren Magneten, welcher dem Elektron analog ist; ein Atom eines Grundstoffs enthält eine ganze Zahl von Magnetonen. Alles oben über die Theorie des Durchgangs des elektrischen Stromes durch verdünnte Gase Angeführte bezieht sich in gleichem Maße auf diese äußerst interessanten Theorien. Eine Ausnahme hiervon bildet die Arbeit von Langevin (1912), in welcher er auf den Zusammenhang der Magnetentheorie mit der Theorie der Quanten hinweist.

III. Die Zustandsgleichung der reellen Gase. Die Gesetze von Boyle-Mariotte und von Gay-Lussac ergeben für die idealen Gase die Zustandsgleichung, welche das Volumen v , den Druck p und die absolute Temperatur T verbindet, in folgender Gestalt:

$$p v = R T, \quad (1)$$

wo R die Gaskonstante bedeutet, welche den gleichen Zahlenwert für alle Gase hat, wenn man die Gleichung auf ein Grammolekül

bezieht. Wenn man die Größe $p v$, welche die Dimension einer Arbeit oder, was dasselbe ist, einer Energie hat, in Grammkalorien ausdrückt, so ist $R = 1,985$ oder angenähert $R = 2$. Die reellen Gase weichen von den beiden Gesetzen ab und ihre Zustandsgleichung muß daher komplizierter sein als die durch Formel (1) gegebene. Das unsterbliche Verdienst von van der Waals besteht darin, daß er als erster eine rationell begründete Zustandsgleichung aufstellte, welche nicht nur für den gasförmigen, sondern auch für den flüssigen Zustand eines Stoffes gültig ist. Diese Zustandsgleichung hat folgende Gestalt:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT ,$$

wo a und b zwei Konstanten sind, welche von der Beschaffenheit des Gases abhängen. Das Glied $a:v^2$ erhielt van der Waals, indem er die Kohäsionskräfte, welche zwischen den Teilchen der reellen Gase wirken, in Betracht zog. Das Glied b erscheint, wenn man berücksichtigt, daß die Teilchen selbst einen gewissen Bruchteil des ganzen Volumens v einnehmen. Mit Hilfe seiner Formel zeigte van der Waals, wie die kritischen Größen — Temperatur, Volumen und Druck — durch die Größen a , b und R sich ausdrücken lassen. Außerdem schuf er die Lehre von den korrespondierenden Zuständen, welche neue und weite Horizonte für das Verständnis einer großen Zahl physikalischer Gesetzmäßigkeiten eröffnete.

Kapitel VI.

Neue Theorien in neuem Geiste.

§ 1. Einleitung. Der geneigte Leser, der dieses Buch mit Aufmerksamkeit gelesen oder auch nur durchgeblättert hat, wird wohl, nach Einblick in den Inhalt der ersten fünf Kapitel, und bereits dem Ende des Buches nahe, mit Verwunderung fragen: Wo ist denn die versprochene „Evolution des Geistes“ der Physik (erstes Kapitel, § 1)? Wo bleibt der „neue Geist“ der modernen Physik? Diesem war bisher noch keine Zeile gewidmet, obgleich im vierten und fünften Kapitel eine große Anzahl der in den verflossenen 50 Jahren erzielten Errungenschaften der Physik, und nicht bloß neue, durch das Experiment bewiesene Tatsachen, sondern auch einige neue Theorien angeführt wurden. Alles, was wir bis jetzt betrachtet

haben, erwies sich als eine Erweiterung und Vertiefung der alten Physik; der allgemeine Charakter, der „Geist“ der Wissenschaft, zeigte keinerlei merkliche Veränderungen. Wie viele der wichtigen, neuen Errungenschaften der Physik bleiben uns noch zu betrachten? Ich muß gestehen, daß nicht viele übrig geblieben sind; selbstverständlich können sie sich nur auf die neuen Theorien beziehen. Genau genommen sind ihrer nur zwei; wegen einer dritten, die oft genannt wird, ist es klar, daß in ihr nicht jener neue Geist herrscht, der in diesem Buche klargelegt werden soll. Der Leser wird nun fragen: Ist es wirklich möglich, daß zwei oder drei neue Theorien einen derartigen Einfluß ausüben konnten, daß sie imstande waren, den Geist der Wissenschaft von Grund aus umzugestalten und etwas vollkommen Neues in die Wissenschaft hineinzubringen, das den ganzen Charakter der Wissenschaft wesentlich und tiefgehend umgeformt hat? Und wir können antworten: Ja, sie waren imstande, solches auszuführen, denn sie haben die ganze Physik erobert; in alle ihre Abschnitte sind sie eingedrungen; sie sind die Leiter unseres wissenschaftlichen Denkens geworden und haben eine neue Weltanschauung geschaffen, welche mit den Anschauungen der alten Physik nichts gemein hat. Schritt für Schritt löst sich die Physik sozusagen in ihnen auf, und nur sie allein bestimmen heutzutage den wahren Geist dieser Wissenschaft. Diesen neuen Theorien soll dieses Kapitel gewidmet sein.

§ 2. Die Theorie von Maxwell. Wir haben von dieser Theorie mehrmals gesprochen. Wir erwähnten, daß sie bereits in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts, d. h. mehr als vor 50 Jahren, geschaffen wurde, aber allgemeine Anerkennung erst fand, als Hertz (1888) seine nach ihm benannten Strahlen entdeckte. Wir werden an dieser Stelle bloß über die Maxwellschen Gleichungen und über die elektromagnetische Lichttheorie sprechen, welche auf diesen Gleichungen aufgebaut ist.

Wir wollen uns in erster Linie den Maxwellschen Gleichungen zuwenden; wir bedauern aber, daß wir dieselben nicht einmal niederschreiben können, da sie aus Zeichen der höheren Mathematik bestehen, deren Kenntnis wir bei unseren Lesern nicht voraussetzen wollen. Dennoch wollen wir versuchen, den Sinn und Charakter dieser Gleichungen zu erklären.

Im § 8 des zweiten Kapitels unter Nr. 14 erwähnten wir die sogenannte Fernwirkung (*actio in distans*), welche in der Physik des 19. Jahrhunderts (bis 1888) eine sehr wesentliche Rolle gespielt

hat. Die Existenz einer unmittelbaren Wechselwirkung zweier in einer beliebigen Entfernung voneinander befindlichen Agenzien kam in der Theorie der elektrischen und magnetischen Erscheinungen scharf zum Ausdruck, und zwar in den Gesetzen der Wechselwirkung zweier Ladungen, zweier magnetischer Körper, zweier elektrischer Ströme und der Magnete und Ströme. Man setzte voraus, daß diese Agenzien im leeren Raume (im Äther) unmittelbar aufeinander einwirken, so daß im Zwischenraum (im Äther) keinerlei Veränderungen stattfinden. Wenn jedoch das zwischen den aufeinander wirkenden Agenzien befindliche materielle Medium augenscheinlich die Kräfte beeinflusste, welche bei Gegenwart des einen Agens auf das andere einwirkten, so wurde diese Erscheinung einfach als Folge jener elektrischen oder magnetischen Zustände erklärt, welche in dem materiellen Zwischenmedium unter dem Einflusse (auch Fernwirkung) dieser beiden Agenzien entstehen, wobei aus dem Medium neue Kräfte entspringen und eine Rückwirkung auf die genannten Agenzien ausüben. Der einzige, der den Gedanken an eine *actio in distans*, d. h. eine unmittelbare Einwirkung eines Agens auf das andere, nicht zugeben konnte, war Faraday. Er nahm an, daß die Zwischensubstanz (selbst auch der Äther) eine wesentliche Rolle als Überträger der Wirkung eines Agens auf das andere spielt, wobei in diesem Medium ganz bestimmte Veränderungen längs jener Kraftlinien vor sich gehen, welche auch in der allgemein angenommenen Theorie bekannt waren. Doch schrieb diese Theorie den Kraftlinien keine reelle Existenz zu; nahm auch nicht an, daß längs dieser Kraftlinien in Wirklichkeit irgend etwas im Zwischenmedium vor sich gehe. Sie betrachtete die Kraftlinien als rein geometrische Linien, welche nur dazu dienten, die Beschreibung der Erscheinungen zu erleichtern, vor allem jedoch, um in einem beliebigen Punkte des Raumes die Richtung der Kraft angeben zu können, welche in diesem Punkte entstehen würde, falls man an seine Stelle, je nach den Umständen, eine Ladung, einen Magnetpol oder einen stromdurchflossenen Leiter bringen würde. Den Zeitgenossen Faradays schienen diese Ideen von der Realität der Kraftlinien, längs denen eine gewisse Veränderung im Medium vor sich gehen sollte und die Wirkung eines Agens auf das andere übertragen werde, nebelhaft und unverständlich. Maxwell griff die Ideen Faradays auf und schuf seine Lehre, in welcher die berühmten zwei Gleichungen die Hauptrolle spielen. Es muß aber erwähnt werden, daß diese Gleichungen ihre endgültige, verhältnismäßig einfache und elegante Gestalt den Arbeiten von Hertz

und Heaviside zu verdanken haben. Wir wollen uns bemühen, den Sinn dieser Gleichungen zu erklären.

In jedem Punkte des Raumes kann eine beliebige elektrische Kraft E und eine beliebige magnetische Kraft H vorhanden sein; beide aber existieren reell nur in dem Falle, daß in diesem Punkte eine Ladung (Kraft E) oder ein magnetischer Körper oder ein elektrischer Strom (Kraft H) vorhanden sind. Eine Änderung dieser fiktiven Kräfte entsteht dann, wenn die Lage oder die Intensität der wirkenden Agenzien, d. h. die Größe der Ladung, der Grad der Magnetisierung oder die Stromstärke sich ändern, welche die Felder erzeugen. Diese Veränderung von E und H ist aber eine rein fiktive; in dem bezeichneten Punkte geht faktisch nichts vor sich, denn es wechseln an Größe und Richtung jene Kräfte E und H , welche nur dann auftreten, wenn man in diesen Punkt eine Ladung, einen Magneten oder einen Strom bringt. Die Maxwellsche Theorie ändert von Grund aus dieses Bild von den Kräften E und H ; sie nimmt an, **daß diese Kräfte wirklich in den Punkten des Raumes existieren und zwar, ganz abgesehen davon, ob in dem Punkte eine Ladung, ein Magnet oder ein Strom vorhanden sind.** Maxwell glaubte, daß die Gegenwart dieser Kräfte an gewisse mechanische Veränderungen im Äther gebunden sei. Wir greifen etwas vor, indem wir bemerken, erstens, daß es weder Maxwell noch anderen Forschern gelungen ist, die Form und den Charakter jener mechanischen Veränderungen im Äther zu ergründen, welche dem Entstehen der Kräfte E und H in ihm entsprechen, und zweitens, daß die Vertreter einer weit verbreiteten wissenschaftlichen Richtung, welche die Existenz des Äthers verneint, gezwungen sind, die Existenz dieser Kräfte „In den Raum“, d. h. in die wirkliche, absolute Leere zu verlegen.

Denken wir uns irgendwo im Raume drei zueinander senkrechte, etwa wie der Fußboden und zwei zusammenstoßende Wände eines gewöhnlich viereckigen Zimmers, gelegene Ebenen. Wir wollen sie Koordinatenebenen nennen. Sie schneiden sich in drei geraden Linien (zwei, wo der Boden mit den Wänden, und die dritte, wo die beiden Wände zusammenstoßen). Wir bezeichnen sie als Koordinatenachsen. Wenn wir dann aus irgendeinem beliebigen Punkte drei Senkrechte auf die Koordinatenebenen fällen (im Zimmer wird eine Senkrechte vertikal stehen, die beiden anderen aber horizontal), so bezeichnet man die Länge dieser Senkrechten als Koordinaten des Punktes; man sieht leicht ein, daß die Lage des Punktes im Raume durch seine Koordinaten vollkommen bestimmt wird. Wir wollen

sie mit x, y, z bezeichnen. Gehen wir dann zu einem benachbarten Punkte über, so verändert sich mindestens eine, im allgemeinen Falle alle drei Koordinaten. Im gegebenen Punkte und Zeitmoment haben die Kräfte E und H eine bestimmte Größe und Richtung; wir wollen die Zeit, gerechnet von einem willkürlich gewählten Anfangsmomente, mit t bezeichnen. Wenn wir von dem gegebenen Punkte zu einem benachbarten mit anderen Koordinaten übergehen, so werden im allgemeinen die Kräfte E und H in dem neuen Punkte andere Größen und Richtungen besitzen. Wir können folglich sagen, daß die Kräfte E und H in Hinsicht auf Größe und Richtung, von den Koordinaten x, y, z abhängen. Wenn wir ferner in demselben Punkte zu einem anderen Zeitmoment übergehen, so werden im allgemeinen die Kräfte E und H ebenfalls ihre Größe und Richtung ändern. Aus dem Gesagten folgt, daß jede von den Kräften E und H in bezug auf Größe und Richtung abhängig ist von den vier Größen x, y, z und t , d. h. von der Zeit und den Koordinaten x, y, z jenes Punktes, wo die Kräfte wirken (oder wo sie ihren Angriffspunkt haben). Wir werden im folgenden annehmen, daß das Medium, welches den gegebenen Punkt umgibt, kein elektrisches Leitungsvermögen besitzt; wir nehmen ferner an, daß dieser Punkt sich innerhalb eines Nichtleiters (Dielektrikum) oder im Spezialfalle in einem von Materie entblößten Raume befindet. Die erste Maxwellsche Gleichung verknüpft die Änderung der Kraft E in einem kleinen Zeitintervalle mit den Änderungen der Kraft H , welche sehr kleinen Koordinatenänderungen x, y, z entsprechen oder, anders ausgedrückt, mit den Werten der Kraft H in dem gegebenen Punkte und den benachbarten. Analog verknüpft die zweite Maxwellsche Gleichung die Änderung der Kraft H in einem kleinen Zeitintervalle mit den Änderungen der Kraft E , welche sehr kleinen Koordinatenänderungen x, y, z entsprechen oder, anders ausgedrückt, mit den Werten der Kraft E in dem gegebenen Punkte und den benachbarten.¹⁾

Somit ist der Maxwellschen Theorie jede Fernwirkung fremd, denn ihre Gleichungen verknüpfen nur solche Größen, welche sich auf einen und denselben Punkt im Raume beziehen. Die Größe

¹⁾ Für Leser, welche ein wenig mit den Anfangsgründen der höheren Mathematik vertraut sind, geben wir folgende Erklärungen: X, Y, Z sollen die Komponenten der Kraft E , nach den Koordinatenachsen genommen, und L, M, N ebensolche Komponenten der Kraft H bedeuten. Jede dieser sechs Komponenten ist eine Funktion der vier Größen x, y, z und t ; wir setzen voraus, daß das Medium

und Richtung der Kräfte im gegebenen Punkte hängt ab von der Größe und Richtung dieser Kräfte in den benachbarten Punkten in demselben und in dem unmittelbar vorhergehenden Zeitmomente. Es ist hervorzuheben, daß die Elektrizität als reell vorhandene Substanz in der Maxwellschen Theorie überhaupt keine Erwähnung findet.

Die Maxwellsche Theorie behauptete sich in ihrer reinen Gestalt ungefähr ein Jahrzehnt lang. Als die Lehre von den Elektronen, deren Existenz wir als experimentell bestätigte Tatsache anerkannt haben, entstand, mußte sie entsprechend abgeändert werden. Übrigens bezog sich die Änderung bloß auf jene Formeln, welche sich auf Medien mit elektrischer Leitfähigkeit beziehen.¹⁾ Die mathematische Ausarbeitung der veränderten Formeln gehört in das Bereich der sogenannten Elektronentheorie, welche als eine weitere Entwicklung der Maxwellschen Theorie angesehen werden kann. Der Gründer der Elektronentheorie ist H. A. Lorentz in Holland. Den wichtigsten Teil der Maxwellschen Theorie werden wir gesondert im nächsten Paragraphen betrachten.

keine Leitfähigkeit besitzt. Die erste Maxwellsche Gleichung zerfällt in drei Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{k}{c} \frac{dX}{dt} &= \frac{dN}{dy} - \frac{dM}{dz}, \\ \frac{k}{c} \frac{dY}{dt} &= \frac{dL}{dz} - \frac{dN}{dx}, \\ \frac{k}{c} \frac{dZ}{dt} &= \frac{dM}{dx} - \frac{dL}{dy}, \end{aligned}$$

in welchen k die Dielektrizitätskonstante des Mediums bedeutet; die Kräfte X , Y , Z sind hier in elektrostatischen, die Kräfte L , M , N in elektromagnetischen Einheiten ausgedrückt. Infolge dieser Festsetzung enthalten die Gleichungen die Größe c , welche dem Verhältnis gewisser elektromagnetischer und elektrostatischer Einheiten gleich ist. Diese Größe, deren Zahlenwert aus rein elektrischen Messungen erhalten wird, ist numerisch gleich der Lichtgeschwindigkeit im leeren Raume. Die zweite Maxwellsche Gleichung zerfällt in folgende drei:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{c} \frac{dL}{dt} &= \frac{dY}{dz} - \frac{dZ}{dy}, \\ \frac{\mu}{c} \frac{dM}{dt} &= \frac{dZ}{dx} - \frac{dX}{dy}, \\ \frac{\mu}{c} \frac{dN}{dt} &= \frac{dX}{dy} - \frac{dY}{dz}. \end{aligned}$$

Hier bedeutet μ die magnetische Permeabilität des Mediums. Für den leeren Raum (Äther) ist $k = \mu = 1$.

¹⁾ Die in der vorhergehenden Anmerkung angeführten Gleichungen bleiben für nichtleitende Medien in Kraft.

§ 3. Die elektromagnetische Lichttheorie. Ein Raumteil, in dem elektrische oder magnetische Kräfte wirken, wird im ersten Falle elektrisches Feld, im zweiten magnetisches Feld genannt; wenn beide Kräfte gleichzeitig vorhanden sind, dann spricht man von einem elektromagnetischen Felde. Ein elektrisch geladener Körper ist von einem elektrischen Felde umringt, ein Magnet von einem magnetischen. In Bewegung begriffene Elektronen rufen in dem sie umgebenden Raume ein elektromagnetisches Feld hervor. Die alte Theorie, welche sich den Ideen Faradays nicht angeschlossen hatte, nahm an, daß die Kräfte in allen drei erwähnten Fällen nur scheinbare seien, solange in den Feldern keine Körper vorhanden sind, an welche diese Kräfte angreifen könnten. Faraday dagegen nahm an, daß das den Raum ausfüllende Medium (es könnte das auch der Äther sein) sich in einem besonderen Zustande befindet, über den Faraday übrigens nichts Bestimmtes aussagen konnte; dank diesem Zustande übt das Medium seine Wirkung auf die in demselben befindlichen Ladungen, Magnete und Ströme aus. Hier ist also die Fernwirkung durch die Wirkung des dem Körper unmittelbar anliegenden Mediums ersetzt. In der Maxwellschen Theorie offenbart sich dieser besondere Zustand des Mediums durch die tatsächliche Gegenwart der Kräfte E oder H oder gleichzeitig beider. Maxwell konnte nun aus seinen Gleichungen ganz erstaunliche Folgerungen ziehen, welche, bestätigt durch die Hertzschen Versuche, den Grund zum Aufbau der neuen Physik schufen. Wie oben, werden wir hier nur den Fall besprechen, wenn das Medium keine elektrische Leitfähigkeit besitzt. Die Dielektrizitätskonstante des Mediums wollen wir wiederum mit k , seine magnetische Permeabilität mit μ bezeichnen. Für den leeren Raum (Äther) ist $k = \mu = 1$. In erster Linie müssen wir uns mit jener Erscheinung bekannt machen, welche als elektromagnetische Störung bezeichnet wird.

Mit A bezeichnen wir einen beliebigen Punkt im gegebenen nichtleitenden Medium; es kann auch der leere Raum (Äther) sein. Denken wir uns durch diesen Punkt zwei zueinander senkrechte Gerade gelegt und bezeichnen die eine Richtung in jeder dieser Geraden vom Punkte A aus gerechnet als positive, die entgegengesetzte als negative. AP und AQ seien die zueinander senkrechten positiven Richtungen, AP' und AQ' die negativen. Im Punkte A soll weder eine elektrische Ladung, noch ein magnetisierter Stoff und selbstverständlich kein elektrischer Strom, da das Medium die Elektrizität nicht leitet, vorhanden sein; der Punkt kann übrigens auch

im leeren Raume liegen. Nun stellen wir uns vor, daß sich im Punkte A folgende sonderbare Erscheinung abspielt. In einem gewissen Momente, dessen Zeitpunkt wir mit $t = 0$ bezeichnen wollen, sind im Punkte A weder elektrische (E), noch magnetische (H) Kräfte vorhanden. Darauf tritt die Kraft E in der positiven Richtung von AP auf, und, von $E = 0$ angefangen, erreicht sie, allmählich anwachsend, zur Zeit $t = T : 4$ den maximalen Wert E_0 . Von diesem Augenblicke an nimmt die Kraft E wieder ab und verschwindet zur Zeit $t = T : 2$. Unmittelbar darauf erscheint die Kraft E von neuem, doch fällt jetzt ihre Richtung mit der negativen (AP') zusammen; infolgedessen werden wir die Kraft E als negativ bezeichnen. Indem die Kraft E allmählich an absoluter Größe anwächst, erreicht sie zur Zeit $t = 3 T : 4$ den größten negativen Wert $- E_0$, um dann wieder abzufallen und zur Zeit $t = T$ wieder zu verschwinden. Sodann wiederholt sich dieser Prozeß im Laufe der Zeit $t = T$ bis $t = 2 T$, d. h. die Kraft E nimmt bis E_0 zu, dann ab, wird negativ, erreicht den Wert $- E_0$ und verschwindet wieder. Weiterhin wiederholt sich dieser Prozeß zum dritten, vierten usw. Male, und zwar im Laufe einer Zeit, welche im Vergleiche zur Zeitdauer des einzelnen obenbeschriebenen Prozesses, enorm groß sein kann. Wir sagen, daß die Größe der Kraft E zwischen $+E_0$ und $-E_0$ hin und her schwingt; die Zeitdauer T wird Schwingungsdauer, die Größe E_0 Amplitude der Schwingungen genannt. Zur Abkürzung wird gewöhnlich von einer Schwingung der Kraft E anstatt einer Schwingung der Größe von E gesprochen. Das hier Gesagte bildet bloß die eine Hälfte der Erscheinung, welche im Punkte A stattfindet. Zu gleicher Zeit mit dem Auftreten der elektrischen Kraft E im Zeitpunkte $t = 0$ erscheint im Punkte A die magnetische Kraft H in der Richtung AQ , d. h. senkrecht zur Kraft E . Zur Zeit $t = T : 4$ erreicht sie den Höchstwert H_0 ; bei $t = T : 2$ verschwindet sie, sodann wächst sie in der Richtung AQ' von 0 bis $-H_0$ (zur Zeit $t = 3 T : 4$), um wiederum abzufallen und bei $t = T$ zu verschwinden. Dieser Prozeß wiederholt sich dann ununterbrochen viele Male. Die Kraft H oder vielmehr die Größe der Kraft H schwingt mit der Amplitude H_0 und der Periode T . Beide Kräfte schwingen also mit der gleichen Periode T ; sie verschwinden zu gleicher Zeit und erreichen die Höchstwerte E_0 und H_0 ebenfalls gleichzeitig. Die hier beschriebene sonderbare Erscheinung bezeichnet man als die im Punkte A vor sich gehende elektromagnetische Störung.

Durch eine mathematische Umformung der Maxwell'schen Gleichungen erhält man leicht folgendes Resultat. Wenn wir durch

den Punkt A eine Gerade AK ziehen, senkrecht sowohl zu PP' , als auch zu QQ' , so wird sie senkrecht auf jener Ebene stehen, in der die elektromagnetische Störung stattfindet, d. h. in welcher die Kräfte E und H hin und her schwingen. Denken wir uns die Gerade AK jenseits des Punktes A verlängert; diese Verlängerung bezeichnen wir mit AK' . Dann geschieht folgendes: Sobald in A eine elektromagnetische Störung auftritt, verbreitet sie sich sofort nach beiden Seiten längs der Geraden AK und AK' . Das will bedeuten, daß sofort nach dem Auftreten der Störung im Punkte A eine gleiche Störung im benachbarten Punkte auftritt, dann im folgenden usw. Jede folgende Störung tritt etwas später als die vorhergehende auf. Je weiter ein bestimmter Punkt M auf der Geraden AK oder AK' von dem Punkte A entfernt ist, desto später beginnt in ihm die elektromagnetische Störung. Die Strecke, welche die elektromagnetische Störung in einer Sekunde zurücklegt, bestimmt die Geschwindigkeit der Ausbreitung derselben; bezeichnen wir sie mit v . Es erweist sich, daß die Geschwindigkeit v durch die Formel

$$v = \frac{c}{\sqrt{k\mu}}$$

ausgedrückt werden kann, wo c im leeren Raume numerisch gleich der Lichtgeschwindigkeit ist (vgl. die Anmerkung im § 2). Im leeren Raume ist $k = \mu = 1$ und wir erhalten das Resultat

$$v = c .$$

Im leeren Raume (Äther) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Störung gleich der Lichtgeschwindigkeit. Die Geraden AK (oder AK') wollen wir Strahlen nennen. Jene Stelle im Raume, wo die elektromagnetische Störung auftritt, enthält eine gewisse Menge einer besonderen Art von Energie, zweifellos kinetischer Natur. Diese Energie wird entlang dem Strahle fortgepflanzt, und wir können von einem Energiestrome reden, der sich längs dem Strahle ausbreitet, von dem Punkte aus, wo die elektromagnetische Störung auftritt und auf irgendeine Art und Weise unterhalten wird. Maxwell fand ferner, daß ein solcher Strahl, wenn man ihn verwirklichen könnte, alle Eigenschaften der Lichtstrahlen besitzen müßte. Allein damit sind wir noch nicht zu Ende. Auf Grund seiner Theorie konnte Maxwell die Existenz zweier neuen gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Erscheinungen des Lichtes und der Elek-

trizität vorhersagen. Wir brauchen nicht auf diese Erscheinungen weiter einzugehen, es genügt zu bemerken, daß diese Beziehungen vorhergesagt waren und später auf experimentellem Wege vollständig bestätigt wurden.

Alles hier Gesagte führte Maxwell zur Schaffung seiner elektromagnetischen Lichttheorie, welcher die Hypothese zugrunde liegt, daß das Licht (genauer die strahlende Energie) eine im Raume sich ausbreitende elektromagnetische Störung, wie wir sie soeben beschrieben haben, sei. Jedoch schien diese Theorie einerseits nicht genügend begründet und andererseits war die Vorstellung von schwingenden elektrischen und magnetischen Kräften wenig verständlich; die Folge davon war, daß im Laufe eines recht langen Zeitraumes verhältnismäßig wenige Forscher sich dieser neuen Theorie anschlossen und sich bemühten, sie weiter auszubilden, um ihr eine festere Begründung zu geben. Diese Lage änderte sich vollständig mit der Erscheinung der unsterblichen Arbeiten von Hertz (1888). Im § 4 des vierten Kapitels haben wir diese Arbeiten unter § 9 besprochen. Wir sahen dort, daß es Hertz gelang, jene elektromagnetischen Strahlen zu verwirklichen, von denen in der Maxwellschen Theorie die Rede ist. Sie haben ihren Ursprung dort, wo eine schwingende Bewegung der Elektronen stattfindet. Da das ruhende Elektron in der Umgebung elektrische Kräfte, das sich bewegendes Elektron überdies noch magnetische Kräfte hervorruft, so ist es vollkommen einleuchtend, daß in der Umgebung eines schwingenden Elektrons der Größe nach wechselnde elektrische und magnetische Kräfte, d. h. elektromagnetische Maxwellsche Strahlen auftreten müssen.

Die Hertzschen Versuche und die weiteren experimentellen und theoretischen Untersuchungen vieler Forscher schufen der Maxwellschen Theorie eine unerschütterliche Grundlage und führten zur endgültigen Lossagung von der rein mechanischen Theorie der schwingenden Ätherteilchen. Schon längst ist die Maxwellsche Theorie von allen Physikern ohne Ausnahme angenommen, freilich mit den Abänderungen, welche die Elektronentheorie forderte. Die weitere Entwicklung der Wissenschaft in den letzten 35 Jahren hat noch deutlicher die Richtigkeit der Grundlagen der Maxwellschen Theorien bewiesen. Es unterliegt nicht dem geringsten Zweifel, daß das Licht oder allgemeiner die strahlende Energie, eine im Raume sich ausbreitende elektromagnetische Störung von der oben beschriebenen Art sei. In

welchem Maße sich in dieser Theorie der spezifische Geist der neuen Physik kund tut, soll später untersucht werden.

§ 4. Die Strahlungstheorie und die Entstehung der Quantenlehre. Wir wollen nun die zweite der neuen Theorien, welche am deutlichsten die neue Physik charakterisieren, besprechen. Diese Theorie, welche sich auf keine engbeschränkte Erscheinungsgruppe bezieht, dringt nach und nach in fast alle Abschnitte der Physik ein, infiziert sie, wenn man sich so ausdrücken darf, mit jener Krankheit, jenem enttäuschenden und unzulässigen Geiste, an welchem, wie wir hoffen wollen, die Physik nur zeitweilig leidet. Wir halten es nicht für notwendig, die Strahlungstheorie von Planck (vom Jahre 1900) auch nur in abgekürzter Form auseinanderzusetzen; wir schreiben ja keine Geschichte der Physik der letzten 50 Jahre und noch weniger ein Lehrbuch. Unsere Absicht ist es, dem Leser dieses Buches solche Charakterzüge der neuen Physik vorzuführen und nachdrücklich hervorzuheben, welche die alte Physik in schroffen Gegensatz zur neuen stellen. Und wir sind in der Tat imstande, diese Charakterzüge aufzudecken, ohne näher auf die Erklärung dieser Theorie einzugehen, welche zugleich mit dem neuen Jahrhundert das Licht der Welt erblickt und ihren trüben Stempel fast allen Abschnitten der neuen Physik dieses neuen Jahrhunderts aufgeprägt hat.

In § 4 des vierten Kapitels haben wir unter Nr. 13 auf die praktische Verwirklichung des absolut schwarzen Körpers hingewiesen, dessen Ausstrahlung durch die Weltfunktion $E(\lambda, T)$ bestimmt wird, wo λ die Wellenlänge, T die absolute Temperatur bedeuten. Diese Funktion bestimmt die Verteilung der Energie im Spektrum des schwarzen Körpers, wie wir ihn der Kürze halber bezeichnen wollen. Die Formel (1) daselbst gibt an, daß $E(\lambda, T)$ für alle schwarzen Körper dieselbe Funktion ist. Aber noch viel wichtiger ist die Formel (2), welche zeigt, daß das Emissionsvermögen $e(\lambda, T)$ eines beliebigen Körpers, mit der Funktion $E(\lambda, T)$ durch die Gleichung

$$e(\lambda, T) = a(\lambda, T) E(\lambda, T)$$

in Beziehung steht, wo $a(\lambda, T)$ das Absorptionsvermögen ist, d. h. jener Bruchteil der Strahlung von der Wellenlänge λ , welche bei der Temperatur T vom Körper absorbiert wird. Bei der Untersuchung des Spektrums solcher Strahlen, welche aus einer kleinen Öffnung des künstlichen schwarzen Körpers austreten, konnte man experimentell die Abhängigkeit der Größe E von λ und T bestimmen. Es entstand die sehr wichtige Aufgabe, durch theoretische

Betrachtungen die wahre mathematische Gestalt der Weltfunktion $E(\lambda T)$ zu finden. Wir wollen uns bei den Versuchen verschiedener Forscher, die Lösung dieser Aufgabe zu finden, nicht weiter aufhalten. Diese Aufgabe nahm auch Planck in Angriff. Es unterliegt keinem Zweifel, daß die Ausstrahlung in solchen Punkten des Körpers erfolgt, in welchen eine gewisse Bewegung vor sich geht, welche in dem umgebenden Raume eine elektromagnetische Störung hervorruft. Es unterliegt ferner keinem Zweifel, daß in diesen Punkten eine Bewegung von Elektronen stattfindet, wobei der Charakter dieser Bewegung keine wesentliche Rolle in der weiteren Entwicklung der Theorie spielt. Planck setzt voraus, daß in den lichtausstrahlenden Zentren eine einfache schwingende Bewegung von Elektronen stattfindet. Wir wollen solch ein schwingendes Elektron Oszillator oder Vibrator nennen und wollen annehmen, daß er ν Schwingungen in der Sekunde ausführt. Er sendet dann Strahlen von der gleichen Schwingungszahl ν aus; die entsprechende Wellenlänge wollen wir mit λ bezeichnen. Der Oszillator sendet seine Strahlung auf Kosten der Energie seiner Schwingungen aus, wenn seine Bewegung durch Zufluß neuer Energie nicht unterstützt wird, so muß er in kurzer Zeit, nach Verbrauch seiner ganzen Bewegungsenergie zum Stillstand gelangen; seine Energie verwandelt sich in Strahlung. Ein Zufluß von Energie zum Oszillator findet aber in Wirklichkeit statt. Wenn nämlich eine Strahlung einer bestimmten Schwingungszahl auf einen Oszillator derselben Schwingungszahl ν (auf einen gleichgestimmten Oszillator) auffällt, so regt sie ihn zum Mitschwingen an, wobei die Strahlung absorbiert wird und in die Bewegungsenergie des Elektrons übergeht. Wir haben die bekannte Erscheinung der Resonanz vor uns: der Oszillator, der eine Strahlung von der Schwingungszahl ν aussendet, tritt zu gleicher Zeit als Resonator auf, welcher Strahlen derselben Schwingungszahl ν absorbiert. Setzen wir voraus, daß innerhalb des betreffenden lichtausstrahlenden Körpers eine ungeheure Anzahl gleichartiger Oszillatoren (mit gleicher Schwingungszahl ν) enthalten sind, so wird der ganze Raum zwischen den Atomen des Körpers von einer Strahlung mit der Schwingungszahl ν angefüllt sein, welche von allen Seiten sich über die Oszillatoren ergießt und von ihnen absorbiert wird. Es ist klar, daß sich in der Gesamtheit der Oszillatoren und Resonatoren ein gewisser Gleichgewichtszustand herstellen muß, so daß ihr Energievorrat sich nicht verändert. Im Laufe eines beliebigen Zeitraumes strahlen sie alle zusammen ebensoviel Strahlung von der Schwingungszahl ν aus, als sie in derselben Zeit absorbieren. Nehmen

wir ferner an, daß sich in dem betrachteten Körper Oszillatoren mit allen möglichen Schwingungszahlen ν befinden, wobei ihre Anzahl in jeder Gruppe mit nahezu gleichen Schwingungszahlen ν sehr groß ist. Es erweist sich, daß wenn das Gleichgewicht in allen Gruppen der Oszillatoren erreicht ist, die vom Körper ausgestrahlte Energie genau der schwarzen Strahlung $E(\lambda, T)$ entspricht.¹⁾ Es sei N die Zahl der Oszillatoren, deren Schwingungszahl einem bestimmten ν nahe liegt und ihre Gesamtenergie sei J ; nach der Herstellung des Gleichgewichtes ändert sich diese Größe im Verlaufe der Zeit nicht mehr. Die Energie U eines Resonators ist eine stetig veränderliche Größe; sie wird bestimmt durch die zufällige Intensität des auffallenden Lichtes und schwankt auf und ab, je nachdem im gegebenen Augenblicke die Absorption oder die Emission zufällig überwiegt. Die mittlere Energie U eines Oszillators, berechnet für einen nicht zu kleinen Zeitintervall, hat aber eine ganz bestimmte Größe, welche offenbar gleich $J : N$ ist; sie ist auch gleich dem Mittelwerte der Energie U , genommen über alle Oszillatoren in einem beliebigen Zeitmomente. Sie ist eine Funktion von λ und T , ist verschieden für verschiedene Gruppen der Oszillatoren (verschiedene ν oder λ) und hängt ab von der Temperatur. Planck leitete die wichtige Formel ab:

$$E(\lambda, T) = 2\pi \frac{\nu^3}{c^3} \bar{U}, \quad (1)$$

in der c die Lichtgeschwindigkeit ist. Es muß noch die Größe \bar{U} berechnet werden. Planck macht zunächst die Annahme, daß die Energie U eines Oszillators im Laufe der Zeit alle möglichen Werte annehmen kann, wie wir es soeben auseinandergesetzt haben. Mit dieser sehr naheliegenden und, wie es schien, zweifellos richtigen Annahme erhielt jedoch Planck für $E(\lambda, T)$ eine Formel, welche durch das Experiment nicht bestätigt wurde. Die nach der theoretischen Formel berechnete Abhängigkeit der Größe $E(\lambda, T)$ von λ , d. h. die Energieverteilung im Spektrum des absolut schwarzen Körpers, entsprach nicht der tatsächlichen Energieverteilung, wie sie durch das Experiment hauptsächlich in den Arbeiten von Lummer und Pringsheim (1897, 1900) gefunden war. Da verfiel Planck auf einen unglaublich kühnen Gedanken — und in diesem Augenblick drehte er mit gewaltigem Griff das Steuerrad des Schiffes,

¹⁾ Genauer ausgedrückt: Die Menge der Strahlung mit Wellenlängen zwischen λ und $\lambda + \Delta\lambda$, welche in der Zeiteinheit ausgestrahlt wird, ist gleich $E(\lambda, T) \Delta\lambda$.

welches wir Physik nennen, und siehe da, das Schiff fuhr weiter in neuer Richtung durch ein in seiner Geschichte beispiellos dastehendes Gebiet, wo helle Sonne und dichter Nebel durcheinander gemischt sind, und bis jetzt kann man nicht erkennen, wohin der neue Kurs führt und wann der Nebel sich zerstreuen wird. Dieser Gedanke besteht in folgendem: Planck nahm an, daß ein Oszillator nicht jede beliebige Energie U besitzen kann, sondern daß U immer ein ganzes Vielfaches einer ganz bestimmten elementaren Energiemenge sein muß. Diese Energiemenge ist gewissermaßen ein Energieatom; wir wollen sie mit ε bezeichnen. Es kann also U nur die Werte

$$U = 0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, 4\varepsilon, \dots, n\varepsilon, \dots \quad (2)$$

annehmen, wo n eine ganze Zahl ist. Die Größe ε heißt ein **Quantum** der strahlenden Energie. Ein Oszillator kann nur eine ganze Zahl solcher Strahlungsquanten besitzen. Aus dieser Annahme folgt aber, daß ein Oszillator nicht imstande ist, Strahlungsenergie ununterbrochen zu emittieren und zu absorbieren, so daß seine Energieschwankungen eine stetige Funktion der Zeit bilden. Die Emission und Absorption der Energie geschieht in ganzen Quanten, U ändert sich sprunghaft. Planck hat, wie wir gleich bemerken wollen, späterhin seinen Gedanken abgeändert; er nahm an, daß der Oszillator die Energie zwar in Quanten emittiert, sie jedoch in ununterbrochenem Strom absorbiert. Diese Auffassung hat aber keinen rechten Anklang gefunden und Planck selbst hat sie neuerdings, wie es scheint, fallen lassen. Der ganze Energievorrat J einer gegebenen Oszillatorengruppe (mit einem bestimmten ν , d. h. λ) besteht aus $J:\varepsilon$ -Quanten. Die Wahrscheinlichkeitstheorie gibt an, welche Verteilungen der Quanten im gegebenen Momente unter den N -Oszillatoren möglich sind und wie oft jede bestimmte Verteilung sich verwirklicht. Auf Grund dieser Theorie, der Thermodynamik und einer besonderen Eigenschaft der schwarzen Strahlung, welche von Wien (1893) zuerst theoretisch streng bewiesen wurde und experimentell sich vollkommen bewährte, konnte Planck zunächst beweisen, daß die Quanten ε für die verschiedenen Oszillatorengruppen verschieden sein müssen; es sind nämlich die Quanten ε der Schwingungszahl ν proportional. Den Proportionalitätsfaktor bezeichnete er mit h ; das ist die berühmte Plancksche Konstante, die Königin der modernen Physik. Es ist also:

$$\varepsilon = h \nu . \quad (3)$$

Je größer die Schwingungszahl, desto größer ist das Energiequantum. Bezieht man ν , wie es immer üblich ist, auf eine Sekunde und drückt ε in Erg aus, so ist

$$h = 6,54 \cdot 10^{-27} \text{ Erg} \cdot \text{Sek.} \quad (4)$$

Die Größe h hat dieselbe Dimension wie die in der Mechanik „Wirkung“ genannte Größe, auf welche sich das berühmte Prinzip der kleinsten Wirkung bezieht. Man nennt h zuweilen auch „Wirkungsquantum“, doch meint man, wenn man einfach über Quanten spricht, stets das Energiequantum, d. h. ε . Für einen sichtbaren Strahl mit $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ ist $\varepsilon = 3,9 \cdot 10^{-12} \text{ Erg}$; für die äußersten Röntgenstrahlen mit $\lambda = 0,07 \text{ \AA}$ ist $\varepsilon = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ Erg}$.

Nachdem die Größe des Quantums durch die Beziehung $\varepsilon = h\nu$ bestimmt war, konnte Planck auch die Gestalt der Funktion $E(\lambda, T)$ ableiten. Weder die weiteren Betrachtungen und Rechnungen, welche schließlich zum erwünschten Ziele führten, noch der erhaltene Ausdruck für die Funktion $E(\lambda, T)$, welcher so kompliziert ist, daß wir ihn hier nicht einmal hinschreiben wollen, ist für uns von Wichtigkeit. Wesentlich für alles weitere sind folgende zwei Umstände. Erstens, daß die Ableitung der Formel für die schwarze Strahlung auf einem ganz neuen Gedanken beruht, nämlich auf der Vorstellung, daß die Energie nicht stetig, sondern in einzelnen Quanten, welche von der Schwingungszahl nach der Formel (3) abhängen, emittiert und absorbiert wird. Zweitens, daß $E(\lambda, T)$ ganz zweifellos die wahre gesuchte Abhängigkeit der schwarzen Strahlung von der Wellenlänge und der Temperatur darstellt. Die genauesten experimentellen Forschungen, welche man mit dem künstlichen schwarzen Körper bei den verschiedensten Temperaturen T und im Bereiche aller erreichbaren Wellenlängen λ angestellt hat, haben eine vollständige Übereinstimmung der gemessenen $E(\lambda, T)$ -Werte mit den theoretischen, aus der Planckschen Formel berechneten, erwiesen. Die letzten Messungen dieser Art sind von Rubens (1921) ausgeführt worden. Sie haben endgültig bewiesen, daß Planck durch die Quantenhypothese in der Tat auf die richtige Lösung eines der wichtigsten Probleme der Physik geführt wurde.

So entstand am Anfange des neuen Jahrhunderts die Quantenlehre und es erschien in der Physik eine neue Größe h , die Plancksche Konstante, deren Zahlenwert durch (4) gegeben wird. In den nächsten Paragraphen dieses Kapitels werden wir einen Blick in die Geschichte der siegreichen Eroberung der Physik durch die Größe h und durch die Strahlungsquanten werfen.

§ 5. Einige Anwendungen der Quantentheorie. Wir werden uns hier mit einigen Anwendungen der Quantenlehre befassen; die Darstellung der allerwichtigsten Errungenschaften soll im folgenden Paragraphen erledigt werden.

I. Einsteins Lichtquanten. Die Oszillatoren, d. h. im Endresultate die Körper, in denen sie enthalten sind, entsenden Strahlung von der Schwingungszahl ν in Quanten $h\nu$; dieselben Oszillatoren, d. h. wiederum die materiellen Körper, absorbieren die Strahlung ebenfalls in einzelnen Quanten. Aus einem Körper A fliegen Quanten heraus und ein anderer Körper B absorbiert diese Quanten. Es fragt sich: Was geht in dem Raume zwischen A und B vor sich? Einstein sprach den unendlich kühnen Gedanken aus, daß der Energiestrom der Strahlung auch aus einzelnen Quanten bestehe, welche mit der Lichtgeschwindigkeit c fliegen. Wir wollen sie Lichtquanten nennen, obgleich der Gedanke Einsteins sich natürlich auf alle Arten der sich im leeren Raume ausbreitenden Strahlung bezieht. Diese hier angeführte, allgemein angenommene Benennung soll ausdrücken, daß die uns am nächsten liegende Form der Strahlung, das sichtbare Licht, nach Einstein aus isolierten Lichtteilchen, aus Quanten $h\nu$ besteht, welche allem Anschein nach ganz unabhängig voneinander durch den Raum fliegen. Dieser Gedanke ist offenbar eine Rückkehr zur Newtonschen Emissionstheorie, freilich mit dem wesentlichen Unterschiede, daß der Energieinhalt der Lichtteilchen oder richtiger ausgedrückt, der Strahlungsteilchen in Abhängigkeit von der für jede Teilchensorte charakteristischen Größe ν unbeschränkt variieren kann. Jedoch wissen wir, daß eine große Zahl der verschiedenartigsten Lichterscheinungen verhältnismäßig leicht und einfach erklärt werden kann durch die Hypothese, nach welcher das Licht oder überhaupt die Strahlung eine sich im Raume ausbreitende Schwingungsbewegung ist, wobei die Schwingungszahl ν oder die mit ihr verbundene Wellenlänge λ eine einfache, konkrete und leicht verständliche Bedeutung haben. Augenblicklich ist es für uns sogar gleichgültig, ob wir die alte Theorie der schwingenden Ätherteilchen oder die elektromagnetische Lichttheorie annehmen. Die Wellentheorie erklärt die Reflexion und Lichtbrechung, die Interferenz und die Beugung, die Polarisierung, die doppelte Strahlenbrechung usw. der Lichtstrahlen. Es ist einleuchtend, daß die Lichtquantentheorie keine einzige dieser Grunderscheinungen, mit Ausnahme vielleicht der Reflexion, erklären kann. Die am meisten typische Erscheinung — die Interferenz

des Lichtes — kann man sich unmöglich anders als durch eine Überlagerung mehrerer Schwingungen entstanden denken. Und das ist noch nicht alles. Das im Raume fliegende Quantum ist durch seinen Energievorrat $h\nu$ gekennzeichnet. Die Größe ν jedoch ist der Schwingungslehre (wie auch die mit ihr verbundene Größe λ) entnommen und in dieser Lehre ist ihr Sinn verständlich. Was für einen Sinn aber hat der Buchstabe ν für die Lichtquantentheorie? Ein Häufchen Strahlung mit der Energie $h\nu$ fliegt durch den Raum; ν erscheint dabei als einfacher Zahlenkoeffizient, jedoch von verschiedenem Werte für verschiedene Arten von Quanten. Hier fehlt vollkommen die Vorstellung von einer Zahl, welche aussagt, wie oft eine gewisse Erscheinung in der Zeiteinheit sich abspielt, und um so mehr eine solche Erscheinung, deren Phase sich periodisch und stetig ändert. Ohne diese Vorstellung bleiben aber die oben erwähnten Lichterscheinungen — und vor allem die Interferenz — vollkommen unbegreiflich. Und nichtsdestoweniger werden wir etwas weiter unten eine Reihe solcher Erscheinungen kennen lernen, welche laut zugunsten der Quantentheorie sprechen und andererseits, vom Standpunkte der Wellentheorie, ebenso unverständlich sind, wie die Interferenz vom Standpunkte der Lichtquantentheorie.

II. Die photoelektrischen Erscheinungen. Im § 6 des vierten Kapitels unter Nr. 24 haben wir bereits die photoelektrischen Erscheinungen kennengelernt. Wenn auf die Oberfläche eines Körpers monochromatische (homogene) Strahlen von der Wellenlänge λ oder der Schwingungszahl ν auffallen, so entweichen aus dieser Oberfläche Elektronen; wir nennen sie Photoelektronen. Nun hat es sich erwiesen: 1. je stärker die Intensität des Lichtes, desto größer ist die Zahl der Elektronen; 2. die Anfangsgeschwindigkeit (v) der Photoelektronen hängt nicht von der Intensität des Lichtes ab; 3. die Geschwindigkeit v ist desto größer, je größer ν ist (je kürzer λ). Von den sichtbaren Strahlen sind die violetten besonders wirksam; noch stärker wirken die ultravioletten; die gelben, roten und um so mehr die infraroten Strahlen üben keine bemerkbare Wirkung aus. Hoffnungslos bleibt jeder Versuch, die angeführten drei Gesetze, insbesondere das zweite und dritte, vom Standpunkte der Wellentheorie zu erklären, welche annimmt, daß die Lichtenergie in einem ununterbrochenen Strome dahinfließend, sozusagen in einer geschlossenen Front (Wellenfläche) vorrückt. Einstein war der erste, welcher darauf hinwies, wie leicht alle drei Gesetze zu verstehen sind, sobald man sich auf den Standpunkt der Quantentheorie stellt. Die Strahlung wird von der oberflächlichen Schicht

des Körpers in einzelnen Quanten $h\nu$ absorbiert, wobei jedes absorbierte Quantum ein Elektron herausreißt. Bei dieser Gelegenheit zerfällt die Energie in zwei Teile, von denen der eine für jene Arbeit P verbraucht wird, welche zum Herausreißen der Elektronen aus dem Körper erforderlich ist, der andere aber in die kinetische Bewegungsenergie des Elektrons übergeht, welche $\frac{1}{2} m v^2$ gleich ist, d. h.

$$\frac{1}{2} m v^2 = h\nu - P . \quad (5)$$

Diese Formel erklärt alle drei Gesetze. Die Steigerung der Intensität des Lichtes entspricht einer Vergrößerung der zur Verfügung stehenden Anzahl Quanten und folglich einem Anwachsen der Zahl der herausgerissenen Elektronen (erstes Gesetz). Diese Steigerung der Intensität des Lichtstromes kann aber auf die Geschwindigkeit v der Elektronen nicht einwirken, da ja auf jedes herausfliegende Elektron die frühere Energie $h\nu$ kommt, d. h. ein Quantum (zweites Gesetz). Mit der Steigerung der Zahl ν , d. h. mit der Verkürzung der Wellenlänge des auffallenden Lichtes, muß die Geschwindigkeit v zunehmen (drittes Gesetz). Wir haben hier ein glänzendes Beispiel vor uns, wie einfach auf Grund der Quantenlehre eine solche Gruppe von Erscheinungen erklärt werden kann, die sonst, nach den gewöhnlichen Vorstellungen über den Charakter der Strahlung, vollkommen unverständlich bleibt. Die Formel (5) zeigt, daß die Größe v^2 eine lineare Funktion der Zahl ν sein und bei einem gewissen $\nu = \nu_0 = P:h$ verschwinden muß. Äußerst genaue experimentelle Untersuchungen haben die lineare Abhängigkeit des v^2 von ν bestätigt und ermöglichten dadurch aus photoelektrischen Beobachtungen die Größe h und die Größe P für verschiedene Metalle zu bestimmen. Rote Strahlen rufen keine Photoelektronen hervor, da ihre Quanten zu klein sind, um auch nur die Arbeit P auszuführen.

III. Die Entstehung der Röntgenstrahlen. Wenn Kathodenstrahlen, d. h. ein Strom von Elektronen auf die Antikathode auffallen, so entstehen Röntgenstrahlen mit kontinuierlichem Spektrum (die sogenannten charakteristischen Strahlen wollen wir augenblicklich nicht betrachten). Dieses Spektrum bricht an der Seite der kurzen Wellenlängen, d. h. der wachsenden ν , schroff ab. Auch diese Erscheinung läßt sich sehr einfach mit Hilfe der Quantentheorie erklären. Das mit der Geschwindigkeit v bis zur Antikathode herangeflogene Elektron besitzt die Energie $\frac{1}{2} m v^2$; bei der plötzlichen Bremsung des Elektrons geht seine Energie zum Teil in die Energie der Röntgenstrahlen

über, wobei ein Quantum $h\nu$ entsteht. Es liegt auf der Hand, daß $h\nu$ kleiner sein kann als $\frac{1}{2}mv^2$, nämlich dann, wenn ein Teil der Energie des Elektrons zur Erzeugung anderer Energiearten verbraucht wird, z. B. zum Erwärmen der Antikathode; in keinem Falle jedoch kann $h\nu > \frac{1}{2}mv^2$ sein. Der Grenzwert ν_0 wird durch die Gleichung

$$h\nu_0 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6)$$

bestimmt und bildet jenes ν_0 , bei welchem das kontinuierliche Röntgenspektrum abbricht. Experimentelle Untersuchungen haben die genaue Proportionalität zwischen dem Grundwerte ν_0 und der Energie der Elektronen bestätigt.

IV. Sekundäre Kathodenstrahlen. Wir wollen den Strom der Elektronen, welcher die Antikathode trifft und die Röntgenstrahlen hervorruft, primäre Kathodenstrahlen nennen. Wenn Röntgenstrahlen auf die Oberfläche eines beliebigen Körpers A fallen, so entweichen von dort Elektronen, welche sekundäre Kathodenstrahlen bilden. In diesem Falle haben wir es mit der photoelektrischen Erscheinung im Gebiete der Röntgenstrahlen zu tun. Da nun das Quantum dieser Strahlen ungefähr 10000mal größer ist als das Quantum des sichtbaren Lichtes, können wir die Größe P in der Formel (5) vernachlässigen und sie folgendermaßen schreiben

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu \quad (7)$$

Es ist im höchsten Grade interessant zu bemerken, daß die Geschwindigkeit v des sekundären Elektrons von der Entfernung zwischen dem Körper A und der Röntgenröhre, d. h. von der Quelle der Röntgenstrahlen, nicht abhängt. Aber noch wichtiger ist die Tatsache, daß diese Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des Elektrons im primären Kathodenstrahl ungefähr gleich ist. Vom Standpunkte der Quantenlehre ist dies alles vollkommen verständlich, insbesondere wenn wir es mit monochromatischen Röntgenstrahlen zu tun haben. Die Energie des primären Elektrons in der Röntgenröhre erzeugt ein Quantum und dieses geht wiederum in der Oberflächenschicht des Körpers A in die Energie des sekundären Elektrons über. Die Unabhängigkeit von der Entfernung erklärt sich dadurch, daß Quanten gleicher Größe entstehen und absorbiert werden. Einige Forscher erblicken in dieser Unabhängigkeit eine wesentliche Stütze der oben besprochenen Einsteinschen Lichtquantentheorie. Letztere vereinfacht das ganze Bild außerordentlich und erleichtert das Verständnis der hier beschriebenen Erscheinungen. Es bleiben

natürlich alle jene Einwände gegen die Lichtquantentheorie in Kraft, auf die wir oben hingewiesen haben.

V. Phosphoreszenz, Fluoreszenz und Ionisation. Wenn auf einen phosphoreszierenden oder fluoreszierenden Körper Strahlen von der Schwingungszahl ν auftreffen, so emittiert dieser Körper Strahlen von der Schwingungszahl ν' , wobei $\nu' < \nu$ ist; das ist das Gesetz von Stokes. Vom Standpunkt der Wellentheorie ist dasselbe kaum verständlich; die Quantenlehre jedoch erklärt es uns ganz einfach. Auf einen Körper fallen Strahlen; sie werden von seinen Molekülen als einzelne Quanten $h\nu$ absorbiert; dieselben Moleküle aber emittieren das Quantum $h\nu'$. Dem Prinzip der Erhaltung der Energie zufolge kann $h\nu'$ nur gleich oder kleiner, jedoch niemals größer als $h\nu$ sein. Da aber ein Teil der Energie $h\nu$ auch in andere Energieformen übergehen kann, so erhalten wir $\nu' < \nu$, d. h. das Stokessche Gesetz. Noch merkwürdiger erscheint folgende Tatsache: es erweist sich, daß während der Beleuchtung eines phosphoreszierenden Körpers nur eine sehr geringe Anzahl von Molekülen erregt wird, d. h. Strahlung absorbiert und emittiert. Das bleibt unverständlich, wenn wir das Vorhandensein einer ununterbrochenen Wellenfront zulassen, welche alle Moleküle der oberflächlichen Schicht treffen und sie zur Lichtabsorption veranlassen muß. Vom Standpunkte der Lichtquanten wird die Erscheinung verständlich: die Wellenfront ist nicht ununterbrochen, sondern besteht sozusagen aus einzelnen Flecken, zwischen denen Stellen sind, welche keine Strahlung enthalten; es werden nur diejenigen Moleküle angeregt, welche von den Flecken, d. h. den Quanten getroffen werden. Die Idee eines fleckenartigen Baues der Wellenfläche hatte schon früher J. J. Thomson (1904) ausgesprochen; er bedurfte derselben, um zu erklären, warum bei der Ionisation der Gase durch die ultravioletten oder Röntgenstrahlen nur ein ganz geringer Teil der Gasmoleküle ionisiert wird. Die Erklärung ist dieselbe wie die oben angeführte.

Das Stokessche Gesetz trifft auch im Gebiete der Röntgenstrahlen zu. Wenn man eine dünne Platte eines Stoffes mit Röntgenstrahlen beleuchtet und dabei die Absorption der Strahlen mißt, so erhält man, beim Ansteigen der Schwingungszahl ν ein solches $\nu = \nu_0$, bei welchem die Absorption plötzlich außerordentlich zunimmt. In diesem Augenblicke beginnt der untersuchte Stoff sogenannte charakteristische Röntgenstrahlen mit einem Linienspektrum zu emittieren. Alle Linien haben, wie es sich erweist, Schwingungszahlen ν , welche kleiner als ν_0 sind.

VI. Die spezifische Wärme. Das Kapitel über die spezi-

fische Wärme war das erste von denen, die von der Quantenlehre allmählich erobert wurden, nachdem diese Lehre in der Strahlungstheorie entstanden war. Bekanntlich wird die spezifische Wärme durch die Zahl der Grammkalorien gemessen, welche erforderlich sind, um ein Gramm Stoff auf einen Grad zu erwärmen. Die Molekular- oder Atomwärme (für einatomige Substanzen) bezieht sich auf ein Grammolekül oder auf ein Grammatom Stoff. Sie ist dem Produkte aus der gewöhnlichen spezifischen Wärme mit dem Molekular- oder Atomgewicht des Stoffes gleich. Auf empirischem Wege hat man eine Reihe Gesetzmäßigkeiten für die spezifische Wärme festgestellt; unter ihnen ist das sogenannte Gesetz von Dulong und Petit (1819) besonders wichtig, demzufolge die Atomwärme fester Grundstoffe sich der Zahl sechs nähert. Bis 1907 wurden eine Menge Versuche gemacht, diese und andere Gesetzmäßigkeiten theoretisch zu erklären; so entstand z. B. die Theorie, welche auf dem Gesetze der gleichmäßigen Verteilung der kinetischen Energie über die Freiheitsgrade des gegebenen mechanischen Systems beruht. Alle diese Versuche führten zu keinem befriedigenden Resultate, da es nicht gelang, die beobachtete Abhängigkeit der spezifischen Wärme von der Temperatur und vor allem die starke Abnahme dieser Größe bei niedrigen Temperaturen zu erklären. Im Jahre 1907 entwickelte Einstein als erster eine vollkommen neue Theorie, aus welcher eine Formel hervorging, welche die Abhängigkeit der spezifischen Wärme von der Temperatur ausdrückt. Diese Theorie geht von dem Gedanken aus, daß die Wärmeverbinder mit jenen Vibratoren, welche die Strahlung emittieren und welchen wir den Namen Oszillatoren beilegen, im Wärmegleichgewicht stehen müssen. Für die Atomwärme C_v bei konstantem Volumen erhielt man eine Formel der Gestalt $C_v = F(h\nu, T)$; sie enthält die Größe h , welche für die Quantentheorie der Strahlung charakteristisch ist. Die Formel Einsteins gibt einen steilen Abfall von C_v bei niedrigen Temperaturen; das Experiment gibt im allgemeinen Resultate, welche mit der Formel im Einklang sind, nur daß der Abfall in Wirklichkeit nicht so steil ist. Debye und andere Forscher haben die Einsteinsche Theorie abgeändert, aber der oben ausgesprochene Grundgedanke ist unverändert geblieben. Wir bemerken hier, daß die Theorien von Debye und jene von Born und Kármán zu dem Resultate geführt haben, daß in der Nähe des absoluten Nullpunktes die spezifische Wärme proportional der dritten Potenz der absoluten Temperatur anwachsen muß. Dieses Gesetz fand eine vollkommene Bestätigung durch das Experiment.

Wir wollen uns auf diese fünf Fragen, in denen die Quantentheorie und insbesondere die Plancksche Konstante h eine wesentliche Rolle spielen, beschränken. Wir könnten noch andere Fragen hinzufügen. Hierher gehört z. B. die Frage über die sogenannte chemische Konstante, deren Bedeutung für die Theorie des Übergangs fester und flüssiger Zustände in gasförmige (Sublimation und Verdampfung) und für die Lehre vom chemischen Gleichgewicht Nernst hervorgehoben hat und deren theoretischer Ausdruck die Größe h enthält. Dieser Ausdruck, den O. Stern (1913) abgeleitet hat, zeigt eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Wir könnten auch noch auf die Versuche der Einführung des Begriffes der Quanten in die Lehre von der Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme hinweisen. Wir gehen nun zu der wichtigsten Anwendung der Quantentheorie über, welche zum Begriffe des „Quantelns“ geführt hat.

§ 6. Der Atombau und die Theorie von Niels Bohr. Im Jahre 1913 veröffentlichte der dänische Forscher Niels Bohr eine Reihe von Abhandlungen, in welchen er eine neue Theorie des Atombaues entwickelte. Dieses Jahr kann als ein neuer Wendepunkt in der Geschichte der Physik angesehen werden. In diesen Abhandlungen trat die Größe h in einem neuen Lichte auf, ihre universelle Bedeutung trat deutlich zutage und in der Wissenschaft tauchte eine neue Methode der theoretischen Untersuchung physikalischer Erscheinungen auf, einer Methode, welche ebenso mächtig, wie auch rätselhaft und unverständlich ist. Von diesem Augenblicke an wurde die ganze Physik von jenem neuen Geist, dessen Charakteristik dieses Buch gewidmet ist, ergriffen. **Die neueste Geschichte der Physik muß vom Jahre 1913 an gerechnet werden.**

Bereits seit langer Zeit hatte eine Reihe von Tatsachen die Forscher auf den Gedanken geführt, daß die Atome keine einfachen Körnchen, wesentlich verschieden in verschiedenen Grundstoffen, seien, wie man sich dieselben früher vorstellte. Allmählich wurde es klar, daß die Atome einen komplizierteren Bau haben und elektrische Ladungen enthalten müssen. Darauf deutete die elektrolytische Dissoziation der Lösungen, von der wir bereits in § 2 des fünften Kapitels gesprochen haben. Das Molekül des Elektrolyten zerfällt in zwei Ionen, von denen das Anion ein oder einige Elektronen enthält, das Kation aber die entsprechende positive Ladung; am einfachsten ist es anzunehmen, daß das anfangs an und für sich neutrale Kation seine Elektronen dem Anion abgibt. Wir beobachten eine analoge Erscheinung bei der Ionisation der Gase (§ 6

des vierten Kapitels), freilich mit dem Unterschiede, daß das negative Ion ein freies Elektron sein kann. Einer derartigen Ionisation können auch einatomige Gase unterliegen, was von großer Wichtigkeit ist, denn es weist deutlich darauf hin, daß die Ladungen nicht nur in den Molekülen, sondern auch in den einzelnen Atomen enthalten sind. Das letztere wird auch durch die radioaktiven Erscheinungen bestätigt (§ 6 des vierten Kapitels, Nr. 27), bei denen aus den Atomen unter anderem auch β -Teilchen, d. h. Elektronen herausfliegen.

Ohne uns bei den früheren Versuchen, ein Atommodell zu konstruieren, aufzuhalten, wollen wir bloß folgendes bemerken: ein jedes Modell hat damit zu rechnen, daß jedes Atom in seinem natürlichen, neutralen Zustande gleiche, genauer gesagt äquivalente Mengen positiver und negativer Elektrizität enthalten muß. Das jetzt allgemein angenommene Atommodell wurde von Rutherford im Jahre 1911 vorgeschlagen. Nach der Ansicht dieses Forschers besteht das Atom aus einem Kerne, welcher die volle positive Ladung des Atoms in sich birgt; um den Kern herum kreisen die Elektronen. Die ganze Masse des Atoms ist im Kerne konzentriert, der übrigens auch Elektronen enthalten kann. Die positive Ladung ist der Summe der Ladungen aller Elektronen, sowohl der um den Kern kreisenden äußeren, als auch der im Kerne enthaltenen, inneren, äquivalent. Nur der Kern des Wasserstoffatoms enthält keine Elektronen. Das Atom erinnert in seinem Bau an das Sonnensystem: der schwere Kern entspricht der Sonne, die leichten Elektronen den Planeten. Der Unterschied der verschiedenen Grundstoffe voneinander ist durch die Zahl der äußeren, außerhalb des Kernes befindlichen Elektronen, bedingt. Im Jahre 1913 sprach van den Broek zuerst den Gedanken aus, daß die Zahl der äußeren Elektronen im Atome eines Grundstoffes seiner Ordnungszahl im periodischen System Mendelejeffs gleich ist. Etwas vorgreifend möchte ich bemerken, daß am Ende des Jahres 1913 und zu Anfang des Jahres 1914 zwei bemerkenswerte Arbeiten eines jungen englischen Forschers Moseley (gefallen im Kriege 1915) erschienen, welcher auf Grund der Bohrschen Theorie in ihrer Anwendung auf die Röntgenstrahlen gezeigt hat, daß man aus dem Spektrum dieser Strahlen, welche man erhält, wenn der betreffende Grundstoff auf der Antikathode sich befindet, seine Ordnungszahl bestimmen kann. Auf diesem Wege hat Moseley die Ordnungszahlen aller bekannten Grundstoffe bestimmt. Es hat

sich erwiesen, daß die Ordnungszahl des Uran gleich 92 ist, und daß folglich bis zum Uran (einschließlich) nicht mehr als 92 Grundstoffe, abgesehen von den Isotopen (§ 2 des vierten Kapitels, Nr. 4), vorhanden sein können; ferner erwies es sich, daß fünf damals noch nicht entdeckte Grundstoffe mit den Nummern 43, 61, 75, 85 und 87 existieren müssen. Es besteht also das Wasserstoffatom aus einem positiven Kerne, welcher von einem Elektron umkreist wird; ein Heliumatom hat zwei äußere Elektronen; ein Lithiumatom hat 3 Elektronen; ein Berylliumatom — 4, Kohlenstoff — 6, Sauerstoff — 8, *Al* — 13, *K* — 19, *F* — 26, *Br* — 35, *Ag* — 47, *Ba* — 56, *Au* — 79, *Pb* — 82, *Ra* — 88 und schließlich ein Uranatom — 92 Elektronen, welche den positiven Kern umkreisen, in dessen Inneren, unzweifelhaft auch noch eine große Anzahl Elektronen enthalten ist.

Bevor wir zur Bohrschen Theorie übergehen, wollen wir das in § 4 des vierten Kapitels unter Nr. 11 über die Gesetzmäßigkeiten in den Spektren Gesagte in Erinnerung bringen und vervollständigen. Wir sahen, daß die Schwingungszahlen ν in der Balmerschen Serie der Spektrallinien des Wasserstoffs durch die Formel

$$\nu = A \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (8)$$

ausgedrückt werden, worin A eine Konstante und $k = 3, 4, 5$ usw. sind. Hier ist ν gleich der Zahl der Wellen, welche auf die Strecke c entfallen, wo c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet, da ja $\nu \lambda = c$ ist. Wir wollen an Stelle von ν die sogenannte Wellenzahl $n = \nu : c$ einführen, welche der Anzahl Wellen auf der Strecke von einem Zentimeter gleich ist. Bezeichnen wir weiter die Größe $A : c$ mit R , so wird aus der Formel (8), weil $n = \nu : c = 1 : \lambda$ ist, worin λ in Zentimetern ausgedrückt ist, folgende Formel:

$$n = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right) . \quad (9)$$

Der Koeffizient R wird die Rydbergsche Konstante genannt; sie ist gleich

$$R(H) = 109677,691 . \quad (10)$$

Wir schreiben $R(H)$ um zu betonen, daß sie sich auf Wasserstoff bezieht. Im Heliumspektrum findet sich eine Linienserie, deren Wellenzahl durch die Formel

$$n = 4R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (11)$$

ausgedrückt wird, wobei R , welches wir hier mit $R(H\epsilon)$ bezeichnen

wollen, sich von $R(H)$, wenn auch in sehr geringem Maße, unterscheiden.

Es ist:

$$R(H_e) = 109722,144 \quad (12)$$

die Formeln (10) und (12) ergeben:

$$\frac{R(H_e)}{R(H)} = 1,00041 \quad (13)$$

Gehen wir nun schließlich zur Theorie Bohrs über, in welcher das Rutherfordsche Atommodell rückhaltslos angenommen wird. Diese Theorie bezieht sich vor allem auf ein Atom, welches aus einem positiven Kern besteht, den ein einziges Elektron umkreist, d. h. auf das Wasserstoffatom und das ionisierte Heliumatom, das eins von seinen zwei Elektronen verloren hat. Sie könnte auch auf ein Lithiumatom Anwendung finden, welches zwei von seinen drei Elektronen verloren hätte; es ist aber bisher noch nicht gelungen, eine derartige Ionisation des Lithiumdampfes zu beobachten. Da wir hier kein Lehrbuch schreiben, so haben wir auch nicht die Absicht, wenn auch in Kürze, einen Abriß der Bohrschen Lehre zu geben. Wir wollen die Bohrsche Theorie nur insoweit darstellen, als es für uns nötig ist, um jene neuen Gedanken, welche uns bewegen haben das Jahr 1913 als Beginn der neuesten Geschichte der Physik zu bezeichnen, hervortreten zu lassen. Solcher Gedanken gibt es drei; alle drei sind gleich neu, gleich auffallend und wir können etwas voregreifend sagen, gleich unverständlich. Diese drei Gedanken wollen wir jetzt besprechen. Wir bezeichnen sie als Postulate.

I. Um den positiven Kern kreist ein Elektron. Die Wechselwirkung des Kerns und des Elektrons wird durch das Coulombsche Gesetz bestimmt, welches sich seiner Form nach vom universellen Gravitationsgesetz nicht unterscheidet. Aus diesem Grunde ist auch die Bewegung des Elektrons um den Kern vollkommen der Bewegung eines Planeten um die Sonne ähnlich; sie muß den Keplerschen Gesetzen gehorchen und im allgemeinen in elliptischen Bahnen verlaufen. Bohr untersuchte der Einfachheit halber nur die kreisförmigen Bahnen. Das Elektron bewegt sich auf solch einer Bahn mit einer konstanten Geschwindigkeit v . Die Masse des Elektrons sei mit m , der Halbmesser der Bahn mit a bezeichnet. Die Größe mv heißt die Bewegungsgröße, das Produkt mva das Moment der Bewegungsgröße des Elektrons. Diese Größe hat dieselbe Dimension ($M L^2 T^{-1}$) wie auch die „Wirkung“ und folglich dieselbe, wie die Plancksche Konstante h . Aus den Gesetzen der

elementaren Mechanik folgt, daß das Elektron sich auf jeder beliebigen Kreisbahn bewegen kann, d. h. der Halbmesser der Bahn kann eine beliebige Größe haben, von welcher die Geschwindigkeit v , mit der sich das Elektron bewegt, abhängt.

Das **erste Postulat Bohrs** besteht in folgendem: das Elektron kann sich nicht auf einer Bahn von beliebigem Halbmesser bewegen. Es gibt eine Reihe vollkommen bestimmter „möglicher“ Bahnen, deren Halbmesser wir in der Reihenfolge ihrer Größe mit $a_1, a_2, a_3, \dots, a_i$ usw. bezeichnen. Diese Halbmesser werden durch die Gleichung

$$m v_i a_i = i \frac{h}{2\pi} \quad (14)$$

bestimmt, worin i die Ordnungsnummer der möglichen Bahn und v_i die Geschwindigkeit des Elektrons auf dieser Bahn bedeuten. Auf den Nenner 2π kommen wir noch später zurück. Die Gleichung (14) besagt, daß das Moment der Bewegungsgröße des Elektrons einem ganzen Vielfachen von $h:2\pi$ gleich sein muß. Von den „möglichen“ Bahnen besitzt die dem Kerne nächstliegende die größte Stabilität. Ihr Halbmesser ist a_1 und das Elektron kann auf ihr beliebig lange verweilen. Die Formel (14) macht gewissermaßen eine Auswahl der möglichen Bahnen unter den unzähligen denkbaren; diese Bahnen kann man als „stationäre“ bezeichnen.

II. Die sogenannte klassische Elektrodynamik, welche in der Maxwell'schen Theorie und der Elektronentheorie ihren Ausdruck fand, lehrt, daß ein in beschleunigter Bewegung begriffenes Elektron unbedingt ausstrahlen muß, d. h. die Energie seiner Bewegung muß in Strahlung übergehen. Diese Forderung bezieht sich in gleicher Weise auf den Fall einer geradlinigen Bewegung mit veränderlicher Geschwindigkeit, als auch auf eine krummlinige, wenn auch gleichförmige Bewegung, bei der wir es mit der sogenannten Normalbeschleunigung $v^2:R$ zu tun haben. R bedeutet hier den Krümmungsradius der Bahn des Elektrons in dem Punkte, in welchem seine Geschwindigkeit gleich v ist. Es schien vollkommen unmöglich sich vorzustellen, daß ein gleichmäßig auf einer kreisförmigen Bahn sich bewegendes Elektron seine Bewegungsenergie nicht ununterbrochen als Strahlungsenergie verausgabte sollte; seine Bewegung muß schließlich zum Stillstande kommen.

Das **zweite Postulat Bohrs**: Das Elektron strahlt nicht aus, wenn es auf einer der stationären Bahnen kreist, welche der Gleichung (14) entsprechen.

III. Bezeichnen wir mit i und k die Ordnungsnummern zweier stationärer, d. h. „möglicher“ Bahnen des Elektrons, wobei $k > i$ ist, so daß die i -Bahn näher zum Kern liegt als die k -Bahn. Wenn das Elektron auf der i -Bahn kreist, so enthält die Gesamtheit von Kern und Elektron einen gewissen Energievorrat, welchen wir mit W_i bezeichnen wollen. Sie setzt sich zusammen aus der potentiellen Energie P der gegenseitigen Anziehungskraft zwischen Kern und Elektron und der kinetischen Energie L des sich bewegenden Elektrons oder genauer ausgedrückt, des Elektrons und des Kernes zusammen, weil sie nämlich beide um ihren gemeinsamen Massenmittelpunkt kreisen. Wenn das Elektron auf der stationären k -Bahn kreist, bezeichnen wir die ganze Energie des Atoms mit W_k . Die Rechnung (vgl. unten) zeigt, daß, wenn $k > i$ ist, so ist auch

$$W_k > W_i . \quad (15)$$

Wenn das Elektron von der k -Bahn auf die i -Bahn überspringt und sich dem Kerne nähert, so verliert das Atom die Energie $W_k - W_i$.

Das **dritte Postulat Bohrs**: Wenn das Elektron von der k -Bahn auf die i -Bahn überspringt, wobei $k > i$ ist, so geht die von dem Atom verlorene Energie $W_k - W_i$ in ein Quantum strahlender Energie über. Daraus folgt die Gleichung:

$$W_k - W_i = h \nu . \quad (16)$$

Die Schwingungszahl ν der auf diese Weise entstehenden Strahlung ist gleich

$$\nu = \frac{1}{h} (W_k - W_i) , \quad (17)$$

und die Wellenzahl

$$n = \frac{1}{h c} (W_k - W_i) . \quad (18)$$

§ 7. Bohrs Theorie (Fortsetzung). Im vorhergehenden Paragraphen haben wir die drei Grundgedanken oder Postulate, wie man sie gewöhnlich zu benennen pflegt, welche das Fundament der Theorie Bohrs bilden, scharf hervorgehoben. Jetzt wollen wir in Kürze zeigen, zu welchen Formeln diese Theorie führt. Es bewege sich das Elektron mit der Ladung e und der Geschwindigkeit v_i auf der i -Bahn, deren Halbmesser a_i ist, und es sei E die Ladung des Kernes. Für das Wasserstoffatom ist $E = e$, für das Heliumatom $E = 2e$; in Wirklichkeit enthält der Kern des Heliumatoms eine positive Ladung $4e$ und zwei Elektronen (Ladung $2e$); m sei die

Masse des Elektrons. Indem wir die vom Kerne auf das Elektron ausgeübte Anziehungskraft $E e : a^2$, dem Produkte aus der Masse m und der Normalbeschleunigung $v_i : a^2$ gleichsetzen, erhalten wir

$$E e = m a_i \cdot v_i^2 . \quad (19)$$

Die Formeln (14) und (19) bestimmen die Halbmesser a_i der möglichen (stationären) Bahnen und die Geschwindigkeiten v_i auf diesen Bahnen.

Wir erhalten:

$$a_i = \frac{h^2}{4\pi^2 m E e} i^2 , \quad (20)$$

$$v_i = \frac{2\pi E e}{h} \cdot \frac{1}{i} . \quad (21)$$

Wir sehen, daß die Halbmesser der möglichen Bahnen wie die Quadrate der aufeinander folgenden ganzen Zahlen 1, 2, 3 usw. zunehmen. Für den Halbmesser der ersten, am meisten stabilen Bahn ($i = 1$) erhalten wir:

$$a_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 m E e} , \quad (22)$$

für Wasserstoff ($E = e$)

$$a_1(H) = \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2} , \quad (23)$$

für Helium ($E = 2e$)

$$a_1(He) = \frac{1}{2} a_1(H) . \quad (24)$$

Die kinetische Energie des Elektrons ist gleich [siehe (14)]

$$L_i = \frac{1}{2} m v_i^2 = \frac{E e}{2 a_i} . \quad (25)$$

Die potentielle Energie:

$$P_i = C - \frac{e E}{a_i} , \quad (26)$$

wobei C die potentielle Energie bei unendlicher Entfernung des Elektrons vom Kerne bedeutet.

Die volle Energie des Atoms ist:

$$W_i = L_i + P_i = C - \frac{e E}{2 a_i} .$$

Wenn wir a_i aus (20) einsetzen, so erhalten wir:

$$W_i = C - \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{h^2 i^2} . \quad (27)$$

Einen gleichen Ausdruck erhalten wir für W_k ($k > i$). Wenn wir W_i und W_k in die Formel (18) einsetzen, so erhalten wir:

$$n = \frac{2\pi^2 m E^2 e^2}{c h^3} \left\{ \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right\}. \quad (27a)$$

Diese Formel bedarf aber noch einer Verbesserung. Wir haben vorausgesetzt, daß das Elektron um einen unbeweglichen Kern kreist. In Wirklichkeit kreisen Elektron und Kern, wie schon erwähnt, mit gleicher Winkelgeschwindigkeit um ihren gemeinsamen Massenmittelpunkt. Wenn M die Kernmasse ist, d. h. das Atomgewicht des betreffenden Grundstoffes, dann erhält man durch eine einfache Rechnung anstatt (27a):

$$n = \frac{2\pi^2 m E^2 e^2}{c h^3} \frac{M}{M + m} \left\{ \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right\}. \quad (28)$$

Nehmen wir für Wasserstoff $M(H) = 1$ an, so erhalten wir $m = \frac{1}{1840}$. Für Wasserstoff ist $E = e$ und

$$n = \frac{2\pi^2 m e^4}{c h^3} \frac{1}{1 + \frac{1}{1840}} \left\{ \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right\} \quad (29)$$

für Helium $E = 2e$ und $M(He) = 4$

$$n = 4 \cdot \frac{2\pi^2 m e^4}{c h^3} \frac{4}{4 + \frac{1}{1840}} \left\{ \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right\}. \quad (30)$$

Die beiden letzten Formeln müssen uns die Wellenzahlen aller Strahlen geben, welche vom Wasserstoff und vom Helium ausgesandt werden. Wenn wir $i = 2$ setzen, d. h. voraussetzen, daß das Elektron von der dritten, vierten, fünften usw. Bahn auf die zweite Bahn überspringt, so erhalten wir für n Formeln, welche ihrem Aussehen nach vollständig mit den Formeln (9) für die Balmerische Serie des Wasserstoffs und (11) für eine der Spektralserien des Heliums übereinstimmen. Der Vergleich von (29) mit (9) gibt für die Rydbergsche Konstante, wenn man den zweiten Faktor, welcher sich von der Einheit wenig unterscheidet, vernachlässigt, den Ausdruck:

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{c h^3}. \quad (31)$$

Setzen wir die Zahlenwerte ein: die Ladung des Elektrons $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ CGS. el. stat. Einheiten, die Masse des Elektrons $m = 0,9 \cdot 10^{-27}$ Gramm, $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/Sek., $h = 6,54 \cdot 10^{-17}$ Erg. Sek. [vgl. (4)], so erhalten wir:

$$R = 1,096 \cdot 10^5, \quad (32)$$

d. h. genau jene Zahl [vgl. (10) und (12)], welche auf empirischem Wege gefunden wurde. Die zweiten Faktoren in (29) und (30) zeigen, daß R nicht genau denselben Wert für Wasserstoff und Helium hat, und zwar

$$\frac{R(\text{He})}{R(\text{H})} = \frac{4}{4 + \frac{1}{1840}} : \frac{1}{1 + \frac{1}{1840}} = 1,00041 \quad (33)$$

in wunderbarer Übereinstimmung mit dem Ausdruck (13).

Wir wollen noch hinzufügen, daß beim Einsetzen der oben angeführten Zahlengrößen für e , m und h in die Formel (23), wir den Halbmesser der ersten stationären Bahn des Elektrons im Wasserstoffatom

$$a_1(\text{H}) = 0,528 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad (34)$$

erhalten. Setzt man in die Formel (29) und (30) $i = 1$ ein, so erhält man die Wellenzahlen der Serien der Spektrallinien, welche durch das Überspringen des Elektrons von der zweiten, dritten, vierten usw. Bahn auf die erste hervorgerufen werden; setzt man $i = 3$, so bestimmen die Formeln (29) und (30) die Spektrallinien, welche durch die Sprünge von der vierten, fünften, sechsten usw. Bahn auf die dritte bedingt werden. Linien, welche diesen Serien angehören, sind tatsächlich in den Spektren des Wasserstoffes und des Heliums gefunden worden.

Alles oben erwähnte bezieht sich auf den Fall, wenn nur ein Elektron um den Atomkern kreist, d. h. auf Wasserstoff und ionisiertes Helium. Wir sahen, daß die Spektralserien anderer Elemente durch kompliziertere Formeln ausgedrückt werden, und das ist leicht erklärlich. Wenn zwei Elektronen um den Kern kreisen, dann ist die Aufgabe der Berechnung ihrer Bewegung nichts anderes als das in der Astronomie berühmte „Problem der drei Körper“, welches bis jetzt noch nicht gelöst ist. Wenn die Zahl der Elektronen zwei übersteigt, dann kann von einer theoretischen Berechnung ihrer Bewegung erst recht keine Rede sein. Übrigens gelang es Sommerfeld die von vielen Seiten vorgeschlagenen empirischen Serienformeln abzuleiten, indem er den Ausdruck (26) für die potentielle Energie des Atoms durch eine kompliziertere Formel ersetzte. Wir haben oben die Arbeiten von Moseley erwähnt. Wir wiederholen noch einmal: Die Zahl der um den Kern kreisenden Elektronen ist der Ordnungsnummer des Grundstoffes in dem periodischen System gleich.

Fassen wir alles, was wir über das von Rutherford vorgeschlagene Atommodell und über die Theorie Bohrs gesagt haben, in folgenden vier Punkten zusammen:

I. Ein Atom besteht aus einem positiven Kerne, welcher von Elektronen umkreist wird; die Zahl derselben ist der Ordnungszahl des Grundstoffes gleich. Die Grundstoffe unterscheiden sich voneinander hauptsächlich durch die Zahl der äußeren Elektronen und außerdem durch den inneren Bau des Kernes. Die neue Lehre von der Struktur des Atoms hat folglich die wahre Natur des Mendelejeffschen Systems aufgedeckt (§ 8 des vierten Kapitels unter Nr. 3).

II. Es gibt überhaupt keine besondere „Materie“, sondern nur zwei Elektrizitäten, aus denen das Weltall zusammengewebt ist.

III. Die Theorie von Bohr hat folgendes geleistet:

Erstens erklärte sie uns die Entstehung der sichtbaren, ultravioletten und infraroten Linien- und Bandenspektren (vgl. unten).

Zweitens erklärte sie uns die Entstehung der Spektralserien.

Drittens konnte sie den Zahlenwert der Rydbergschen Konstanten R aus der Ladung e , der Masse m des Elektrons und der Planckschen Konstanten h genau berechnen.

Viertens gab sie uns die Erklärung des Umstandes, daß $R(H)$ und $R(He)$ sich ein wenig voneinander unterscheiden, und sie hat mit größter Genauigkeit das Verhältnis dieser beiden Zahlen festgestellt. Wir werden sehen, daß die Sache damit noch nicht beendet ist, denn wir werden im folgenden Paragraphen noch einen fünften Punkt finden.

§ 8. Das Quanteln. Sommerfelds Erklärung der Entstehung der Satelliten von Spektrallinien. Die Formel (14) sondert aus allen denkbaren Bahnen diejenigen aus, welche tatsächlich möglich sind und deren Halbmesser einer bestimmten Bedingung unterworfen ist, deren wesentlicher Zug in dem Auftreten der Größe $i h$, wo i eine ganze Zahl ist, besteht. Eine solche Bedingung nennt man eine Quantenbedingung; die Aufstellung einer solchen Bedingung nennt man das Quanteln, ein Verfahren, welches zur Schaffung eines neuen Zeitwortes „quanteln“ Veranlassung gegeben hat. In unserem Falle haben wir durch Einführung der Bedingung (14) die Bahn des Elektrons oder genauer, da die Bahn durch eine Größe, ihren Halbmesser, bestimmt wird, den Halbmesser gequantelt, was uns die möglichen oder, wie man zu sagen pflegt, die erlaubten Halbmesser geliefert hat. Wir bemerken noch, daß einem jeden solchen erlaubten Halbmesser ein bestimmter Energievorrat

des Systems, d. h. des Atoms entspricht; dieser Vorrat wird durch die Formel (27) ausgedrückt.

Seit 1913 ist das Quanteln in alle Abschnitte der Physik, welche mit Atomsystemen zu tun haben, eingedrungen. Es wurde zu einem mächtigen Werkzeuge beim Aufbau von Theorien der verschiedenartigsten physikalischen und chemischen Erscheinungen. Hier haben wir es mit einer weitgehenden Verallgemeinerung jenes Verfahrens zu tun, in dessen Benutzung Bohr mit der Quantenbedingung (14) den ersten bedeutungsvollen Schritt machte. Gesetzt, es seien für die vollständige Beschreibung des Zustandes, in welchem im gegebenen Zeitpunkte ein Atomsystem sich befindet, die Zahlenwerte einer Reihe von voneinander unabhängigen Größen A, B, C, D usw. erforderlich; von diesen Größen soll auch der Energievorrat des betrachteten Systems abhängen. Die Quantentheorie oder, besser gesagt, die Theorie des Quantelns geht von folgender Behauptung aus, welche den Charakter eines Postulats hat:

Jedes Atomsystem kann dauernd (stationär) nur in bestimmten erlaubten Zuständen verharren, welche bestimmten Zahlenwerten $A_1, A_2, A_3, \dots, B_1, B_2, B_3, \dots, C_1, C_2, C_3, \dots$ usw. der Größen A, B, C usw. entsprechen, die zur vollständigen Beschreibung des Zustandes des Systems erforderlich sind. Verschiedenen möglichen stationären Zuständen des Systems entsprechen verschiedene Werte seines Energievorrates. Die Größen A, B, C usw., sowie die Energie des Systems können sich nur sprungweise ändern, was man sich als einen sehr schnell verlaufenden Vorgang vorzustellen hat. Zur Bestimmung der stationären Zustände muß jede der Größen A, B, C usw. gequantelt werden, d. h. es muß für sie eine Quantenbedingung aufgestellt werden. Wilson und Sommerfeld haben fast gleichzeitig (1915) eine allgemeine Regel für das Quanteln angegeben. Leider müssen wir uns versagen diese Regel hier anzuführen, da wir Symbole der höheren Mathematik vermeiden wollen. Die Regel führt zu Gleichungen von der Gestalt

$$[A] = i h , \quad (35)$$

wo $[A]$ einen Ausdruck, welcher die Größe A enthält, bedeutet und i eine ganze Zahl ist. Indem wir dieser Zahl die Werte 1, 2, 3, 4 usw. erteilen, erhalten wir nach Formel (35) die möglichen Werte von A . Auf dieselbe Weise werden die Werte von B, C usw. bestimmt. Ein Zustand des Systems ist nur dann möglich, wenn jede der Größen A, B, C usw. irgendeinen der möglichen

Werte besitzt, d. h. solcher, welche der entsprechenden Quantenbedingung genügen. Jedem möglichen Zustande des Systems entspricht ein möglicher Energievorrat desselben. Wendet man die allgemeine Quantenregel von Wilson und Sommerfeld auf den Fall der Bewegung eines Elektrons in einer Kreisbahn an, so erhält man genau die Quantenbedingung (14) und so erklärt sich zugleich auch das Auftreten des Nenners 2π .

Im Jahre 1916 erschien eine bemerkenswerte Arbeit von Sommerfeld, welche als eine Weiterentwicklung der Bohrschen Theorie zu betrachten ist; sie bezieht sich, ebenso wie die Bohrsche Theorie, auf die Bewegung eines Elektrons um einen Kern. Die Bedeutung dieser Arbeit besteht darin, daß es Sommerfeld gelang, das Auftreten der Satelliten der Spektrallinien für gewisse Fälle vollständig zu erklären. (§ 4 des vierten Kapitels, Nr. 12.) Wir müssen uns mit einer Andeutung auf den Gedankengang Sommerfelds begnügen. Zunächst machte er die Voraussetzung, daß nicht nur Kreisbahnen, sondern ebenso wie im Planetensystem auch elliptische Bahnen des Elektrons möglich seien, da ja das Wirkungsgesetz der Kräfte in beiden Fällen dasselbe ist. Um unser System im gegebenen Zeitpunkte zu beschreiben, müssen wir angeben, auf welcher Ellipse die Bewegung des Elektrons vor sich geht. Eine elliptische Bahn wird durch zwei Angaben vollständig bestimmt, z. B. durch die Angabe der großen Halbachse und der Exzentrizität. Durch die Quantelung dieser beiden Größen sondert Sommerfeld die möglichen (erlaubten, stationären) elliptischen Bahnen aus, deren große Halbachsen und Exzentrizitäten beiden Quantenbedingungen genügen. Wir führen nur das Resultat der verwickelten Rechnung an.

1. Alle Bohrschen Kreisbahnen bleiben möglich, aber es kommen zu jeder von ihnen noch eine gewisse Anzahl von ebenfalls möglichen Ellipsen hinzu, deren große Halbachsen für alle die gleichen und dem Halbmesser der Kreisbahn gleich sind. Neben dem i ten Bohrschen Kreise sind noch $(i - 1)$ Ellipsen möglich, so daß die i te Bohrsche Bahn durch i mögliche Bahnen ersetzt wird, deren Gesamtheit wir eine Bahngruppe nennen wollen.

2. Allen i -Bahnen, die also eine Gruppe bilden, entspricht derselbe Energievorrat W_i des Atoms. Hieraus kann der wichtige Schluß gezogen werden, daß der Energieverlust $W_k - W_i$ derselbe ist, wenn das Elektron von einer beliebigen Bahn der k -Gruppe auf eine beliebige Bahn der i -Gruppe springt; daraus folgt aber weiter, vgl. (17) und (18), daß allen diesen Sprüngen

ein und dieselbe Spektrallinie entspricht. Die neue Theorie hat somit scheinbar nichts Neues ergeben; die Zahl und die Verteilung der Spektrallinien ist dieselbe geblieben. Es hat sich nur die Zahl der Entstehungsmöglichkeiten einer gegebenen Spektrallinie verändert, welche wir uns jetzt als aus einer ganzen Reihe von aufeinanderfallenden Linien bestehend zu denken haben. Die Tatsache, daß allen Bahnen gleicher Gruppe dieselbe Energie entspricht, wollen wir zum Ausdruck bringen, indem wir sagen, daß alle diese Bahnen derselben Energiestufe angehören,

Sommerfeld blieb aber dabei nicht stehen, sondern ging bedeutend weiter. In § 8 des vierten Kapitels unter Nr. 11 haben wir auf die experimentell bestätigte Tatsache hingewiesen, daß die Masse m eines Körpers von seiner Geschwindigkeit v abhängt und führten die Formel an:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (36)$$

wo m_0 die Masse bei $v = 0$ und c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten. Das Elektron bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, welche im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit c nicht verschwindend klein ist. Diese Geschwindigkeit ändert sich bei der Bewegung auf einer Ellipse; sie ist am größten im Perihel und am kleinsten im Aphel. Sommerfeld untersuchte nun die Bewegung des Elektrons um den Atomkern, unter der Voraussetzung, daß die Masse des Elektrons sich während der Bewegung gemäß der Formel (36) ändert. Ohne in Einzelheiten einzugehen, wollen wir bloß erwähnen, daß dadurch die elliptischen Bahnen eine gewisse, wenn auch sehr geringe Veränderung erleiden, sie werden verzerrt. Diese Verzerrung ist verschieden für die einzelnen Bahnen derselben Gruppe. Gleichzeitig erweist sich auch die der betreffenden Bahn entsprechende Energie des Atoms etwas abgeändert, und diese Abänderung ist gleichfalls für die verschiedenen Bahnen derselben Gruppe verschieden; anders gesagt, es entsprechen diesen Bahnen nicht ganz gleiche Energiestufen. Daraus folgt nun, daß die Größe des Energieverlustes bei einem Sprunge nicht nur von den beiden Gruppen (k und i), zwischen welchen der Sprung stattfindet, sondern auch davon abhängt, von welcher Bahn der k -Gruppe und auf welche Bahn der i -Gruppe das Elektron springt. Laut (17) und (18) folgt daraus weiter, daß den verschiedenen möglichen Übergängen des Elektrons von den Bahnen der k -Gruppe zu denen der i -Gruppe nicht ganz gleiche Zahlen ν und n , d. h. nicht mehr genau zusammenfallende

Spektrallinien entsprechen. An Stelle einer Linie erhalten wir mehrere, und damit ist das Auftreten der rätselhaften Satelliten erklärt.

Sommerfeld konnte auf Grund seiner Theorie die Zahl und gegenseitige Entfernung der Satelliten in den Spektrallinien des Wasserstoffs und des Heliums berechnen. Es erwies sich erstens eine vollkommene Übereinstimmung seiner Resultate mit der Erfahrung für die Linien, deren Satelliten schon bekannt waren. Zweitens konnte Sommerfeld die Zahl und Gruppierung der Satelliten einiger noch nicht untersuchten Heliumlinien vorhersagen. Paschens Untersuchungen bestätigten vollkommen die Richtigkeit dieser Voraussagung.

Zu den vier am Schlusse des vorigen Paragraphen angeführten Punkten können wir jetzt als fünften hinzufügen:

5. Die Bohrsche Theorie, weitergeführt durch Sommerfeld, erklärte das Zustandekommen der Satelliten der Spektrallinien beim Wasserstoff und ionisierten Helium.

§ 9. Atombau (Fortsetzung). Aus den in den letzten drei Paragraphen besprochenen Arbeiten hat sich ein umfangreiches Kapitel der Physik entwickelt. Es genügt auf das Buch Sommerfelds „Atombau und Spektrallinien“ (4. Auflage 1924) hinzuweisen. Doch schreiben wir ja weder eine Geschichte noch ein Lehrbuch der Physik, wie wir schon oft genug wiederholt haben, und es genügt uns vollkommen auf jene Tatsachen hingewiesen zu haben, in welchen der spezifische Charakter der neuen und neuesten Physik mit besonderer Deutlichkeit hervortritt. Daher können wir uns auf eine summarische Aufzählung der weiteren Fragen, welche für unseren Zweck von Wichtigkeit sind, beschränken.

I. In den Atomen mit einem Elektron (H, He^+) haben wir angenommen, daß das Atom sich in dem stabilsten Zustande befindet, wenn das Elektron sich auf der ersten Bahn bewegt, welche dem Kerne am nächsten ist. Energie wird ausgestrahlt, wenn das Elektron von irgendeiner k -Bahn auf eine i -Bahn, welche dem Kerne näher gelegen ist ($k > i$), überspringt, wobei die Energie des Atoms abnimmt. In dem Spezialfalle, wenn ein Elektron, welches sich außerhalb des Atoms befindet, unmittelbar auf die i -Bahn übergeht, ist k unendlich groß. Es fragt sich nun, unter welchen Bedingungen das Elektron auf eine k -Bahn gelangen oder das Atom ganz verlassen kann. Da die Energie des Atoms bei einem Übergange von einer i -Bahn auf eine k -Bahn ($k > i$) und im äußersten Falle von der ersten Bahn ins „Unendliche“ zunimmt, so ist es klar, daß derartige Übergänge nur dann stattfinden können, wenn das Atom

Energie absorbiert. Hierher gehört der Fall, daß das Atom eine auf ihn auffallende Strahlung absorbiert. Wichtiger ist aber der Fall, wenn das Atom eine mechanische Einwirkung, einen Stoß von seiten eines durch ihn fliegenden fremden Elektrons erfährt. Wenn das Elektron des Atoms aus einer Bahn in eine andere, vom Kerne weiter abstehende Bahn geschleudert wird, so sagen wir, daß das Atom eine Anregung (oder Reizung) erfährt, welche ihn zum Strahlungsakte sozusagen vorbereitet. Wird das Elektron aus dem Bereiche des Atoms hinausgeschleudert, so wird das Atom ionisiert.

II. Bisher haben wir nur den Fall betrachtet, daß im Atom nur ein Elektron vorhanden ist, d. h. Wasserstoffatome und ionisierte Heliumatome. Gehen wir nun zu den Fällen über, wo das Atom 2, 3 usw. bis 92 Elektronen besitzt, so tauchen folgende Fragen auf: 1. In welchen Bahnen bewegen sich die Elektronen? 2. Wie sind diese Bahnen im Raume gelegen? 3. Wie sind die Elektronen gruppiert? Noch eine Frage fügen wir hinzu: 4. Wie ist das Molekül gebaut, z. B. das einfachste zweiatomige Wasserstoffmolekül?

Bezüglich aller dieser Fragen müssen wir offen gestehen: Die Wissenschaft kann augenblicklich (Anfang 1925) keine einzige dieser Fragen präzise und verständlich beantworten. Und dennoch entstand durch die Betrachtung der eben angeführten Fragen ein umfangreicher Abschnitt der Physik, welcher zu erstaunlichen Resultaten und sehr wertvollen wissenschaftlichen Ergebnissen geführt hat. Wir wollen diese Fragen etwas näher betrachten. Bohr nahm an, daß alle Elektronen in Kreisbahnen sich bewegen, wobei auf ein und derselben Bahn in gleichen Abständen voneinander 2, 3, 4 usw. bis zu 8 Elektronen sich befinden können. Man sprach von Elektronenringen und nahm an, daß alle Ringe in ein und derselben Ebene gelegen seien. Die Verteilung der Elektronen auf die Ringe sollte mit der Verteilung in Gruppen identisch sein. Bezüglich des Baues des Wasserstoffmoleküls gab es eine bestimmte Hypothese, man hat sie aber aufgeben müssen. Alle um den Kern kreisenden Elektronen zerfallen in innere und äußere. Die inneren sind in Ringen angeordnet, die äußeren in verschiedenen Bahnen. Die äußeren Elektronen bestimmen die chemischen Eigenschaften des Grundstoffes. Ihre Zahl ist der Valenz des Elementes gleich. Ihre Sprünge bedingen die infrarote, sichtbare und ultraviolette Strahlung des Atoms. Die Ringe können gesättigt oder ungesättigt sein; im ersten Falle enthalten sie die maximale mögliche Zahl von Elektronen (z. B. acht).

Von diesen Vorstellungen hat man vieles, aber doch nicht alles verwerfen müssen. Man nimmt jetzt an, daß die Elektronenbahnen nicht in einer Ebene, sondern räumlich gelagert sind, so daß die Elektronen den Kern von allen Seiten umgeben. Weiterhin hat sich die Annahme als unhaltbar erwiesen, daß mehrere Elektronen eine gemeinsame Bahn haben, d. h. in Ringen angeordnet sind. Augenblicklich spielt die Anordnung der Elektronen in Schalen eine große Rolle; wir kommen später noch darauf zurück. Über die räumliche Lagerung der Bahnen ist etwas Bestimmtes noch nicht bekannt. Selbst der nächst dem Wasserstoffatome einfachste Fall des Heliumatoms ist noch nicht bekannt, obgleich zahlreiche Hypothesen über die Bewegung der beiden Elektronen dieses Atoms vorgeschlagen wurden.

III. Der (normale) Zeemaneffekt und der Starkeffekt (§ 5 und § 6 des vierten Kapitels, Nr. 16 und 26) haben ihre Erklärung darin gefunden, daß das magnetische und elektrische Feld die Elektronenbahnen verzerren müssen. Diese Verzerrung ist verschieden für die Bahnen derselben Gruppe (Energienstufe), was ebenso wie in der Sommerfeldschen Theorie der Satelliten zu einer Spaltung der Spektrallinien führen muß. Wenn im Atom eine bestimmte ausgezeichnete Richtung vorhanden ist, welche auch durch äußere Umstände, z. B. ein elektrisches oder magnetisches Feld gegeben sein kann, so hat man auch noch den Winkel φ zu betrachten, welchen die Bahnebene mit dieser Richtung bildet. Dieser Winkel gehört zu jenen Größen A , B , C usw. (s. oben), welche zur Beschreibung des Systems erforderlich sind und muß daher auch gequantelt werden. Nur ganz bestimmte Werte des Winkels φ , welche den Quantenbedingungen genügen, ergeben mögliche (stationäre) Bahnen.

In Atomen mit mehr als zwei Elektronen müssen innere (intra-atomare) elektrische und magnetische Felder vorhanden sein, welche die Bahnen des äußeren Elektrons beeinflussen. Auf diese Weise erhält man die „Spaltung“ der Balmerreihe des Wasserstoffs in eine Reihe von Serien in den Spektren der verschiedenen anderen Grundstoffe.

IV. Die Elektronenschalen. Die Bohrsche Theorie hat zur Schaffung einer Theorie der sichtbaren, infraroten und ultravioletten Spektren geführt. Diese Theorie wollen wir hier nicht weiter verfolgen und bloß bemerken, daß sie das Entstehen dieser Spektren den Sprüngen von einer Bahn zur anderen jener Elektronen zuschreibt, welche der äußeren Schicht (Schale) angehören, sogenannter peripherer Elektronen. Diese Elektronen bestimmen, wie wir gesehen

haben, die chemischen Eigenschaften des Grundstoffes, sowie auch andere Eigenschaften, welche eine Periodizität aufweisen, wenn man in der Reihenfolge der zunehmenden Ordnungszahlen fortschreitet. Die Zahl der Elektronenschalen kann in Atomen mit großer Ordnungszahl recht beträchtlich sein. Eine Schale ist gesättigt, wenn sie eine bestimmte, ihr eigene Zahl von Elektronen besitzt. Die dem Kerne zunächst gelegene Schale enthält zwei, die zweite acht, die dritte ebenfalls acht Elektronen usw. Der Übergang von einem Grundstoffe im Mendelejeffschen System zum folgenden geschieht durch Hinzufügung eines Elektrons zur äußeren Schale, obgleich auch Fälle vorkommen, daß das neu hinzukommende Elektron eine innere Schale vervollständigt. Die äußere Schale kann somit 1, 2, 3 bis 8 Elektronen besitzen und von dieser Zahl hängen die chemischen Eigenschaften des Grundstoffes ab. Wenn die äußere Schale gesättigt ist, so entsteht ein chemisch träger Grundstoff, ein Edelgas. Es beginnt dann der Aufbau einer neuen Schale und die chemischen Eigenschaften wiederholen sich. Auf diese Weise enthüllt sich der wahre Sinn des periodischen Systems von Mendelejeff.

Man gelangt also zu der Vorstellung, daß die inneren Schalen, besonders die dem Kerne am nächsten gelegenen, in allen Elementen mit großer Ordnungszahl gleichgebaut sind. Daraus folgt aber, daß alle Erscheinungen, welche auf Vorgängen in den inneren Elektronenschalen beruhen, in allen Grundstoffen mehr oder weniger gleichartig sein müssen und keine Spur von Periodizität aufweisen dürfen. Sehr wichtig, wenn auch sehr sonderbar ist der Umstand, daß in jeder Schale mehrere Energiestufen enthalten sind. Wenn man irgendwelche Übergänge der Elektronen zwischen den inneren Schalen betrachten will, so muß man nicht nur die Schalen, sondern auch die Energiestufen kennen, zwischen welchen der Übergang stattfindet. Aus Gründen, welche sogleich zur Sprache kommen werden, haben die inneren Schalen in der Reihenfolge vom Kerne nach außen die Bezeichnungen: *K*-, *L*-, *M*-, *N*-, *O*-Schalen erhalten. Die *K*-Schale hat nur eine Energiestufe, die *L*-Schale drei, die *M*-Schale fünf, die *N*-Schale sieben. Das Vorhandensein dieser Energiestufen unterliegt keinem Zweifel; sie lassen sich experimentell genau bestimmen. Die Zahl der Energiestufen in den Schalen *O* usw. kann man noch nicht als endgültig festgestellt betrachten.

Zu zahlreichen wichtigen Ergebnissen und glänzenden Siegen hat der Wissenschaft diese rasch emporgeblühte Lehre verholfen,

deren Grundzüge wir soeben nur zum Teil haben streifen können. Einen solchen Sieg, und zwar aus der letzten Zeit, wollen wir hier als Beispiel anführen. Bis 1923 stand im periodischen System unter der Nr. 72 der Grundstoff Lutetium II aus der Gruppe der seltenen Erden verzeichnet. Doch konnte seine Anwesenheit an dieser Stelle nicht mit jenem oben geschilderten Schema des allmählichen Aufbaues der Elektronenschalen vereinbart werden. Dieser Stoff stellte eine Ausnahme vor, weil nach dem Schema unter Nr. 72 ein Grundstoff der Gruppe IV a zu erwarten war, ein Analogon des Zirkons. Nun hat man im Jahre 1923 einen neuen Grundstoff, das Hafnium, entdeckt, welches unzweifelhaft die Ordnungszahl 72 besitzt und in seinen chemischen Eigenschaften sich vom Zirkon so wenig unterscheidet, daß eine vollständige Trennung dieser Stoffe, welche in der Natur stets zusammen vorkommen, beinahe unmöglich ist. Einen Grundstoff Lutetium II gibt es überhaupt nicht.

V. Die Röntgenspektren. Wenn die Elektronen eines Kathodenstrahls mit hinreichender Geschwindigkeit die Antikathode treffen, so entstehen sogenannte charakteristische Röntgenstrahlen, welche das Röntgenspektrum des auf der Antikathode befindlichen Elementes zeigen. Dieses Linienspektrum ist nach der Zahl und der relativen Lage der Linien in weiten Grenzen für alle Elemente dasselbe, doch verschiebt sich die Gesamtheit von Linien mit außerordentlicher Regelmäßigkeit zu längeren Wellen, wenn man, mit Uran beginnend, die Reihe der Grundstoffe in abnehmender Ordnungszahl durchläuft. Von einer Periodizität kann hier keine Rede sein. Das Röntgenspektrum besteht aus einer Anzahl von Liniengruppen, welche mit den Buchstaben *K*, *L*, *M* bezeichnet werden. Die *K*-Gruppe besteht aus Linien der kürzesten Wellenlänge (härteste Strahlen); die Zahl der Linien in dieser Gruppe ist ungefähr zehn. Die *L*-Gruppe ist näher zum ultravioletten Spektrum gelegen als die *K*-Gruppe (weichere Strahlen); sie besteht aus etwa 16 Linien. Die *M*-Gruppe enthält noch größere Wellenlängen (noch weichere Strahlen), in ihr hat man 6 Linien entdeckt. Die Isotopen haben vollständig gleiche Spektren.

Diese Übereinstimmung der Röntgenspektren der Grundstoffe zeigt, daß die charakteristischen Strahlen in jenen Elektronenschalen entstehen, welche für alle Grundstoffe dieselbe Struktur haben, d. h. in den dem Kerne am nächsten befindlichen. Wir erwähnten, daß in diesen Schalen 1, 3, 5, 7 usw. Energiestufen vorhanden sind. Wenn ein Kathodenstrahlelektron mit hinreichender Geschwindigkeit (Energie) in das Atom eindringt, so kann es ein

Elektron aus einer der inneren Schalen losreißen. Da alle Schalen mit Ausnahme der letzten gesättigt sind, so kann das Elektron entweder in der äußeren Schale bleiben oder den Bereich des Atoms verlassen. Auf den freigewordenen Platz springt nun ein Elektron von einer höheren (weiter vom Kerne gelegenen) Energiestufe über. Dabei wird ein Röntgenstrahl ausgesandt, dessen Quantum $h\nu$ gleich der Energiedifferenz der Stufen ist, zwischen welchen der Sprung stattgefunden hat.

Durch die Bemühungen Sommerfelds und anderer Forscher kann man die Systematik der Röntgenspektren der *K*-, *L*-, und *M*-Gruppen als mehr oder weniger abgeschlossen betrachten. Das bedeutet, daß man für jede Linie dieser Gruppen jene zwei Energiestufen angeben kann, zwischen welchen das Elektron bei der Aussendung des betreffenden Strahles überspringt. Eine Energiestufe kann durch die Wellenlänge λ des Strahles gekennzeichnet werden, welcher beim Übergange eines außerhalb des Atoms sich befindenden Elektrons auf diese Energiestufe ausgestrahlt wird. Die Energiestufen können auf zweierlei Weise bestimmt werden, man erhält auf beiden Wegen übereinstimmende Resultate; die Energiestufen, welche bei der Erregung von *K*-, *L*-, *M*-Strahlen in Betracht kommen, sind jetzt alle gut bekannt. Wir wollen bemerken, daß die eine dieser Methoden diese Energiestufen sozusagen unmittelbar sichtbar macht, indem die ihnen entsprechenden λ durch scharfe Kanten der Absorptionsbanden gekennzeichnet werden, welche man erhalten wird, wenn man ein kontinuierliches Röntgenspektrum durch eine Platte aus dem betrachteten Stoffe photographiert. Indem man von dem Umstande, daß die Größe $h\nu$ gleich der Energiedifferenz zweier Stufen ist, Gebrauch machte, konnte man aus dem Röntgenspektrum die Größe h bestimmen; man erhielt genau den uns schon bekannten Zahlenwert.

Die charakteristischen Strahlen der Schwingungszahl ν können durch Röntgenstrahlen erregt werden. Die Schwingungszahl der letzteren muß der Bedingung $\nu' > \nu$ genügen, weil das Quantum $h\nu'$ größer als das Quantum $h\nu$ sein muß (vgl. § 5 dieses Kapitels, Nr. III.)

VI. Schluß. Wir haben selbstverständlich lange nicht alle Anwendungen der Quantentheorie erschöpft. Zu den von uns nicht erwähnten gehört unter anderem der interessante Fall der Quantelung der Winkelgeschwindigkeit rotierender Moleküle; er spielt eine große Rolle in der Theorie der Emissions- und Absorptionsbandenspektren.

Überblicken wir nun alles, was in diesem Kapitel, angefangen mit § 4, geschildert ist, so sehen wir ein glänzendes Bild der Errungenschaften der Quantentheorie im allgemeinen und der Bohrschen Theorie im besonderen. Wir begegnen hier Fällen, wo rätselhafte Erscheinungen eine überraschend einfache Erklärung fanden und neue Erscheinungen vorausgesagt wurden. An Einheitlichkeit und Vollendung findet dieser neue Abschnitt der Physik in vielen Beziehungen kaum seinesgleichen. Und doch kann man sich eines unbefriedigenden Eindruckes nicht erwehren und der Leser wird uns darin wohl beipflichten; es ist dies eine Folge jener Eigentümlichkeiten des Geistes der neuen Physik, welche den Gegenstand dieses Buches bilden. Auf dieses Thema kommen wir weiter unten zurück.

§ 10. Die Relativitätstheorie. Es ist zweifelhaft, ob während der ganzen Geschichte der Menschheit irgendeine wissenschaftliche Errungenschaft ein so tiefes und, was besonders merkwürdig ist, ein so dauerndes Interesse in den weitesten und verschiedenartigsten Schichten der Kulturvölker hervorgerufen hat, wie die von Einstein in den Jahren 1905 und 1915 geschaffene Relativitätstheorie. Zwar hat Röntgens Entdeckung der neuen Strahlen im Jahre 1895 ebenfalls ein stürmisches Interesse hervorgerufen, aber die Wißbegierde des großen Publikums war in diesem Falle schnell befriedigt; man hatte sich sehr bald an die neue Entdeckung gleichsam gewöhnt und verlor das Interesse daran. Eine eingehende Untersuchung der psychologischen Gründe des gewaltigen Eindruckes, welchen diese zwei wissenschaftlichen Ereignisse auf die große Masse der Nichtphysiker ausgeübt haben und ferner die Erklärung der Ursachen der so verschiedenen Dauer des Interesses an diesen beiden neuen Tatsachen, könnte ein sehr anregendes und unterhaltendes Thema bilden, welches wir aber hier nicht erörtern können.

Die ganze Einsteinsche Arbeit zerfällt historisch in zwei Teile. Der erste Teil (1905) gab das, was heutzutage das spezielle Relativitätsprinzip genannt wird. Der zweite Teil, an welchem Einstein im Laufe von 10 Jahren gearbeitet hat, gewann erst 1915 in seinen Hauptzügen eine klare Form; er enthält das sogenannte allgemeine Relativitätsprinzip. Schon der erste Teil der Arbeit rief eine tiefgreifende Umwälzung fast in allen Abschnitten der Physik hervor. Er hat die Mechanik Newtons, welche im Laufe zweier Jahrhunderte geherrscht hatte, vollständig geändert; man war gezwungen, die Grundlage dieser Mechanik, welche in den berühmten drei Bewegungsgesetzen (*leges motus*) ausgedrückt sind,

fallen zu lassen. Einsteins Resultate wirkten umbildend auf die Begriffe der Gestalt und der Abmessungen der Körper ein und insbesondere auf den Begriff der Zeit. Sie haben uns gezwungen, manche von den elementarsten Vorstellungen aufzugeben, an die wir uns seit unserer Kindheit, als wir sprechen lernten, gewöhnt hatten. Die Begriffe von Geschwindigkeit, Masse und Kraft sind andere geworden; solche elementare Sachen, wie z. B. das Additionsgesetz der Geschwindigkeiten erwiesen sich als nicht richtig. Noch gründlicher war jedoch der Einfluß der zweiten Einsteinschen Arbeit, d. h. des allgemeinen Relativitätsprinzips. Dieser Teil hat wesentlich auf unsere Weltauffassung eingewirkt; er soll uns die Lösung des Geheimnisses des Weltraumes und der allgemeinen Gravitation geben; er ersetzte die Euklidische Geometrie durch eine neue Geometrie, welche nunmehr einen Abschnitt der Physik bildet.

Das Studium der neuen Einsteinschen Wissenschaft bereitet außerordentliche, nicht nur gedankliche, sondern, wenn man sich so ausdrücken darf, technische Schwierigkeiten. Diese letzten haben ihren Grund darin, daß in der Einsteinschen Theorie von einem solchen Teil der Mathematik ausgiebiger Gebrauch gemacht wird, mit welchem die Physiker noch nie in Berührung gekommen waren. Ohne Kenntnisse dieser Mathematik ist es unmöglich, die Gedanken und Folgerungen zu verstehen, auf denen die neue Lehre aufgebaut ist. Man kann mit Bestimmtheit voraussagen, daß diese Lehre, selbst wenn es gelänge dieselbe mit Umgehung der Mathematik in einfacher, leicht verständlicher Form darzustellen, nicht so bald Eigentum breiter Volksschichten werden wird. Der Grund wird uns klar, wenn wir die wissenschaftliche Umwälzung, welche beim Übergang vom Ptolomäischen System zum System des Kopernikus mit jener vergleichen, welche durch das Erscheinen der allgemeinen Relativitätstheorie hervorgerufen wurde. Im ersten Falle war der Unterschied zwischen dem alten und dem neuen gewaltig, nicht nur im Sinne der Grundideen oder Anschauungen, sondern in der Handgreiflichkeit der Resultate. Trotzdem war der Übergang von den alten Vorstellungen zu den neuen verhältnismäßig einfach, so daß es keine allzu großen Schwierigkeiten bereitete, in das Neue sich einzuleben und nach neuer Art zu denken und zu urteilen. Die jetzige Umwälzung dagegen ist dadurch gekennzeichnet, daß der Unterschied zwischen dem Neuen und dem Alten, so gewaltig er im Gebiete des abstrakten Denkens ist, für das praktische gar keine Bedeutung hat. Es sind nämlich die quantitativen Änderungen, welche durch die neue Lehre in die Zahlen-

größen der verschiedenartigsten physikalischen Größen eingeführt werden, allgemein von der Größenordnung $v : c$ oder noch öfter $v^2 : c^2$, wobei v die Geschwindigkeit eines Körpers, c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten. Diese von der neuen Theorie eingeführten, quantitativen Änderungen sind so außerordentlich klein, daß man sie nur in sehr seltenen und ganz ausschließlichen Fällen experimentell nachweisen kann; infolgedessen bleibt in der Praxis alles beim Alten. Die alte Newtonsche Mechanik ist zerstört, da man sich von deren Grundprinzipien lossagen mußte. Unter gewöhnlichen Bedingungen sind aber die Änderungen unmerklich klein, so daß die alte Mechanik praktisch unverändert fortbesteht. Astronomen, Ingenieure, Architekten und andere Spezialisten werden nie aufhören, sich ihrer als unfehlbarer Grundlage der Rechnungen zu bedienen. Für Astronomen müssen übrigens die neuen Ideen über Raum und Zeit, bei Beschäftigung mit Fragen über das System der Fixsterne und Nebelflecken und überhaupt in kosmologischen Fragen, eine hervorragende Bedeutung haben. Im Gebiete der physikalischen Erscheinungen besitzen nur die Elektronen Geschwindigkeiten, welche der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar sind oder ihr sogar nahe kommen. In diesem Falle sagt uns die neue Lehre solche Resultate voraus, welche sich wesentlich von dem unterscheiden, was man auf Grund der alten Newtonschen Mechanik erwarten müßte. Die wahre Bedeutung neuer Gedanken wird aber durchaus nicht ausschließlich auf Grund ihrer praktisch greifbaren Resultate bemessen. Wenn diese Gedanken richtig sind, wenn sich in ihnen reell existierendes spiegelt, so müssen sie ein enormes Interesse für jeden haben, dem der Fortschritt in der Erkenntnis des uns umgebenden Weltalls teuer ist, ganz abgesehen davon, inwieweit die neuen Eroberungen des menschlichen Gedankens abstrakt und wenig oder sogar überhaupt nicht praktisch fühlbar sind. Es versteht sich von selbst, daß hier nicht die Rede von einer Darstellung der Relativitätstheorie sein kann.

Wir müssen uns auf eine kurze Übersicht der wichtigsten Grundzüge dieser Theorie und einiger ihrer Resultate beschränken.

A. Die spezielle Relativitätstheorie.

I. Es gibt weder eine absolute Ruhe noch eine absolute Bewegung der Körper, auch ist es unmöglich, sich derartige Zustände vorzustellen. Ruhe und Bewegung sind nur in bezug auf andere Körper denkbar.

II. Das erste Postulat. Die Welt ist so eingerichtet, daß man durch keinerlei Beobachtungen, ausgeführt in einem beliebigen

Systeme, z. B. auf der Erde, eine geradlinige und gleichmäßige Bewegung dieses Systems nachweisen und noch viel weniger die Geschwindigkeit dieser Bewegung bestimmen kann.

III. Das zweite Postulat schließt sich eng an das vorhergehende an, so daß einige Forscher es für eine einfache Folgerung aus dem ersten halten. Das zweite Postulat lautet: Man kann die Lichtgeschwindigkeit in den Systemen, deren relative Bewegung geradlinig und gleichmäßig ist, unter beliebigen Bedingungen messen, stets wird man eine und dieselbe Größe c (im leeren Raume) erhalten.

IV. Es gibt keine absolute Weltzeit. Von zwei Systemen, welche sich relativ zueinander bewegen, hat ein jedes seine eigene Zeit. Ein und derselbe Zeitpunkt in einem System entspricht verschiedenen Zeitmomenten im andern. Zwei Ereignisse, welche in einem Systeme gleichzeitig stattfinden, finden in dem anderen nicht gleichzeitig statt. Wenn von zwei Ereignissen, das eine im ersten System früher als das zweite geschieht, so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß im anderen System das erste Ereignis später als das zweite eintritt. Das kann aber nicht stattfinden, wenn zwei Ereignisse im kausalen Verhältnisse zueinander stehen. Die Dauer einer und derselben Erscheinung ist jedenfalls in beiden Systemen eine verschiedene. Folglich sind die Begriffe Gleichzeitigkeit, Dauer und Zeitfolge von Erscheinungen, „früher“ und „später“ relative Begriffe.

V. Die Gestalt und die Abmessungen der Körper sind relative Begriffe. Die Länge eines Körpers, gemessen in der Richtung der relativen Bewegung zweier Systeme, erscheint in dem System, in welchem der Körper sich bewegt, kleiner als in dem anderen, in welchem er ruht. Eine in einem System ruhende Kugel erscheint in dem anderen Systeme als Ellipsoid.

VI. Die Lichtgeschwindigkeit ist die Grenze der möglichen relativen Geschwindigkeit. Diese Grenze kann nicht erreicht werden.

VII. Wenn die Masse eines Körpers in dem System, in welchem der Körper ruht, gleich m_0 ist, so wird sie in einem anderen System, in welchem der Körper sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, gleich sein

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

wo c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet.

VIII. Die Energie E besitzt eine Masse, welche gleich ist $E : c^2$. Eine jede Masse m ist gleichbedeutend einem Vorrate an Energie $c^2 m$.

IX. Die Newtonsche Mechanik behält ihre Richtigkeit nur für solche relative Geschwindigkeiten der Körper, welche im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit klein sind.

B. Die allgemeine Relativitätstheorie.

X. Das allgemeine Relativitätsprinzip. Postulat. Die Welt ist so eingerichtet, daß es möglich sein muß, die Gesetze aller physikalischen Erscheinungen in einer solchen Form auszudrücken, daß sie in allen Systemen, ganz unabhängig von ihren relativen Bewegungen, gültig bleiben.

XI. Es ist bewiesen, daß die träge Masse gleich ist der wäg-
baren Masse. Das will bedeuten, daß sowohl in der Formel $f = m w^1$),
in der f die Kraft und w die Beschleunigung des Körpers bedeuten,
als auch in der Formel für die Gravitationskraft: $f = C \frac{M m}{r^2}$, die
Masse m ein und dieselbe ist. Hieraus folgt, daß ein Beobachter,
welcher sich in einem beliebigen Systeme befindet, nicht entscheiden
kann, ob in diesem System die Gravitationskraft in einer gewissen
Richtung wirkt oder ob das ganze System sich in der entgegengesetzten
Richtung beschleunigt bewegt. Das ist das sogenannte Äquivalenz-
prinzip.

XII. Das, was wir Trägheit nennen, darf nicht erklärt werden
als „Bestreben“ oder „Widerstand“ usw., Eigenschaften, welche
unbelebte Körper unter bestimmten Bedingungen angeblich besitzen.
Die Trägheit wird durch die Gesamtheit der kosmischen Massen
hervorgerufen und hängt ausschließlich nur von der Ruhe oder
Bewegung des Körpers in bezug auf diese weit entfernten Massen ab.
Dasselbe bezieht sich auch auf die Zentrifugalkraft (Fliehkraft), welche
gleichfalls durch kosmische Massen, in bezug auf welche der betreffende
Körper sich dreht, hervorgerufen wird und jedenfalls nicht die Folge
einer absoluten Drehung im absoluten Raum ist; dieselben entfernt
liegenden Massen rufen die Abplattung eines sich drehenden Körpers
hervor. Gesetzt den Fall, es gäbe in der Welt nur einen einzigen
Körper, dann könnte überhaupt weder von einer Bewegung infolge
der Trägheit noch von einer Drehung und ebensowenig von einer
Zentrifugalkraft die Rede sein.

XIII. Der Weltraum ist nicht der Raum der Euklidischen
Geometrie. Er ist nicht unendlich; er hat eine besondere innere
Struktur, eine innere Krümmung, welche der Krümmung einer

¹⁾ Genauer: $f = \frac{d}{dt}(m v)$, wo t die Zeit und v die Geschwindigkeit des
Körpers bedeuten.

Kreislinie oder einer Kugeloberfläche analog ist. Er ist in sich selbst geschlossen wie der Kreisumfang und die Oberfläche einer Kugel. Er hat eine ihm eigene Geometrie, verschieden von der Euklidischen, gleich wie die Oberfläche einer Kugel ihre eigene Geometrie hat, welche sich von der Geometrie der Ebene unterscheidet. Man kann aber einen genügend kleinen Teil der Kugeloberfläche, z. B. einen Quadratkilometer der Erdoberfläche, als angenähert ebenes Flächenstück betrachten, auf welcher die Abweichungen von der ebenen Geometrie nicht merkbar sind. In einem solchen Bereiche ist z. B. die Summe der Winkel im Dreieck nicht merkbar von zwei Rechten verschieden, während auf der Oberfläche einer Kugel die Summe stets größer ist als zwei Rechte. In ähnlicher Weise können wir kleine Raumteile als Euklidische Räume betrachten und die Euklidische Geometrie anwenden. Die Struktur des Raumes in der Nähe großer kosmischer Massen ist schärfer ausgeprägt; die innere Krümmung ist größer und die Abweichung von der Euklidischen Geometrie bedeutender als in weiter Entfernung von solchen Massen.

XIV. In jedem Punkte des Raumes wird seine Struktur durch die Gesamtheit der kosmischen Massen bestimmt oder, genauer ausgedrückt, durch jenes „Gravitationsfeld“, welches in dem gegebenen Punkte von diesen Massen hervorgerufen wird. Von dieser Struktur sind alle in diesem Orte des Raumes stattfindenden physikalischen Erscheinungen abhängig.

XV. Von der Struktur des Raumes im gegebenen Bereiche hängt die in diesem Bereiche gültige Geometrie ab. Hieraus folgt, daß die entfernt liegenden kosmischen Massen, welche die Struktur des Raumes in jedem Bereiche schaffen, auch die Geometrie dieses Bereiches bestimmen, folglich ist die Geometrie ein Teil der Physik! So ist z. B. die Summe der Winkel eines Dreieckes von den rein physikalischen Verhältnissen der Umgebung abhängig, d. h. von dem Teil des Raumes, in dem das Dreieck gelegen ist. Sollten die kosmischen Massen eine andere Lage annehmen, dann würden wir in demselben Raumteile eine andere Struktur vor uns haben, und die besonderen Kennzeichen der physikalischen Erscheinungen würden etwas verändert sein; gleichzeitig würden wir dort eine etwas veränderte Geometrie vorfinden.

XVI. Die geometrischen Abmessungen eines Körpers hängen von der Struktur desjenigen Teiles des Weltraumes ab, in welchem er sich befindet. In solchen Teilen, wo die Struktur anisotrop ist, d. h. nach verschiedenen Richtungen hin ungleich, hängen die Ab-

messungen des Körpers von seiner Lage ab. Einen diesbezüglichen Fall haben wir in der Nähe großer Körper z. B. der Sonne. Ein auf der Oberfläche der Sonne vertikal aufgestellter Stab erscheint kürzer als derselbe Stab in horizontaler Lage.

XVII. Die die Struktur und die Geometrie des Raumes bestimmenden, entfernt liegenden kosmischen Massen bestimmen gleichfalls die Geschwindigkeit des Verlaufes der Zeit. Die Zeit verläuft in der Nähe großer Massen langsamer als z. B. auf der Erde. Das muß so verstanden werden: angenommen, es finde auf der Erdoberfläche eine physikalische Erscheinung statt, und es seien alle Bedingungen, von denen der Verlauf dieser Erscheinung abhängt, genau angegeben. Zu diesen Bedingungen gehören z. B. die Temperatur, der Druck, die wirkenden Kräfte, die Zusammensetzung und Massen der Körper, die in diesen Erscheinungen mitwirken, die Einrichtung des Apparates, in dem die Erscheinung vor sich geht u. a. m. Eine beliebige Taschenuhr kann uns als einfaches Beispiel dienen; als „Erscheinung“ wollen wir einen vollen Umlauf des Sekundenzeigers betrachten; ihre Dauer beträgt eine Minute. Stellen wir uns jetzt vor, daß eine genau ebensolche Uhr auf die Sonne gebracht sei und daß es auf irgendeine Weise gelänge, daselbst die nämlichen Bedingungen wie auf der Erde herzustellen, d. h. z. B. dieselbe Temperatur, Druck, Beschaffenheit des umgebenden Gases usw.; es würde dann als einziger Unterschied das auf der Sonne vorhandene Gravitationsfeld und also auch die Struktur (Krümmung) des Raumes übrig bleiben, welche andere sind als auf der Erde. Dann wird es sich erweisen, daß der Sekundenzeiger der Uhr auf der Sonne langsamer als jener auf der Erde vorrückt. Das will heißen: Wenn der Beobachter auf der Erde die Sonnenuhr sehen könnte, dann würde er sich überzeugen, daß letztere im Vergleich mit der Erduhr zurückbleibt. Nehmen wir weiter an, daß beide Uhren, jede für sich, mit einem Mechanismus verbunden sind, welcher bei jedem vollen Umlauf des Sekundenzeigers ein Lichtsignal ausstrahlt, so wird der Beobachter auf der Erde finden, daß die Signale der Sonnenuhr langsamer aufeinanderfolgen als jene der Erduhr. Die Periode der Erscheinung auf der Sonne ist größer als die auf der Erde.

Ersetzen wir die Uhr durch ein Atom, welches Strahlen von einer bestimmten Schwingungszahl aussendet. Die einzelnen Schwingungen stellen die periodische Erscheinung vor, die in diesem Falle die von der Uhr ausgehenden Lichtsignale vertritt. Die Periode auf der Sonne ist größer als die auf der Erde; folglich muß die Schwingungszahl kleiner sein. Die Spektrallinie muß sich zum roten Ende

des Spektrums verschieben. Diese Verschiebung ist sehr gering und bis jetzt ist es noch nicht gelungen, ihr Vorhandensein mit Sicherheit festzustellen. Es gibt noch eine andere Methode, die Notwendigkeit einer derartigen Verschiebung der Spektrallinie zu beweisen, sie besteht auf der Anwendung jenes Äquivalenzprinzips, von dem unter Nr. XI die Rede war.

XVIII. Die Bahn des Merkur dreht sich in ihrer Ebene um $574''$ (Winkelsekunden) in 100 Jahren. Die Theorie (Himmelsmechanik) aber lehrt, daß die Drehung unter dem Einflusse der übrigen Planeten bloß $532''$ in 100 Jahren betragen muß. Die Zusatzdrehung von $42''$ in 100 Jahren blieb unerklärt. Die Einsteinsche Theorie zeigt, daß, dank der merkbar veränderten Struktur des Raumes in der Nähe der Sonne, eine Drehung der Merkurbahn um ungefähr $42''$ in 100 Jahren stattfinden muß.

XIX. Ein Lichtstrahl, der einen großen Körper unweit von dessen Oberfläche streift, muß infolge der veränderten Struktur des Raumes eine gewisse Ablenkung seiner Richtung erfahren. Infolgedessen müssen uns die nahe an der Sonnenscheibe stehenden und bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbaren Sterne in der Richtung vom Mittelpunkt der Sonnenscheibe weg verschoben erscheinen. Diese Verschiebung muß umgekehrt proportional der Winkelentfernung des Sternes vom Mittelpunkt der Sonne sein. Die größte Verschiebung am Rande der Sonnenscheibe muß $1,7''$ betragen. Diese Erscheinung hängt davon ab, daß die Lichtgeschwindigkeit bei Annäherung an einen Körper mit sehr großer Masse abnimmt. Die während der totalen Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 ausgeführten Beobachtungen haben ein mit den Vorhersagungen der Einsteinschen Theorie übereinstimmendes Resultat ergeben. Bedauerlicherweise haben die späteren Beobachtungen zu keinen ganz klaren Ergebnissen geführt.

XX. Wenn der Weltraum ein in sich selbst abgeschlossenes Ganzes bildet, so müßte z. B. ein von einem Sterne ausgehender Lichtstrahl, nachdem er das ganze Weltall durchheilt hat, an die Stelle zurückkehren, von der er ausgegangen war, vorausgesetzt, daß er weder absorbiert, noch in der Nähe eines anderen Sternes abgelenkt wurde. Eine Überschlagsrechnung ergibt, daß der Lichtstrahl den vollen Weg im Verlaufe von 200 Millionen Jahren zurücklegen wird. Da das Gesagte sich auf alle von dem Sterne ausgehenden Strahlen bezieht, so müßte an dem Orte des Zusammentreffens dieser Strahlen ein Bild des Sterns wie in einem Brennpunkte entstehen. Von diesem Brennpunkte müssen die Strahlen wieder auseinander-

gehen und ein auf der Erde befindlicher Beobachter müßte in diesem Brennpunkte einen Stern erblicken, trotzdem dort natürlich kein Stern vorhanden ist. Solche Sterne nennt man Phantome. Der Gedanke an diese Phantome hat bei einigen Astronomen großes Interesse hervorgerufen.

XXI. Der Weltraum hat nicht drei, sondern vier Dimensionen; die vierte Dimension ist die Zeit. Das unter Nr. X erwähnte Postulat bezieht sich auf diesen Raum. Im vierdimensionalen Raume wird die Bewegung der Körper im Schwerefeld durch die kürzesten Bahnen (geodätische Linien) dargestellt. Diese Behauptung tritt an Stelle der alten Bewegungsgesetze der Newtonschen Mechanik. Die Planetenbahnen sind Projektionen auf den dreidimensionalen Raum jener geodätischen Linien, welche ihre Bewegung im vierdimensionalen Raume beschreiben.

XXII. Einstein hat die allgemeine Gravitationstheorie geschaffen. Im speziellen Falle führen seine Formeln als erste Näherung zu dem Newtonschen Gravitationsgesetz.

Kapitel VII.

Das Fazit. Der Fortschritt.

Die letzten drei Kapitel waren gleichsam ein fast ununterbrochener Lobgesang zu Ehren der neuen Physik; nur an zwei oder drei Stellen erklangen einige Mißtöne und wurden nicht, wie jedes musikalische Ohr in einem Musikstück zu hören erwartet, harmonisch aufgelöst. In diesem Kapitel wollen wir das Fazit ziehen von allem, was in der neuen Physik groß und ruhmvoll ist und alle glänzenden Seiten ihrer Geschichte, auf die sie ein Recht hat, stolz zu sein, noch einmal aufschlagen. Wir können uns jetzt auf die einfache kurze Inhaltsangabe der neuen wissenschaftlichen Errungenschaften beschränken und noch einmal die Resultate der fünfzigjährigen wissenschaftlichen, schöpferischen Arbeit, ohne besondere Lobpreisungen, deren sie nicht bedürfen, vor unseren Augen vorbeiziehen lassen. Die drei vorhergehenden Kapitel sprechen in genügendem Maße zu ihren Gunsten. Doch nur das Hervorragendste wollen wir in diese kurze Aufzählung aufnehmen.

I. Die Entwicklung der experimentellen Kunst und die Vergrößerung der Meßgenauigkeit.

II. Neue Tatsachen. Die Hertzschen Strahlen, die Röntgenstrahlen, der Zeemaneffekt, der Starkeffekt, die Isotopen, der spontane und künstliche Zerfall der Atome, der Strahlungsdruck, die Gesetzmäßigkeiten in den Spektren, die Supraleiter, die Verflüssigung aller Gase.

III. Übergang von Hypothesen in Tatsachen. Die Atomhypothese, die molekular-kinetische Hypothese (die Brownsche Bewegung), die Hypothese vom Bau der Kristalle.

IV. Die Vertiefung des Verständnisses. Der zweite Hauptsatz und die Wahrscheinlichkeit (Boltzman, Gibbs), das periodische System von Mendelejeff, die Beziehung des periodischen Systems zu den Elektronenschichten der Atome. Die Newtonsche Mechanik als spezieller Fall einer allgemeineren, komplizierteren Mechanik. Das Verschmelzen der Prinzipien der Erhaltung der Masse und der Erhaltung der Energie; die Wesensgleichheit der Masse und der Energie. Der Übergang vom Studium des Baues der Moleküle zum Studium des Baues der Atome. Das Verhalten der spezifischen Wärme als Resultat des Zusammenhanges zwischen Wärme- und Lichtvibratoren. Wärmebewegungen als elastische Schwingungen.

V. Neue Hypothesen und Theorien. Die Maxwell'schen Gleichungen und die elektromagnetische Lichttheorie. Die Theorie der schwarzen Strahlung (Planck). Die Theorie der Energiequanten und die Plancksche Konstante h . Die Theorien von Bohr und Sommerfeld. Einige von den wichtigsten Resultaten: die theoretische Bestimmung des Zahlenwerts der Rydbergschen Konstanten, die Erklärung der Verschiedenheit ihrer Werte bei Wasserstoff und Helium; die Erklärung der seltsamen Gesetze der photoelektrischen Erscheinungen; die Erklärung der Satelliten, die Erklärung des Entstehens der Serien der Spektrallinien; die Systematik der Spektren der Röntgenstrahlen; die Vorhersagung des chemischen Charakters des Elementes Nr. 72 (Hafnium) usw.

VI. Die allmähliche Verdrängung des Anthropomorphismus. Die Verschmelzung der Abschnitte der Physik. Die Entstehung der Abschnitte der Physik war abhängig von anthropomorphen, subjektiven Motiven im Zusammenhange mit den entsprechenden Sinnesorganen. Der Gesichtssinn rief die Lehre vom Lichte hervor; der Gehörsinn jene vom Schalle; der Tastsinn die Wärmelehre. An Stelle der subjektiven Eindrücke sind objektive Tatsachen getreten. Die Lehre vom Lichte verschmolz mit den elektromagnetischen Erscheinungen zu einem gemeinsamen Ab-

schnitt der Physik. Dasselbe fand auch mit der Lehre von der Wärme und den akustischen Schwingungen statt. In der Molekularphysik tritt mehr und mehr ihr Zusammenhang mit den elektrischen und den magnetischen Erscheinungen hervor. Die Elektronentheorie und die Theorie der Quanten dringen in alle Abschnitte der Physik ein und stellen enge Beziehungen zwischen ihnen her. Die Plancksche Konstante h und die Gaskonstante R treten in allen Abschnitten der Physik auf. Die erste beim Quanteln, die zweite, die zunächst in der Lehre von den Gasen erschien, verbreitete sich über die ganze Physik dank der Konstanten k Boltzmanns, welche das Weltprinzip des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik mit der Wahrscheinlichkeitslehre verbindet und gleich $R:N$ ist; hier ist N die Avogadro'sche Zahl, d. h. die Anzahl der Teilchen in dem Grammolekül eines beliebigen Stoffes. Die Größen h und k erobern alle Abschnitte der Physik und verbinden sie miteinander.

VII. Die neue Weltauffassung. Sie setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

1. Die Anzahl der Urstoffe, aus denen das Weltall erbaut ist, ist nicht der Zahl der chemischen Elemente (92) plus zwei Elektrizitäten, plus Äther, d. h. gleich 95, sondern gleich zwei. Die Existenz des Äthers ist einstweilen sehr zweifelhaft; viele Forscher verneinen dieselbe unbedingt. Der Übergang von 95 wesentlich von einander verschiedenen Urstoffen auf zwei oder selbst drei, stellt eine großartige Vereinfachung der Weltauffassung vor.

2. Die Gesetze und Regeln, denen die physikalischen Erscheinungen gehorchen, muß man als statistische Gesetze und Regeln betrachten. Dies ist die Folge des molekularen Baues der Stoffe, der ungeheuren Anzahl Teilchen oder Elektronen in einem nicht zu kleinen Volumen. Die Gesetze und Regeln sind für den Fall einer geringen Anzahl Teilchen nicht anwendbar.

3. Die Weltauffassung muß nicht auf Grundlage der Mechanik, d. h. der Lehre von den Kräften und den Bewegungen — sondern auf Grundlage der Lehre von den elektromagnetischen Erscheinungen aufgebaut werden. Es ist hoffnungslos, weil unmöglich, die letzteren Erscheinungen mit Hilfe der Mechanik zu erklären; im Gegenteil soll man die Mechanik auf elektromagnetischer Grundlage aufbauen.

4. Die Atome sind nicht die letzten Bausteine des Weltalls. Sie unterliegen dem Zerfall, sowohl spontan, d. h. von selbst, in den radioaktiven Erscheinungen als auch künstlich in den Versuchen Rutherfords.

5. Ein und dasselbe Element kann in mehreren Abarten vorkommen. So gibt es zu je zwei Abarten Chlor, Kalium, Nickel, Brom, Rubidium, Argon und andere, drei Abarten Magnesium, zu je sechs Abarten Krypton und Quecksilber usw. Die Atomgewichte dieser Abarten sind ganze Zahlen.

6. In den physikalischen Erscheinungen spielt eine ausschließlich wichtige Rolle die Plancksche Konstante h , das elementare „Wirkungsquantum“ (Energie mal Zeit). Auf diesem Begriffe beruht jene neue Methode der Analyse der Erscheinungen, welche man „quanteln“ nennt. Im engsten Zusammenhange damit stehen die Strahlungsquanten, welche in allen Erscheinungen, in denen Strahlung entsteht oder mitwirkt, zutage treten.

7. Die Relativitätstheorie ist bestrebt, unsere Weltauffassung zu beeinflussen. Das in den 22 Punkten des § 10 des vorhergehenden Kapitels Gesagte brauchen wir nicht zu wiederholen.

Kapitel VIII.

Das Fazit. Der Rückschritt.

§ 1. Wissen und Verstehen. Wir haben uns wiederholt des Vergleiches mit dem Theater bedient und sprachen von der offenen Bühne und dem Gebiete hinter den Kulissen. Auf der Bühne haben wir vor uns als feststehende Tatsachen die physikalischen Erscheinungen mit ihren qualitativen Kennzeichen und quantitativen Beziehungen, den Regeln und Gesetzen, welchen diese Erscheinungen unterworfen sind. Das sind die Bausteine, aus denen das Gebäude der Wissenschaft errichtet werden soll. Die offene Bühne, die ist das Gebiet des Wissens. Die 50jährige Arbeit zahlreicher Forscher hat dieses Gebiet ungeheuer erweitert, hat die Zahl der Tatsachen vermehrt und neue Bausteine auf der offenen Bühne angehäuft.

Im Gebiete hinter den Kulissen sind die unserer unmittelbaren Beobachtung unzulänglichen Urquellen jener Tatsachen verborgen, von denen wir wissen. Die Aufgabe der Wissenschaft besteht darin, diese Urquellen zu erkennen und das Gebäude der wahren Wissenschaft zu errichten; auf seinem Giebel steht nur das eine Wort geschrieben „Verstehen“. In diesem Worte findet das höchste Ziel der Wissenschaft seinen Ausdruck.

Das Verstehen steht unendlich höher als das Wissen. Es ist unmittelbar von keinem großen Nutzen, wenn die Zahl der Bau-

steine und Ziegel verdoppelt, verdreifacht oder verzehnfacht wird. Nur eins kann man dann sagen: man kann hoffen, daß das Gebäude, für welches sie bestimmt sind, größer, schöner und im Inneren besser eingerichtet werden wird. Wenn aber die Zunahme des Wissens von einer Abnahme des Verstehens begleitet wird, so kann man nicht umhin, darin das Anzeichen eines Rückschrittes zu erblicken.

Im weiteren werden wir viel von „Unverständlichem“ zu sprechen haben, und wir müssen vor allen Dingen genau feststellen, was wir unter dieser Bezeichnung verstehen werden. Sie kann sich sowohl auf die Tatsachen der offenen Bühne als auch auf die Hypothesen über die hinter den Kulissen verborgenen Urquellen dieser Tatsachen beziehen. Was die ersten anbelangt, so ist es vollständig klar, daß sich die neue Physik in nichts von der alten unterscheidet. Auch vor 50 Jahren war (oder schien!) nur ein bestimmter Teil der zu jener Zeit bekannten Tatsachen verständlich, d. h. konnte mit Hilfe der den damals herrschenden Theorien zugrunde liegenden Hypothesen erklärt werden. Es blieb stets eine große Zahl von Tatsachen übrig, welche in den Rahmen dieser Theorien nicht hineinpaßten. Dasselbe sehen wir auch heutzutage. Selbstverständlich ist eine große Zahl von Tatsachen, welche vor 50 Jahren zu den unverständlichen gerechnet werden mußten, jetzt in das Gebiet der verständlichen, von den neuen Theorien erklärten, übergegangen. Doch haben ihren Platz zahlreiche neu entdeckte Tatsachen eingenommen, welche bis jetzt auf Grund der neuen Theorien nicht erklärt werden konnten. So war es, so ist es auch jetzt noch der Fall. Als unlösbar und müßig erscheint uns die Aufgabe, die Größe jenes Teiles bekannter Tatsachen, welche unverständlich bleibt, wenn auch nur prozentual anzugeben. Die Größe dieses Teiles ist bedeutenden Schwankungen unterworfen je nach der Richtung, welche in der wissenschaftlichen Forschungstätigkeit im gegebenen Augenblicke vorherrschend ist, die experimentelle, neue Tatsachen sammelnde oder die theoretische, welche sie zu erklären sucht.

Wenn wir im weiteren über „Unverständliches“ sprechen werden, so werden wir offenbar diese Bezeichnung nicht auf die Tatsachen der offenen Bühne anwenden, sondern ausschließlich auf das Gebiet hinter den Kulissen, auf die Hypothesen, auf welcher die Wissenschaft ihre Theorien zur Erklärung der Tatsachen aufbaut. Es entsteht hier aber die wichtige, und wie wir gleich sehen werden, für die Physik neue Frage: Was die Worte „eine unverständliche Hypothese“ zu bedeuten haben? Was ist das für eine Wissenschaft,

welche durch unverständliche Hypothesen unverständliche Tatsachen verständlich machen will? Welchen Nutzen hat die Wissenschaft von einer solchen „Erklärung“ der Erscheinungen und ist das nicht einfach eine Übertragung des Rätsels von einem Ort zu einem anderen, welche gar keinen Fortschritt, sondern vielmehr ein Merkmal des Rückschrittes bedeutet? Der Leser, welcher den Inhalt des vorhergehenden Kapitels noch nicht kennengelernt hat, wird sogar die Möglichkeit des Erscheinens unverständlicher Hypothesen bezweifeln. Er wird sagen, daß die Hypothesen von den Forschern nach freier, durch nichts, wie es scheint, eingengter Wahl gewählt werden. Was kann sie zwingen, eine Hypothese einzuführen, welche sie selbst nicht verstehen? Schließlich taucht noch die letzte und vielleicht am meisten interessante Frage vor uns auf: Wenn in der Wissenschaft unverständliche Hypothesen wirklich anfangen eine Rolle zu spielen, kann man nicht eine mögliche Ursache ihres Auftretens namhaft machen? Diese letzte Frage wollen wir uns bestreben, im § 6, allerdings nur versuchsweise und vielleicht zu kühn, zu beantworten. Von den übrigen Fragen wollen wir hier sofort die dritte — „welchen Nutzen für die Wissenschaft usf.“ beantworten. Ein Nutzen ist wohl da, wenn mit Hilfe einer verständlichen Hypothese eine Erklärung einer sehr großen Zahl unverständlicher Tatsachen erreicht wird. Die vielen Unverständlichkeiten werden sozusagen durch die eine ersetzt. Der Nutzen für die Wissenschaft wird noch größer und fällt in die Augen, wenn eine unverständliche Hypothese nicht nur eine große Menge von Tatsachen erklärt, sondern auch neue Tatsachen voraussagen kann, welche dann durch das Experiment bestätigt werden. Außerdem muß man im Auge behalten, daß die Forscher natürlich die Hoffnung nicht aufgeben, daß die von ihnen eingeführte Hypothese mit der Zeit verständlich werden wird.

Wir wenden uns der ersten der oben aufgezählten Fragen zu: Was bedeuten die Worte: „eine unverständliche Hypothese“ oder, anders gesagt, wann bezeichnen wir eine Hypothese als unverständlich, worin bestehen ihre Merkmale? Die Antwort ist nicht schwer. Wir nennen eine Hypothese unverständlich erstens, wenn sie Elemente enthält, welche festgestellten physikalischen Gesetzen geradezu widersprechen, indem sie aus unbegreiflichen Gründen Ausnahmen davon bilden; zweitens, wenn sie Größen einführt, für welche ein mathematischer Ausdruck gegeben wird, deren physikalischer Sinn dagegen völlig rätselhaft bleibt, während aus dem ganzen Aufbau der auf dieser Hypothese begründeten Theorie deutlich hervorgeht, daß gerade diese Größen in vielen und verschiedenartigen

Erscheinungen eine wesentliche Rolle spielen. Ausgerüstet mit einem für ihn unverständlichen Werkzeuge vollbringt der Forscher Wunder, beginnt vieles zu verstehen, was früher unverständlich war, entdeckt neue Erscheinungen, faßt scheinbar weit Entlegenes zusammen, alles das in der Hoffnung, daß er mit der Zeit den Sinn und die Bedeutung des wunderbaren Werkzeuges verstehen wird. Es hinterlassen aber die auf diesem Wege erreichten wissenschaftlichen Triumphe neben dem Erstaunen und der Bewunderung auch gleichzeitig ein Gefühl tiefer Unbefriedigung. Wir sehen, daß ein neues wissenschaftliches Gebäude errichtet wird, doch ist sein Fundament uns unverständlich und erweckt schwere Bedenken.

In der alten Physik waren im obigen Sinne des Wortes unverständliche Hypothesen nicht vorhanden. Die streng mechanische Weltanschauung jener Zeit verhinderte das Auftreten solcher Hypothesen. Ganz anders in der neuen Physik. Wir haben schon wiederholt über die große Rolle gesprochen, welche darin die Maxwellsche Theorie, weitergeführt in der Elektronentheorie, und die Quantentheorie, welche zur Entdeckung eines neuen Werkzeuges der wissenschaftlichen Forschung, des Quantelns, geführt hat, spielen. Wir wollen nun zu ihrer Kritik, deren Andeutungen der Leser auch schon im vorhergehenden gewiß bemerkt hat, übergehen.

§ 2. Die Maxwellsche Theorie und die elektromagnetische Weltanschauung. In den §§ 2 und 3 des sechsten Kapitels haben wir die Maxwellsche Theorie betrachtet, d. h. die Maxwellschen Gleichungen und die elektromagnetische Lichttheorie, und haben auch die Elektronentheorie kurz gestreift. Wir sahen, daß man die elektrische Kraft E und die magnetische Kraft H als reell im Raume existierend ansieht, und haben die Erscheinung, welche die Ausbreitung der elektromagnetischen Schwingungen (Störungen) genannt wird, beschrieben. Ferner haben wir auf die Unmöglichkeit hingewiesen, diese Erscheinungen auf irgendwelche im Äther vor sich gehende mechanische Prozesse zurückzuführen, welche (verständliche) Eigenschaften man dem Äther auch zuschreiben mag. Dazu ist noch hinzuzufügen, daß zahlreiche Forscher heutzutage die Existenz des Äthers vollständig in Abrede stellen, was wir ebenfalls mehrmals erwähnt haben. In der elektromagnetischen Lichttheorie spielt er jedenfalls keine Rolle. Wie hat man also das Vorhandensein der Kräfte E und H zu verstehen, welche die Feldstärken des elektrischen und des magnetischen Feldes in einem gegebenen Punkte bestimmen? Was geschieht in diesem Punkte, wenn die Größen der zueinander senkrechten Kräfte E und H periodisch

zwischen $+E$ und $-E$, $+H$ und $-H$ schwanken? Und wie vollzieht sich die Übertragung dieser Schwingungen längs der zu E und H senkrechten Geraden (Strahl) zu solchen Punkten, in welchen vor dem Eintreffen der sich fortpflanzenden Schwingungen überhaupt kein E und H vorhanden war? Warum erfolgt endlich die Ausbreitung dieser Schwingungen mit der enormen Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde? Auf alle diese Fragen gibt es keine Antwort! Das ganze Fundament, auf welchem das beschriebene Bild erbaut ist, ist unverständlich. Doch was bedeutet eigentlich diese Behauptung? Warum finden wir dieses Bild unverständlich? Wir müssen zugeben, daß es uns nur deswegen unverständlich erscheint, weil wir es nicht aufbauen können, indem wir auf dem Boden der mechanischen Weltauffassung bleiben.

Wenn es sich aber wirklich so verhält, so scheint ein einfacher Ausweg möglich zu sein. Die Grundlage der alten Weltauffassung war die Mechanik, welche auf den von Newton empirisch aufgestellten Bewegungsgesetzen aufgebaut ist. Bewegungen und Kräfte waren die primären ursprünglichen Begriffe. Nun haben wir eine neue Weltauffassung, in welcher das elektrische und magnetische Feld im Raume die Rollen der primären, ursprünglichen Begriffe spielen. Diese Felder besitzen bestimmte Feldstärken E und H , welche wir Kräfte nennen, weil sie einem elektrisierten oder magnetisierten Körper, sowie einem Leiter, in welchem bewegte Elektronen sich befinden, eine Beschleunigung erteilen können. Diese Kräfte können dem Betrage nach sich zeitlich verändern z. B. in der Art von Schwingungen, und diese Schwingungen können sich im Raume ausbreiten. Wir könnten sagen: der Weltraum ist ein elektromagnetischer Raum, und das ist seine primäre, grundlegende Eigenschaft, welche man als etwas a priori Gegebenes, als Postulat, annehmen muß. Die neue Weltauffassung legt der Wissenschaft von der toten Materie jene empirisch gefundenen Gesetze zugrunde, welche die elektromagnetischen Erscheinungen beherrschen und durch die Maxwell'schen Gleichungen ausgedrückt werden. Diese Gesetze treten jetzt an die Stelle der gleichfalls empirisch gefundenen Bewegungsgesetze (*leges motus*) von Newton. Die Wissenschaft hat jetzt als hoffnungslos die Bemühungen aufgegeben, die Gesetze des elektromagnetischen Feldes aus den drei Grundgesetzen der Mechanik abzuleiten; im Gegenteil sucht sie jetzt zu zeigen, daß die letzteren als logische Folgen der ersteren abgeleitet werden können.

Können wir nun behaupten, daß bei einer solchen Fragestellung und bei dieser Betrachtungsweise der großen Evolution unserer Weltauffassung, die Physik von dem Vorwurf, der in den Worten „eine unverständliche Hypothese“ steckt, freigesprochen werden kann, einem Vorwurf, von welchem die alte Physik zweifellos frei war? Wie schön wäre es, wenn man diese Frage bejahen könnte! Doch ist es unmöglich; die Antwort kann leider nur verneinend lauten, und der Grund ist ein sehr einfacher: Bewegungen und Kräfte sind Begriffe, mit welchen wir aus der täglichen Erfahrung vertraut sind. Wir selbst bewegen uns und besitzen Kraft, und wir sind sehr gut mit der Wirkung einer anderweitigen Kraft auf uns vertraut. Die Worte „Bewegung“ und „Kraft“ kennt jedes Kind. Wo wir auch hinblicken, sehen wir Bewegungen von Körpern und die Wirkung von Kräften d. h. derselben Ursachen, welche uns so gut aus den Empfindungen des Muskelgefühls bekannt sind. Es ist übrigens klar, daß nach dem eben Gesagten wir der alten Physik den Vorwurf eines naiven Anthropomorphismus machen können.

Die elektrischen und magnetischen Kräfte, welche auf Ladungen, Magnete und Ströme wirken, scheinen uns nicht durchaus unverständlich zu sein, sie sind der Gravitation analog, mit welcher wir aus der täglichen Beobachtung der fallenden Körper vertraut sind. Aber die im leeren Raume entstehenden, schwingenden und sich ausbreitenden elektrischen und magnetischen Kräfte (oder Feldstärken) in einem Raume, aus welchem sogar der in diesem Falle nutzlose Äther entfernt ist, und die dazu noch jeglichen Wirkungsobjekts entbehren, sind uns unverständlich. Jener Ausweg aus der Schwierigkeit, welcher uns vorschwebte, führt nicht zum Ziele. Der Maxwell'schen Theorie und der auf ihr fußenden elektromagnetischen Weltauffassung liegt eine unverständliche Hypothese zugrunde, das erste Beispiel jenes Geistes, welcher für die neue Physik so bezeichnend ist und der alten Physik völlig fremd war.

§ 3. Die Plancksche Konstante h , die Bohrsche Theorie und die Quantelung. In den §§ 4 bis 6 des sechsten Kapitels haben wir die Fragen, welche in dem Titel dieses Paragraphen angeführt sind, ziemlich ausführlich kennengelernt. An dieser Stelle können wir uns auf die Aufzählung alles dessen beschränken, was darin für die hier zu betrachtende Frage nach dem Geiste der neuen Physik besonders kennzeichnend ist:

I. Bei den Bemühungen, das Gesetz der schwarzen Strahlung theoretisch abzuleiten, erhielt Planck erst dann ein mit den experi-

mentellen Ergebnissen übereinstimmendes Resultat, als er die Voraussetzung machte, daß die Lichtoszillatoren die Strahlung nicht kontinuierlich, sondern quantenhaft ($h\nu$) ausstrahlen und aufnehmen. Die Konstante h hat die Dimension einer Wirkung (Energie mal Zeit), sie stellt gewissermaßen ein elementares Wirkungsquantum vor. Indem sie in alle Abschnitte der Physik hineinspielt, hat sie ihre Weltbedeutung gezeigt, hat sie bewiesen, daß sie in den physikalischen Erscheinungen eine große Rolle spielt; sie beginnt auch die Chemie zu erobern. Was hat sie aber physikalisch zu bedeuten? Warum ist sie so wichtig? Warum drängt sie sich (um nicht zu sagen steckt ihre Nase) in die verschiedensten physikalischen Erscheinungen ein? Mit einem Wort — was ist h ? Unbekannt und unverständlich!

II. Was ist ein Strahlungsquantum? Warum ist es der Schwingungszahl proportional? Warum wird es nur als Ganzes ausgestrahlt und absorbiert? Warum enthält es in seinem Ausdrucke dieselbe Größe h , welche als selbständiges Etwas eine so große Rolle in vielen Fragen spielt, welche gar keine Beziehung zur Strahlung haben? Das weiß man nicht und versteht es nicht.

III. Die Lichtquanten Einsteins bilden einen der wundesten Punkte der modernen Physik. Das Licht wird in Quanten ausgestrahlt und nach Durchlaufen eines beliebigen Weges wiederum in Quanten absorbiert. Dazwischen haben wir aber eine Schwingungsbewegung, elektromagnetische Wellen. Wie entwickeln sie sich aus den Quanten und wie rollen sie sich wieder zu Quanten zusammen? Sind aber im Zwischenraume keine Schwingungen, keine Wellenflächen, sondern ebenfalls nur Quanten vorhanden, wie soll man dann die Grunderscheinungen der Interferenz, Polarisation, Brechung und Dispersion erklären? Hier ist eine vollständige Sackgasse, hier ist alles unverständlich.

Dagegen werden die photoelektrischen Erscheinungen, die Entstehung der primären Röntgenstrahlen und der sekundären Kathodenstrahlen, die Erscheinungen der Fluoreszenz und der Ionisation (durch Strahlung) erst dann verständlich, wenn man die Quanten $h\nu$ einführt.

IV. Die Bohrsche Theorie.

1. Warum sind im Atom nur diejenigen Elektronenbahnen möglich und erlaubt, welche der Quantenbedingung (14) genügen? Unverständlich.

2. Warum strahlt das Elektron bei seiner Bewegung auf einer erlaubten Bahn keine Energie aus? Das steht doch in einem schroffen Gegensatze zur experimentell und theoretisch fest-

gestellten Tatsache, daß eine Strahlung stattfinden muß, falls die Bewegung eines Elektrons beschleunigt wird. Hier ist alles unverständlich.

3. Warum entsteht beim Übergange eines Elektrons von einer erlaubten Bahn auf eine andere erlaubte gerade ein Quantum Strahlenenergie? Wie vollzieht sich das? Unverständlich. Und doch, welche großartigen Erfolge hat die Bohrsche Theorie erzielt!

4. Nach dem Vorgehen von Bohr und Sommerfeld hat man in der Physik angefangen, das Quanteln weitgehend anzuwenden, d. h. erlaubte (von wem?) Zahlenwerte physikalischer Größen, welche in verschiedenen Molekularerscheinungen eine Rolle spielen, herauszusondern. Man hat ein mathematisches Rezept der Quantelung gefunden und wunderbare Resultate erzielt, es ist aber noch nicht das Rezept gefunden, nach welchem man diese Quantelung begreifen könnte. Die Forscher quanteln und verstehen nicht was sie tun; die Resultate sind aber ausgezeichnet, die Wissenschaft blüht. Außerordentlich unverständlich.

5. In den Atomen von nicht sehr kleiner Ordnungszahl sind die Elektronen in Schalen, welche den Perioden des Mendelejeffschen Systems entsprechen, angeordnet. Die erste Schale (dem Kerne am nächsten) enthält eine Energiestufe, die zweite drei, die dritte fünf und die vierte sieben. Sie entsprechen verschiedenen Energiewerten des ganzen Atoms. Es enthält aber die erste Schicht wahrscheinlich zwei, die zweite und dritte je acht Elektronen. Wie soll man sich die Energiestufen physikalisch vorstellen und wie sind sie an die Elektronen gebunden? — Unverständlich.

Und doch, diese Energiestufen haben die glänzende Theorie der Röntgenspektren ermöglicht, ihre vollständige Systematik gegeben und die Entstehung jeder einzelnen aus der großen Anzahl der Spektrallinien der *K*-, *L*- und *M*-Gruppen erklärt!

Mit den hier angeführten fünf Punkten ist noch bei weitem nicht all das Unbegreifliche erschöpft, was zu den Grundlagen der Bohrschen Atomtheorie gehört. Der weitere Ausbau dieser Theorie führte zu der Notwendigkeit, noch eine ganze Reihe weiterer unverständlicher Hypothesen zu benutzen. Unter diesen ist von größter Wichtigkeit das ebenfalls von Bohr eingeführte sogenannte Korrespondenzprinzip. Leider müssen wir es uns versagen, dieses Prinzip hier zu erläutern, da dies viel zu weit führen würde.

Faßt man alles zusammen, so kann man wohl sagen, daß die jetzige Physik an gewisse Teile der Heilkunde erinnert, die in vielen Fällen mit größtem Erfolge Krankheiten kuriert, indem sie

fertige Rezepte benutzt, ohne über die Art der Wirkung der betreffenden Arznei auf den menschlichen Organismus irgend etwas Bestimmtes aussagen zu können. So haben wir jetzt in der Physik das wunderbare Rezept des Quantelns, diesen Zauberstab, der dem Fortschritt dieser Wissenschaft immer neue und neue Wege öffnet. Auch das Korrespondenzprinzip ist ein Rezept zum tieferen Eindringen in die Struktur der Spektren; es gibt z. B. an, auf welche Weise man theoretisch die relative Helligkeit und den Polarisationszustand der Spektrallinien bestimmen kann. Es ließen sich noch viele Beispiele anführen. Die Rezepte sind da und wirken Wunder; aber wieso sie wirken, ist unverständlich!

§ 4. Noch einige dunkle Punkte. Bei der Besprechung der unverständlichen Hypothesen der heutigen Physik haben wir von der Relativitätstheorie geschwiegen und mit Recht. Die sehr wenigen Postulate, auf welchen diese Theorie begründet ist, sind an sich klar und verständlich. Wenn viele sie als unverständlich bezeichnen, so muß man sagen, daß hier ein Mißverständnis vorliegt, indem die Unmöglichkeit, etwas zu verstehen mit der Unmöglichkeit, sich dieses oder jenes vorzustellen, verwechselt wird. Das hat mit unserem Thema nichts zu tun.

Wir haben versucht zu zeigen, daß die Einführung unverständlicher Hypothesen etwas Neues, in der alten Physik nie Dagewesenes vorstellt, und daß diese Neuerung als dunkler Punkt auf dem strahlenden Hintergrunde der großen Erfolge der neuen Physik erscheint. Auf diesem Hintergrunde lassen sich noch einige dunkle Punkte ausfindig machen, unvergleichlich weniger wichtige, aber doch unangenehme, welche durchaus keinen Fortschritt der Wissenschaft bedeuten. Wir wollen einige Beispiele anführen; für die Charakteristik der neuen Physik sind sie nicht besonders wichtig:

I. In der alten Physik unterschieden sich die beiden Elektrizitäten in keiner Weise voneinander, ausgenommen in der Richtung der durch sie hervorgerufenen Kräfte; sie waren sozusagen gleichwertig. Jetzt gilt als aktive, bewegliche Elektrizität die negative, aus Elektronen bestehend. Über die positive Elektrizität ist strenggenommen gar nichts bekannt. Sie befindet sich ausschließlich in den Atomkernen; bei äquivalenten Mengen ist das Volumen der positiven Elektrizität bedeutend geringer als das Volumen der negativen (persönlich zweifle ich stark daran). Doch das Erstaunlichste ist, daß wiederum bei äquivalenten Mengen die Masse der positiven Elektrizität 1840mal größer ist als die Masse der negativen Elektrizität. Das Elektron erfährt unter der Wirkung einer bestimmten

Kraft eine bestimmte Beschleunigung, eine dem Elektron äquivalente positive Elektrizitätsmenge erfährt dieselbe Beschleunigung unter der Wirkung einer Kraft, welche 1840mal größer sein muß. Etwas Einfaches und Klares ist durch etwas Nebelhaftes, noch gar nicht Aufgeklärtes, ersetzt. Jedenfalls kein Fortschritt.

II. In § 6 des zweiten Kapitels ist über die Lichttheorie berichtet worden, welche in der Physik vor den Hertz'schen Versuchen (1888) herrschte, und wir haben gesehen, welche Rolle der Äther in dieser Theorie gespielt hat. In Anbetracht der glänzenden Erfolge der Ätherschwingungstheorie (Entdeckung der konischen Refraktion) war man versucht zu glauben, daß das Vorhandensein des Äthers endgültig bewiesen sei. Lord Kelvin (W. Thomson, gestorben 1907), der größte Physiker der zweiten Hälfte des verflorbenen Jahrhunderts, sagt in einem seiner Aufsätze, daß wir über den Äther mehr wissen als über die Materie. Heutzutage ist die Ätherfrage ein wunder Punkt der Physik. Sehr viele der hervorragendsten Forscher leugnen das Vorhandensein des Äthers vollständig und verweisen ihn in dieselbe Rumpelkammer, wo das Phlogiston und ähnliche Ausgeburten alter Zeiten ruhen; andere nicht weniger berühmte Forscher halten krampfhaft an ihm fest. Einstein hat lange Zeit hindurch den Äther als zweifellos nicht existierend betrachtet; in der letzten Zeit ist er aber dazu geneigt, seine Realität wieder anzuerkennen; gleichzeitig schreibt er ihm aber ganz unverständliche Eigenschaften zu, so z. B. daß er weder ruht noch sich bewegt (!). Auf die Frage, ob die heutige Physik das Vorhandensein eines Äthers zugibt oder nicht, kann man keine Antwort geben. Das ist jedenfalls kein Fortschritt.

III. Ich behaupte, daß eine der Errungenschaften der neuen Physik, welche immer als besonders wichtig und für die heutige Wissenschaft besonders charakteristisch dargestellt wird, überhaupt nicht existiert; ich weiß, daß einige meiner verehrten Kollegen mit mir nicht einverstanden sind. Ich meine den Ausschluß der Fernwirkung und seine Ersetzung durch die Nahewirkung. In § 2 des sechsten Kapitels sahen wir, daß die Maxwell'schen Gleichungen in der Tat nur solche Größen miteinander verbinden, die in einem und demselben Raumpunkte gelten. In diesen Gleichungen ist die Fernwirkung tatsächlich ausgeschaltet. Schwieriger ist schon die Frage nach der Fortpflanzung der elektromagnetischen Störungen. Wie kommt hier die Übertragung von einem Punkte zum nächsten zustande und was bedeutet eigentlich der „nächste“ Punkt? Da überhaupt der ganze Vorgang unverständlich ist, können

wir diese Fragen nicht beantworten und die Frage, welche Rolle hier die Fernwirkung spielt, bleibt hier offen.

Etwas ganz anderes sehen wir, wenn wir uns der Bohrschen Theorie zuwenden und die zahlreichen Erscheinungen betrachten, bei denen eine Wechselwirkung zwischen den Elektronen oder dem Kerne und den Elektronen eine Rolle spielt. Hier wird bei allen Betrachtungen und Rechnungen das Coulombsche Gesetz angewandt, selbst in dem Falle, daß das Elektron $6,2 \cdot 10^{15}$ Umläufe in der Sekunde um den Kern ausführt (die erste Quantenbahn im Wasserstoffatom) und seine Geschwindigkeit durchaus nicht klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit ist. Dasselbe Gesetz wird angewandt, wenn die Elektronen in beliebigem Abstände voneinander und vom Kerne sich befinden. Ist denn das keine *actio in distans*? Die berühmte Vertreibung der Fernwirkung aus der Wissenschaft ist eine Fabel, der gepriesene Fortschritt ist tatsächlich nicht vorhanden.

§ 5. Der Geist der Evolution und die Evolution des Geistes.

In § 1 des ersten Kapitels war bereits gesagt, daß wir uns die interessante aber schwierige Aufgabe gestellt haben, die Evolution des Charakters oder, wenn man will, die Evolution des „Geistes“ der Physik im Verlaufe der letzten 50 Jahre zu schildern.

Der Charakteristik der Evolution der Physik waren die letzten zwei Drittel dieses Buches gewidmet, angefangen vom vierten Kapitel. Wir brauchen nichts zu wiederholen, insbesondere da ja im siebenten Kapitel eine freilich sehr gedrängte und nur das Wichtigste enthaltende Zusammenfassung der drei vorhergehenden Kapitel enthalten ist. Ich will nur meinen persönlichen Eindruck mitteilen. Wenn ich in Gedanken mir die Physik von 1873 vergegenwärtige und sie mit der Physik von 1923 vergleiche, so sehe ich vor mir zwei Bilder — eine wolkenlose Mondnacht und einen hellen sonnigen Tag.

Der Evolution des Geistes der Physik sind die ersten vier Paragraphen des achten Kapitels gewidmet. Diese Evolution ist durch das Auftreten von unverständlichen Hypothesen gekennzeichnet. Solche Hypothesen gab es in der alten Physik nicht. Der Leser wird mir entgegenhalten, daß solcher Hypothesen nur zwei gezählt worden sind: erstens die Hypothese, daß die Strahlung eine sich fortpflanzende elektromagnetische Schwingung sei, und zweitens die Quantenhypothese, welche mit der Planckschen Konstante h und der freilich etwas mystischen Methode der Quantelung in Zusammenhang steht. Wir antworten: ja, es sind nur zwei, doch

haben sie die ganze Physik in Besitz genommen, sind in fast alle ihre Abschnitte eingedrungen und haben jene elektromagnetische Weltauffassung geschaffen, welche die alte, mechanische ersetzt hat. Diese zwei Hypothesen bestimmen den Geist der modernen Physik. Dorthin, wo ihr Einfluß noch nicht zu spüren ist, suchen die Forscher sie mit allen Kräften hineinzubringen in der Überzeugung, daß damit eine reiche wissenschaftliche Ernte zu erzielen sein wird. Zweifellos befinden sie sich auf dem richtigen Wege.

Der Leser wird sagen, daß die Klarheit der alten Physik doch nur scheinbar war, und daß dasselbe sich auf die angeblich verständlichen alten Hypothesen bezieht. Die Antwort darauf findet sich im § 2 dieses Kapitels.

Der Leser wird ferner sagen, daß das, was heute unverständlich ist, morgen vielleicht klar und verständlich werden kann. Wir wollen nicht aufhören, auf den menschlichen Genius, welcher schon so vieles erreicht hat, zu vertrauen und auf weitere, große Fortschritte der Wissenschaft zu hoffen. Wir schließen uns diesem Gedanken mit vollem Herzen an und sind natürlich weit entfernt, das „*lasciate ogni speranza*“ auszusprechen. Doch gibt es einen Umstand, welcher unsere Hoffnung sehr herabsetzt. Er besteht in folgendem: Es sind etwa 56 Jahre her, seit die elektromagnetische Lichttheorie geschaffen wurde und 35 Jahre seitdem sie allgemein anerkannt wurde, und im Laufe dieser 35 Jahre ist die Wissenschaft auch nicht einen Schritt auf dem Wege vorwärts gekommen, welcher sie zum Verständnis dieser unverständlichen Hypothese führen soll.

Mit gewaltiger Übertreibung, ja scherzend, können wir sagen, die alte Physik war begreiflich, die neue ist unbegreiflich; in der alten Physik gab es ein Welt-Verstehen, in der neuen ein Welt-Nichtverstehen.

Aus Gründen, welche wir am Anfange des § 5 dieses Kapitels erwähnten, schweigen wir auch hier von der Relativitätstheorie. Selbstverständlich steht diese Theorie, welche die ganze Physik auf den Kopf gestellt, unsere elementaren Vorstellungen über den Raum und die Zeit abgeändert und alles das, was in den 22 Punkten des § 1 des sechsten Kapitels aufgezählt ist, uns gebracht hat, in erster Linie, sofern es sich um die Charakteristik der Evolution der Physik handelt. Doch augenblicklich handelt es sich um etwas anderes, um die Evolution des Charakters, des Geistes dieser Wissenschaft und in dieser Beziehung spielt sie gar keine oder fast gar keine Rolle und enthält keine, im Sinne der im § 1 dieses Kapitels gegebenen Definition, unverständliche Hypothesen.

Die Krümmung des Raumes können wir uns nicht vorstellen, wir können sie aber nach der Analogie der Krümmung einer geschlossenen Fläche oder einer geschlossenen Linie verstehen. Was den Zeitbegriff anbetrifft, so sind seine Eigenschaften klar formuliert; man mag daran glauben oder nicht glauben, findet aber keine Veranlassung, die Frage nach der Verständlichkeit im obigen Sinne aufzuwerfen.

§ 6. Eine mögliche Ursache des Auftretens unverständlicher Hypothesen. Das Weltall, d. h. die Gesamtheit alles Existierenden, würde vollständig beschrieben sein, wenn alle primären, wirkenden Urquellen mit allen ihren Eigenschaften bekannt wären. Die Urquellen und ihre Eigenschaften wollen wir der Kürze halber Elemente des Weltalls (oder des Weltgebäudes) nennen und die vielleicht allzu kühne Hypothese einführen, daß diese Elemente in zwei Gruppen geschieden werden können, in solche, welche unserer Erkenntnis zugänglich und solche, welche ihr bedingungslos unzugänglich sind. Jeder dieser zwei Gruppen ist ein bestimmtes Erscheinungsgebiet mit allen seinen qualitativen und quantitativen Kennzeichen untergeordnet. Wir wollen im weiteren von der ersten und von der zweiten Gruppe sprechen, welchen entsprechend das erste und zweite Gebiet von Erscheinungen untergeordnet sind. Nehmen wir an, daß die erste Gruppe und das erste Gebiet unvergleichlich ausgedehnter sind als die zweite Gruppe und das zweite Gebiet. Mit der ersten Gruppe macht uns von Kind auf die tägliche Erfahrung durch Vermittlung unserer Sinnesorgane vertraut. Diese Elemente haben sich in unserem Bewußtsein fest eingewurzelt und wir erkennen und verstehen nicht nur alles, was zu dieser Gruppe gehört, sondern auch das, was ihnen analog oder ähnlich ist.

Die alte Physik hatte es nur mit der ersten Gruppe der Elemente und dem ersten Gebiet der Erscheinungen zu tun. Daher war alles, was sie voraussetzte und produzierte, verständlich, ging nicht über den Rahmen unserer Erkenntnisfähigkeit hinaus. Bei der Entwicklung nicht nur in die Breite, sondern auch in die Tiefe ist nun die Wissenschaft dicht an die Grenze des zweiten Gebietes gelangt, hat das Studium solcher Erscheinungen in Angriff genommen, welche auch jener zweiten Gruppe der Elemente untergeordnet sind, die außerhalb unseres Erkenntnisvermögens liegen und keine Analogien mit dem besitzen, was durch unsere Sinnesorgane erkannt wird. Nehmen wir an, daß der elektromagnetische Raum und das Innere der Atome zum zweiten Gebiete gehören.

Wenn das alles sich wirklich so verhält, dann müssen wir in der Tat *lasciate ogni speranza* sagen und uns auf den Boden eines, wenn auch teilweisen, Agnostizismus stellen. Dann haben auch die Biologen das Recht, den Gedanken aufzuwerfen: Ist hier nicht etwas Ähnliches, was in den biologischen Wissenschaften sich offenbart, welche trotz aller ihrer glänzenden Erfolge nicht einen Schritt in ihrer Hauptaufgabe vorwärts gekommen sind, nämlich in dem Begreifen des Wesens des Lebens, welches vielleicht auch zum zweiten Gebiete gehört und den Elementen der zweiten Gruppe untergeordnet ist?

Wir wollen aber an der Überzeugung festhalten, daß es sich nicht so verhält, daß unsere Annahme der Wirklichkeit nicht entspricht. Wir hoffen, daß die unverständlichen Hypothesen mit der Zeit verständlich werden, daß es dem schöpferischen Genie des Menschen gelingen wird, alle Schwierigkeiten zu überwinden, und daß die Physik siegreich aus der Sackgasse hervorgehen wird, in welcher sie sich augenblicklich befindet; in dieser Hinsicht setzen wir große Hoffnungen auf die Relativitätstheorie. Dann wird die ganze neue Physik sich als eine großartige, herrliche Erweiterung der alten Physik erweisen.

Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig.

Laue, Prof. Dr. M., **Die Relativitätstheorie.**

1. Band: Das Relativitätsprinzip der Lorentztransformation. 4. vermehrte Auflage. Mit 25 Abbild. XIII, 302 S. 8°. 1921. (*Die Wissenschaft, Bd. 38.*) Geb. *ℳ* 12,—.
2. Band: Die allgemeine Relativitätstheorie und Einsteins Lehre von der Schwerkraft. 2. umgearbeitete Auflage. Mit 25 Abbild. XII, 290 S. 8°. 1923. (*Die Wissenschaft, Band 68.*) *ℳ* 9,—, geb. *ℳ* 10,75.

Meissner, Reg.-Rat Dr. W., **Entfernungs- und Höhenmessung in der Luftfahrt.** Mit 66 Abbild. 92 S. 8°. 1922. (*Sammlung Vieweg, Heft 61.*) *ℳ* 4,—.

Michel, Prof. Dr.-Ing. Eugen, **Hörsamkeit großer Räume.** Mit 84 Abbild. im Text und auf 16 Tafeln. IV, 58 S. 4°. 1921. Geb. *ℳ* 12,—.

Millikan, Prof. Rob. Andrews, **Das Elektron**, seine Isolierung und Messung, Bestimmung einiger seiner Eigenschaften. Übersetzt von Prof. Dr. Stöckl, Regensburg. Mit 82 Abbild. X, 263 S. 8°. 1922. (*Die Wissenschaft, Bd. 69.*) *ℳ* 8,25, geb. *ℳ* 10,—.

Mises, Prof. Dr. Richard v., und Prof. Dr. Philipp **Frank**, **Die Differential- und Integralgleichungen der Mechanik und Physik.** Als 7. Auflage von Riemann-Webers Partiiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik. Erster mathematischer Teil. Herausgegeben von Prof. Dr. Richard v. Mises. Mit 76 Abbildungen. XX, 687 S. gr. 8°. 1925. *ℳ* 40,—, geb. *ℳ* 44,—.

Möller, Dr. Hans Georg, **Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen.** 2. neu bearbeitete Auflage. (*Sammlung Vieweg, Heft 49.*) Mit 208 Textabbild. und einer Tafel. XV, 200 S. 8°. 1922. *ℳ* 7,50.

Möller, Prof. Dr.-Ing. E. h. Max, **Kraftarten und Bewegungsformen.** Die äußeren Bewegungen mit einführender Aufgaben-Sammlung. Mit 72 Abbild. VIII, 148 S. 8°. 1922. *ℳ* 5,—, geb. *ℳ* 6,—.

Müller, Dr. Aloys, **Die philosophischen Probleme der Einsteinschen Relativitätstheorie.** Vorlesung an der Universität Bonn. 2. umgearbeitete und erweiterte Auflage des Buches: Das Problem des absoluten Raumes. Mit 10 Abbild. VIII, 224 S. 8°. 1922. (*Die Wissenschaft, Bd. 39.*) *ℳ* 7,50, geb. *ℳ* 9,25.

Seeliger, Prof. R., **Aufgaben aus der theoretischen Physik.** Herausgegeben in Verbindung mit Prof. F. Henning und Prof. R. v. Mises. X, 154 S. 8°. 1921. *ℳ* 5,—, geb. *ℳ* 6,25.

Sommefeld, Prof. Dr. Arnold, **Atombau und Spektrallinien.** 4. umgearbeitete Auflage. Mit 156 Abbild. XII, 862 S. gr. 8°. 1924. *ℳ* 22,—, geb. *ℳ* 25,—.

Study, Prof. Dr. E., **Mathematik und Physik.** Eine erkenntnistheoretische Untersuchung. 31 S. 8°. 1923. (*Sammlung Vieweg, Heft 65.*) *ℳ* 1,50.

— **Die realistische Weltansicht und die Lehre vom Raume.** Geometrie, Anschauung und Erfahrung. 2. umgearbeitete Auflage. Erster Teil: Das Problem der Außenwelt. X, 85 S. 8°. 1923. (*Die Wissenschaft, Bd. 54.*) *ℳ* 3,50, geb. *ℳ* 5,—.

Valentiner, Prof. Dr. S., **Die Grundlagen der Quantentheorie** in elementarer Darstellung. 3. erweiterte Auflage. Mit 8 Abbild. VIII, 92 S. 8°. 1920. (*Sammlung Vieweg, Heft 15.*) *ℳ* 4,—.

— **Anwendungen der Quantenhypothese** in der kinetischen Theorie der festen Körper und der Gase. In elementarer Darstellung. 2. erweiterte Auflage. Mit 9 Abbild. im Text und auf 3 Tafeln. VI, 90 S. 8°. 1921. (*Sammlung Vieweg, Heft 16.*) *ℳ* 4,50.

Vidmar, Dr. Milan, **Theorie der Kreiselpumpe.** Mit 39 Abbild. VI, 126 S. 8°. 1922. (*Sammlung Vieweg, Heft 60.*) *ℳ* 4,75.

Wassmuth, Prof. Dr. A., **Grundlagen und Anwendungen der statistischen Mechanik.** 2. vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 4 Abbild. VI, 115 S. 8°. 1922. (*Sammlung Vieweg, Heft 25.*) *ℳ* 4,—.

Wiedemann-Eberts Physikalisches Praktikum. Neubearb. von Eilhard Wiedemann und Arthur Wehnelt. 6. Auflage. Mit 371 Abbild. XXVII, 545 S. gr. 8°. 1924. *ℳ* 18,—, geb. *ℳ* 21,—.

Witte, Dr. Hans, **Raum und Zeit im Lichte der neueren Physik.** Eine allgemein verständliche Entwicklung des raumzeitlichen Relativitätsgedankens bis zum Relativitätsprinzip der Trägheitssysteme. 3. Auflage. Mit 18 Abbild. IV, 88 S. 8°. 1920. (*Sammlung Vieweg, Heft 17.*) *ℳ* 3,—.