# WEGE ZUR PHYSIKALISCHEN ERKENNTNIS

# WEGE ZUR PHYSIKALISCHEN ERKENNTNIS

REDEN UND VORTRÄGE

VON

DR. MAX PLANCK




1 9 3 3

VERLAG VON S. HIRZEL IN LEIPZIG



COPYRIGHT BY S. HIRZEL AT LEIPZIG 1933
ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER
ÜBERSETZUNG IN FREMDE SPRACHEN,
VORBEHALTEN · PRINTED IN GERMANY




## Geleitwort.

Die vorliegende Sammlung von Reden und Vorträgen war ursprünglich gedacht als eine neue Auflage meiner in dem nämlichen Verlag erschienenen „Physikalischen Rundblicke", ergänzt durch Aufnahme einiger inzwischen erschienener Aufsätze allgemeineren Inhalts. Da indessen durch diese Vermehrung der Umfang des Buches allzu stark angewachsen wäre, so hielt ich es für zweckmäßig, von den früheren Schriften etwa die Hälfte wegzulassen und nur die nach meiner Meinung wesentlichsten, nämlich den programmatischen Leidener Vortrag über die Einheit des physikalischen Weltbildes, die beiden Berliner Rektoratsreden und den Stockholmer Nobel-Vortrag hier wieder mit aufzunehmen. Bei dieser beträchtlichen Änderung des Inhalts schien mir für das neue Buch auch die Wahl eines neuen Titels angezeigt.

Bedenkt man, daß seit der Ausarbeitung meines ersten in Leiden gehaltenen Vortrages volle 25 Jahre verflossen sind und daß währenddem die physikalische Wissenschaft Wandlungen erfahren hat von einem Ausmaß wie kaum je zuvor in einem gleichen Zeitraum, so wird man es selbstverständlich finden, daß in den Anschauungen eines Physikers, der alle diese Eindrücke miterlebt hat, sich gewisse Um- und Weiterbildungen vollzogen haben. Dennoch glaube ich mit gutem Gewissen behaupten zu können, daß die Auffassung, die ich bezüglich der großen allgemeinen Fragen der Physik und der physikalischen Erkenntnis bisher zu entwickeln und zu begründen suchte, sich bewährt hat und daß ich den in meinen früheren Schriften dargelegten grundsätzlichen Standpunkt auch heute noch zu vertreten allen Grund habe. Einige kleinere Streichungen oder Zusätze habe ich an einzelnen wenigen Textstellen zur Abrundung vorzunehmen für nütz-

lich gehalten. Die ursprüngliche Fassung ist ja jederzeit aus den Originalen zu ersehen.

So glaube ich, daß die einzelnen bei verschiedenen Gelegenheiten entstandenen Aufsätze sich nach ihrem Inhalt zu einem einheitlichen Ganzen zusammenschließen. Der Grundgedanke und Ausgangspunkt aller Darlegungen ist außerordentlich einfach, er faßt die Aufgabe der Physik als die Erforschung der realen Außenwelt. Das Anfechtbare dieser Formulierung liegt darin, daß die reale Außenwelt etwas ist, was auf keinerlei Weise direkt aufgezeigt werden kann — ein Umstand, der von jeher grundsätzliche Bedenken erregt hat und der auch gegenwärtig eine Reihe namhafter Physiker und Philosophen zu der Schlußfolgerung veranlaßt, daß es gar keinen Sinn habe, von einer realen Außenwelt im Gegensatz zu der uns unmittelbar gegebenen Sinnenwelt zu reden. Ich halte diese Auffassung, so einleuchtend sie auf den ersten Blick scheint, und so unanfechtbar sie vom rein logischen Standpunkt aus ist, dennoch für kurzsichtig und unfruchtbar. Denn die Forschung verfährt nun einmal gerade auf neu zu erschließenden Gebieten niemals so, daß die zu behandelnden Fragen zunächst genau definiert und dann erst in Angriff genommen werden. Im Gegenteil: ein jeder, der einmal an einem wirklich neuen Problem der Wissenschaft gearbeitet hat, weiß aus eigener Erfahrung, daß es in der Regel nicht minder schwierig ist, ein Problem zu formulieren, als es zu lösen, ja, daß die genaue endgültige Formulierung oft erst zugleich mit der Lösung gefunden wird. So verhält es sich auch mit der realen Außenwelt. Sie steht im Grunde nicht am Anfang, sondern am Ziel der physikalischen Forschung, und zwar an einem Ziel, das niemals vollkommen erreicht werden wird, das aber doch fortwährend im Auge behalten werden muß, wenn man vorwärts kommen will. Hier zeigt sich wieder, daß die Physik, wie überhaupt jede Wissenschaft, einen gewissen irrationalen Kern enthält, den man nicht wegdefinieren kann, ohne der Forschung ihre eigentliche Triebkraft zu rauben, der aber auch andrerseits niemals restlos aufgeklärt werden wird.

Der innere Grund für diese Irrationalität liegt, wie die Entwicklung der neueren Physik immer deutlicher zu zeigen beginnt, in dem Umstand, daß der forschende Mensch selber ein Stück Natur ist, und daß er daher niemals diejenige Distanz von der Natur zu gewinnen vermag, die notwendig wäre, um zu einer vollkommen objektiven Naturbetrachtung zu gelangen. Mit dieser unabänderlichen Tatsache müssen wir uns wohl oder übel abfinden und können im besten Falle Befriedigung nur suchen in dem Bewußtsein, welches dem achtzigjährigen Goethe das schönste Glück des denkenden Menschen bedeutete, dem Bewußtsein, das Erforschliche erforscht zu haben und das Unerforschliche ruhig zu verehren.

Berlin-Grunewald, 1. Februar 1933.

Der Verfasser.

# Inhalt.


Die Einheit des physikalischen Weltbildes . . . . . 1
Neue Bahnen der physikalischen Erkenntnis . . . . . 33
Dynamische und statistische Gesetzmäßigkeit . . . . . 49
Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie 68
Kausalgesetz und Willensfreiheit . . . . . 87
Vom Relativen zum Absoluten . . . . . 128
Physikalische Gesetzlichkeit . . . . . 147
Das Weltbild der neuen Physik . . . . . 178
Positivismus und reale Außenwelt . . . . . 208
Die Kausalität in der Natur . . . . . 233
Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen . . . . . 260

# Die Einheit des physikalischen Weltbildes.

(Vortrag, gehalten am 9. Dezember 1908 in der naturwissenschaftlichen Fakultät des Studentenkorps an der Universität Leiden.)

Meine sehr geehrten Herren! Als mir die freundliche Einladung übermittelt wurde, hier vor Ihnen über ein Thema meiner Wissenschaft zu sprechen, war mein erster Gedanke der, wie sorgfältig doch die Physik gerade in Holland gepflegt wird, welch glänzende, weltbekannte Namen Ihnen hier tagtäglich voranleuchten, und wie wenig an eigentlich Neuem Ihnen daher ein Vortrag über theoretische Physik, und nun vollends hier in Leiden, zu bieten vermöchte. Wenn ich nun dennoch den Versuch machen will, Ihre Aufmerksamkeit eine Zeitlang in Anspruch zu nehmen, so kann ich den Mut dazu lediglich aus der Überlegung schöpfen, daß unsere Wissenschaft, die Physik, ihrem Ziele ja nicht auf geradem Wege, sondern nur auf vielfach verschlungenen Pfaden stetig sich anzunähern vermag, und daß deshalb auch in ihr der Individualität der Forschung ein breiter Spielraum gelassen ist. So arbeitet der eine an dieser, der andere an jener Stelle, der eine mit dieser, der andere mit jener Methode, und das physikalische Weltbild, um das wir uns alle bemühen, malt sich zur Zeit in jedem wohl etwas verschieden. Daher hoffe ich immerhin auf Interesse bei Ihnen rechnen zu dürfen, wenn ich hier im folgenden versuche, Ihnen die Hauptzüge des physikalischen Weltbildes zu entwerfen, wie es sich aus den mir zur Verfügung stehenden Erfahrungen und Anschauungen heraus gestaltet hat und in Zukunft vermutlich gestalten wird.

## I.

Von jeher, solange es eine Naturbetrachtung gibt, hat ihr als letztes, höchstes Ziel die Zusammenfassung der bunten Mannigfaltigkeit der physikalischen Erscheinungen in ein ein-

heitliches System, womöglich in eine einzige Formel, vorgeschwebt, und von jeher haben sich bei der Lösung dieser Aufgabe zwei Methoden gegenübergestanden, oft miteinander ringend, noch öfter sich gegenseitig korrigierend und befruchtend, letzteres am reichsten, wenn sie sich in dem nämlichen Forschergeist zu gemeinsamer Arbeit verbanden. Die eine Methode ist die jugendlichere, sie faßt, einzelne Erfahrungen schnell verallgemeinernd, mit kühnem Griffe nach dem Ganzen und stellt in das Zentrum des Bildes von vornherein einen einzigen Begriff oder Satz, in den sie nun mit mehr oder weniger Erfolg die ganze Natur samt allen ihren Äußerungen zu bannen unternimmt. So machte Thales von Milet das „Wasser", Wilhelm Ostwald die „Energie", Heinrich Hertz das „Prinzip der geradesten Bahn" zum Haupt- und Zentralpunkt seines physikalischen Weltbildes, in welchem alle physikalischen Vorgänge ihren Zusammenhang und ihre Erklärung finden.

Die andere Methode ist bedächtiger, bescheidener und zuverlässiger, aber an Stoßkraft der ersten lange nicht gewachsen und daher auch sehr viel später zu Ehren gekommen: sie verzichtet vorläufig auf endgültige Resultate und malt zunächst nur diejenigen Einzelzüge in das Bild, welche durch direkte Erfahrungen vollständig sichergestellt erscheinen, ihre weitere Verarbeitung späterer Forschung überlassend. Ihren prägnantesten Ausdruck hat sie wohl gefunden in Gustav Kirchhoffs bekannter Definition der Aufgabe der Mechanik als einer „Beschreibung" der in der Natur vor sich gehenden Bewegungen. Beide Methoden ergänzen sich gegenseitig, und auf keinen Fall kann die physikalische Forschung auf eine derselben verzichten.

Aber nicht von dieser doppelten Methodik unserer Wissenschaft möchte ich jetzt zu Ihnen reden, sondern ich möchte vielmehr Ihre Aufmerksamkeit richten auf die prinzipiellere Frage, wohin denn diese eigenartige Methodik geführt hat und wohin sie vermutlich noch führen wird. Daß die Physik in ihrer Entwicklung wirklich Fortschritte gemacht hat, daß wir die Natur mit jedem Jahrzehnt erheblich besser kennenlernen, das kann ernstlich gewiß von niemandem geleugnet werden, das beweist ein einziger Blick auf die an Zahl wie



an Bedeutung stetig wachsenden Hilfsmittel, mit welchen die Menschheit die Natur ihren Zwecken dienstbar zu machen versteht. Aber in welcher Richtung bewegt sich im ganzen dieser Fortschritt? Inwieweit kann man sagen, daß wir uns dem angestrebten Ziele, dem Einheitssystem, wirklich annähern? Dies zu untersuchen muß jedem Physiker, der sich ein offenes Auge für die Fortschritte seiner Wissenschaft bewahren will, von größter Wichtigkeit erscheinen. Und wenn wir imstande sind, über diese Fragen Auskunft zu erlangen, werden wir auch in die Lage kommen, uns Rechenschaft zu geben über die weitere, heutzutage wieder heiß umstrittene Frage: Was bedeutet uns im Grunde das, was wir das physikalische Weltbild nennen? Ist dasselbe lediglich eine zweckmäßige, aber im Grunde willkürliche Schöpfung unseres Geistes, oder finden wir uns zu der gegenteiligen Auffassung getrieben, daß es reale, von uns ganz unabhängige Naturvorgänge widerspiegelt?

Um zu erfahren, in welcher Richtung sich die Entwicklung der physikalischen Wissenschaft bewegt, gibt es nur ein Verfahren: man vergleicht den Zustand, in dem sie sich gegenwärtig befindet, mit demjenigen in einer früheren Zeit. Frägt man aber weiter, welches äußere Kennzeichen denn das beste Charakteristikum für den Entwicklungszustand einer Wissenschaft zu gewähren vermag, so wüßte ich kein allgemeineres zu nennen als die Art und Weise, wie die Wissenschaft ihre Grundbegriffe definiert und wie sie ihre verschiedenen Gebiete einteilt. Denn in der Schärfe und Zweckmäßigkeit der Definitionen und in der Art der Einteilung des Stoffs liegen, wie allen etwas tiefer Nachdenkenden bekannt ist, sogar die letzten, reifsten Resultate der Forschung häufig schon implizite mit enthalten.

Sehen wir nun zu, wie es in dieser Beziehung mit der Physik gegangen ist. Da gewahren wir zunächst, daß die wissenschaftliche physikalische Forschung in allen ihren Gebieten entweder an unmittelbar praktische Bedürfnisse oder an besonders auffällige Naturerscheinungen anknüpft. Und nach diesen Gesichtspunkten richtet sich naturgemäß die anfängliche Einteilung der Physik und die Benennung ihrer einzelnen Zweige. So entsteht die Geometrie aus der

Erd- oder Feldmeßkunst, die Mechanik aus der Maschinenlehre, die Akustik, die Optik, die Wärmelehre aus den entsprechenden spezifischen Sinneswahrnehmungen, die Elektrizitätslehre aus den merkwürdigen Beobachtungen am geriebenen Bernstein, die Theorie des Magnetismus aus den auffallenden Eigenschaften der bei der Stadt Magnesia gefundenen Eisenerze. Entsprechend dem Satze, daß alle unsere Erfahrungen an Empfindungen unserer Sinne anknüpfen, ist in allen physikalischen Definitionen das physiologische Element maßgebend, kurz gesagt: die ganze Physik, sowohl ihre Definitionen als auch ihre ganze Struktur, trägt ursprünglich in gewissem Sinn einen anthropomorphen Charakter.

Wie verschieden hiervon ist das Bild, welches uns das Lehrgebäude der modernen theoretischen Physik darbietet! Zunächst zeigt das Ganze ein viel einheitlicheres Gepräge: die Anzahl der Einzelgebiete der Physik ist erheblich verringert, dadurch, daß verwandte Gebiete miteinander verschmolzen sind: so ist die Akustik ganz in die Mechanik aufgegangen, der Magnetismus und die Optik ganz in die Elektrodynamik; und diese Vereinfachung zeigt sich begleitet von einem auffallenden Zurücktreten des menschlich-historischen Elements in allen physikalischen Definitionen. Welcher Physiker denkt heutzutage bei der Elektrizität noch an geriebenen Bernstein, oder beim Magnetismus an den kleinasiatischen Fundort der ersten natürlichen Magnete? Und in der physikalischen Akustik, Optik und Wärmelehre sind die spezifischen Sinnesempfindungen geradezu ausgeschaltet. Die physikalischen Definitionen des Tons, der Farbe, der Temperatur werden heute keineswegs mehr der unmittelbaren Wahrnehmung durch die entsprechenden Sinne entnommen, sondern Ton und Farbe werden durch die Schwingungszahl bzw. Wellenlänge definiert, die Temperatur theoretisch durch die dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie entnommene absolute Temperaturskala, in der kinetischen Gastheorie durch die lebendige Kraft der Molekularbewegung, praktisch durch die Volumenänderung einer thermometrischen Substanz bzw. durch den Skalenausschlag eines Bolometers oder Thermoelements; von der Wärmeempfindung ist aber bei der Temperatur in keinem Fall mehr die Rede.



Genau ebenso ist es mit dem Begriff der Kraft gegangen. Das Wort „Kraft“ bedeutet ursprünglich ohne Zweifel menschliche Kraft, entsprechend dem Umstand, daß die ersten und ältesten Maschinen: der Hebel, die Rolle, die Schraube, durch Menschen oder Tiere angetrieben wurden, und dies beweist, daß der Begriff der Kraft ursprünglich dem Kraftsinn oder Muskelsinn, also einer spezifischen Sinnesempfindung, entnommen wurde. Aber in der modernen Definition der Kraft erscheint die spezifische Sinnesempfindung ebenso eliminiert, wie in derjenigen der Farbe der Farbensinn.

Ja, dieses Zurückdrängen des spezifisch sinnlichen Elements aus den Definitionen der physikalischen Begriffe geht so weit, daß sogar Gebiete der Physik, welche ursprünglich durch die Zuordnung zu einer bestimmten Sinnesempfindung als durchaus einheitlich charakterisiert wurden, infolge der Lockerung des zusammenhaltenden Bandes in verschiedene ganz getrennte Stücke auseinanderfallen, also gerade entgegen dem allgemeinen Zuge zur Vereinheitlichung und Verschmelzung. Das beste Beispiel hierfür zeigt die Lehre von der Wärme. Früher bildete die Wärme einen bestimmten, durch die Empfindungen des Wärmesinns charakterisierten, wohl abgegrenzten einheitlichen Bezirk der Physik. Heute findet man wohl in allen Lehrbüchern der Physik von der Wärme ein ganzes Gebiet, die Wärmestrahlung, abgespalten und bei der Optik behandelt. Die Bedeutung des Wärmesinns reicht eben nicht mehr hin, um die heterogenen Stücke zusammenzuhalten; vielmehr wird jetzt das eine Stück der Optik bzw. Elektrodynamik, das andere der Mechanik, speziell der kinetischen Theorie der Materie, angegliedert.

Schauen wir auf das bisherige zurück, so können wir kurz zusammenfassend sagen: die Signatur der ganzen bisherigen Entwicklung der theoretischen Physik ist eine Vereinheitlichung ihres Systems, welche erzielt ist durch eine gewisse Emanzipierung von den anthropomorphen Elementen, speziell den spezifischen Sinnesempfindungen. Bedenkt man nun andererseits, daß doch die Empfindungen anerkanntermaßen den Ausgangspunkt aller physikalischen Forschung bilden, so muß diese bewußte Abkehr von den Grundvoraussetzungen

immerhin erstaunlich, ja paradox erscheinen. Und dennoch liegt kaum eine Tatsache in der Geschichte der Physik so klar zutage wie diese. Fürwahr, es müssen unschätzbare Vorteile sein, welche einer solchen prinzipiellen Selbstentäußerung wert sind!

Bevor wir auf diesen wichtigen Punkt näher eingehen, wollen wir nun noch unseren Blick aus der Vergangenheit und der Gegenwart in die Zukunft richten. Wie wird man in künftigen Jahrhunderten das System der Physik einteilen? Gegenwärtig stehen sich darin noch zwei große Gebiete gegenüber: die Mechanik und die Elektrodynamik, oder wie man auch sagt: die Physik der Materie und die Physik des Äthers. Erstere umfaßt zugleich mit die Akustik, die Körperwärme, die chemischen Erscheinungen, letztere den Magnetismus, die Optik und die strahlende Wärme. Wird diese Einteilung die endgültige sein? Ich glaube es nicht, und zwar deshalb nicht, weil diese beiden Gebiete sich gar nicht scharf voneinander abgrenzen lassen. Gehören zum Beispiel die Vorgänge der Lichtemission zur Mechanik oder zur Elektrodynamik? Oder: In welches Gebiet soll man die Bewegungsgesetze der Elektronen rechnen? Vielleicht möchte man auf den ersten Blick sagen: zur Elektrodynamik, da bei den Elektronen doch die ponderable Materie gar keine Rolle spielt. Aber man richte sein Augenmerk nur etwa auf die Bewegungen der freien Elektronen in Metallen. Da wird man zum Beispiel beim Studium der Untersuchungen von H. A. Lorentz finden, daß die Gesetze derselben weit besser in die kinetische Gastheorie als in die Elektrodynamik hineinpassen. Überhaupt scheint mir der ursprüngliche Gegensatz zwischen Äther und Materie etwas im Schwinden begriffen zu sein. Elektrodynamik und Mechanik stehen sich gar nicht so ausschließend gegenüber, wie das in weiteren Kreisen gewöhnlich angenommen wird, wo sogar schon von einem Kampf zwischen der mechanischen und der elektrodynamischen Weltanschauung gesprochen wird. Die Mechanik bedarf zu ihrer Begründung prinzipiell nur der Begriffe des Raums, der Zeit und dessen, was sich bewegt, mag man es nun als Substanz oder als Zustand bezeichnen. Die nämlichen Begriffe kann aber auch die Elektrodynamik nicht entbehren. Eine passend verallgemeinerte Auffassung der Mechanik könnte daher sehr wohl auch die Elektrodynamik mit umschließen, und in der Tat sprechen mancherlei Anzeichen dafür, daß diese beiden schon jetzt teilweise ineinander übergreifenden Gebiete sich schließlich zu einem einzigen, zur allgemeinen Dynamik, vereinigen werden.



Wenn also der Gegensatz zwischen Äther und Materie einmal überbrückt ist, welcher Gesichtspunkt wird dann in endgültiger Weise der Einteilung des Systems der Physik zugrunde gelegt werden? Nach dem, was wir oben gesehen haben, ist diese Frage zugleich charakteristisch für die ganze Art der Weiterentwicklung unserer Wissenschaft; doch ist es zu ihrer näheren Untersuchung notwendig, daß wir etwas tiefer als bisher in die Eigenart der physikalischen Prinzipien eindringen.

## II.

Ich bitte Sie zu diesem Zwecke zunächst mich zu begleiten an denjenigen Punkt, von welchem aus der erste Schritt zur tatsächlichen Verwirklichung des bis dahin nur von den Philosophen postulierten Einheitssystems der Physik gemacht wurde: zum Prinzip der Erhaltung der Energie. Denn der Begriff der Energie ist neben den Begriffen von Raum und Zeit der einzige allen verschiedenen physikalischen Gebieten gemeinsame. Nach allem, was ich oben ausführte, wird es Ihnen erklärlich und fast selbstverständlich erscheinen, daß auch das Energieprinzip ursprünglich, noch vor seiner allgemeinen Formulierung durch Mayer, Joule und Helmholtz, einen anthropomorphen Charakter trug. Seine ersten Wurzeln liegen nämlich schon in der Erkenntnis, daß es keinem Menschen gelingen kann, nutzbare Arbeit aus Nichts zu gewinnen; und diese Erkenntnis ihrerseits entstammt im wesentlichen den Erfahrungen, die gesammelt wurden bei den Versuchen zur Lösung eines technischen Problems: der Erfindung des Perpetuum mobile. Insofern ist das Perpetuum mobile für die Physik von ähnlicher weittragender Bedeutung geworden, wie die Goldmacherkunst für die Chemie, obwohl es nicht die positiven, sondern umgekehrt die negativen Resultate dieser Experimente waren, aus denen die Wissenschaft

Vorteil zog. Heute sprechen wir das Energieprinzip ganz ohne Bezugnahme auf menschliche oder technische Gesichtspunkte aus. Wir sagen, daß die Gesamtenergie eines nach außen abgeschlossenen Systems von Körpern eine Größe ist, deren Betrag durch keinerlei innerhalb des Systems sich abspielende Vorgänge vermehrt oder vermindert werden kann, und wir denken gar nicht mehr daran, die Genauigkeit, mit der dieser Satz gilt, abhängig zu machen von der Feinheit der Methoden, welche wir gegenwärtig besitzen, um die Frage der Realisierung eines Perpetuum mobile experimentell zu prüfen. In dieser strenggenommen unbeweisbaren, aber mit elementarer Gewalt sich aufdrängenden Verallgemeinerung liegt die oben besprochene Emanzipation von den anthropomorphen Elementen.

Während so das Energieprinzip als ein fertiges selbständiges Gebilde, losgelöst und unabhängig von den Zufälligkeiten seiner Entwicklungsgeschichte, vor uns steht, ist das nämliche noch keineswegs in gleichem Maße der Fall bei demjenigen Prinzip, welches R. Clausius unter dem Namen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie in die Physik eingeführt hat; und gerade der Umstand, daß dieser Satz die Eierschalen seiner Entwicklung auch heute noch nicht vollständig abgestreift hat, verleiht ihm in unserer heutigen Besprechung besonderes Interesse. In der Tat trägt der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie, wenigstens in seiner landläufigen Beurteilung, noch entschieden anthropomorphen Charakter. Gibt es doch zahlreiche hervorragende Physiker, welche seine Gültigkeit in Verbindung bringen mit der Unfähigkeit des Menschen, in die Einzelheiten der Molekularwelt einzudringen und es den Maxwellschen Dämonen gleichzutun, welche ohne jeglichen Arbeitsaufwand, lediglich durch rechtzeitiges Vor- und Zurückschieben eines kleinen Riegels, die schnelleren Moleküle eines Gases von den langsameren zu trennen vermögen. Man braucht aber kein Prophet zu sein, um mit Sicherheit vorauszusagen, daß der Kern des zweiten Hauptsatzes mit menschlichen Fähigkeiten nichts zu tun hat und daß daher auch seine endgültige Formulierung in einer Weise erfolgen muß und erfolgen wird, welche keinerlei Bezugnahme auf die Ausführbarkeit irgendwelcher Naturprozesse durch



Menschenkunst enthält. Zu dieser Emanzipation des zweiten Hauptsatzes werden, wie ich hoffe, auch die folgenden Ausführungen etwas beitragen können.

Gehen wir zunächst etwas näher auf den Inhalt des zweiten Hauptsatzes und seine Beziehung zum Energieprinzip ein. Während das Energieprinzip den Ablauf der natürlichen Vorgänge dadurch beschränkt, daß es niemals Schöpfung oder Vernichtung von Energie, sondern nur Umwandlungen von Energie zuläßt, geht der zweite Hauptsatz in der Beschränkung noch weiter, indem er nicht alle Arten von Umwandlungen, sondern gewisse nur unter gewissen Bedingungen gestattet. So läßt sich mechanische Arbeit ohne weiteres in Wärme verwandeln, zum Beispiel durch Reibung, aber nicht umgekehrt Wärme ohne weiteres in Arbeit. Wäre das nämlich möglich, so könnte man etwa die Wärme des Erdbodens, die uns ja unbeschränkt zur Verfügung steht, zum Antrieb eines Motors verwenden und hätte dabei den doppelten Vorteil, diesen Motor, da er den Erdboden abkühlt, zugleich als Kältemaschine benutzen zu können.

Aus der erfahrungsgemäßen Unmöglichkeit eines derartigen Motors, der auch als ein Perpetuum mobile zweiter Art bezeichnet wird, geht nun mit Notwendigkeit hervor, daß es Vorgänge in der Natur gibt, die auf keinerlei Weise vollständig rückgängig gemacht werden können. Denn ließe sich zum Beispiel ein Reibungsvorgang, durch welchen mechanische Arbeit in Wärme verwandelt worden ist, mit Hilfe irgendeines, wenn auch noch so komplizierten Apparats auf irgendeine Weise wirklich vollständig rückgängig machen, so wäre eben der betreffende Apparat nichts anderes als der vorhin geschilderte Motor: ein Perpetuum mobile zweiter Art. Dies erhellt unmittelbar, wenn man sich deutlich vorstellt, was der Apparat leisten würde: Verwandlung von Wärme in Arbeit ohne jegliche anderweitig zurückbleibende Veränderung.

Nennen wir einen solchen Vorgang, der sich auf keinerlei Weise vollständig rückgängig machen läßt, einen irreversibeln Prozeß, alle übrigen Vorgänge reversible Prozesse, so treffen wir gerade den Kernpunkt des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie, wenn wir sagen, daß es in der Natur irreversible Prozesse gibt. Demnach haben die Veränderungen in

der Natur eine einseitige Richtung: mit jedem einzelnen irreversibeln Prozeß macht die Welt einen Schritt vorwärts, dessen Spuren unter keinen Umständen vollständig zu verwischen sind. Beispiele irreversibler Prozesse sind außer der Reibung die Wärmeleitung, die Diffusion, die Elektrizitätsleitung, die Emission von Licht- und Wärmestrahlung, der Atomzerfall radioaktiver Substanzen u. a. Beispiele reversibler Prozesse sind dagegen die Planetenbewegung, der freie Fall im luftleeren Raum, die ungedämpfte Pendelbewegung, die Fortpflanzung von Licht- und Schallwellen ohne Absorption und Beugung, die ungedämpften elektrischen Schwingungen u. a. Denn alle diese Vorgänge sind entweder schon an sich periodisch, oder sie lassen sich doch durch geeignete Vorrichtungen vollständig rückgängig machen, so daß keinerlei Veränderung in der Natur zurückbleibt, zum Beispiel der freie Fall eines Körpers dadurch, daß man die erlangte Geschwindigkeit benutzt, um ihn wieder auf die ursprüngliche Höhe zu heben, eine Licht- oder Schallwelle dadurch, daß man sie in geeigneter Weise an vollkommenen Spiegeln reflektieren läßt.

Welches sind nun die allgemeinen Eigenschaften und Kennzeichen der irreversibeln Prozesse? und welches ist das allgemeine quantitative Maß der Irreversibilität? Diese Frage ist in der verschiedensten Weise geprüft und beantwortet worden, und gerade das Studium ihrer Geschichte bietet einen besonders charakteristischen Einblick in den typischen Entwicklungsgang einer allgemeinen physikalischen Theorie. Ebenso wie man ursprünglich durch das technische Problem des Perpetuum mobile auf die Spur des Energieprinzips gekommen war, so leitete auch wieder ein technisches Problem: das der Dampfmaschine, zur Unterscheidung zwischen irreversibeln und reversibeln Prozessen hin. Schon Sadi Carnot erkannte, obwohl er eine unzutreffende Vorstellung von der Natur der Wärme benutzte, daß die irreversibeln Prozesse unökonomischer sind als die reversibeln, oder daß bei einem irreversibeln Prozeß eine gewisse Gelegenheit, mechanische Arbeit aus Wärme zu gewinnen, ungenützt gelassen wird. Was lag nun näher als der Gedanke, für das Maß der Irreversibilität eines Prozesses ganz allgemein das Quantum der-



jenigen mechanischen Arbeit festzusetzen, welche durch ihn definitiv verloren geht? Für reversible Prozesse wäre dann natürlich die definitiv verlorene Arbeit gleich Null zu setzen. Diese Auffassung hat sich in der Tat für gewisse spezielle Fälle, zum Beispiel für isotherme Prozesse, als nützlich erwiesen, sie ist daher bis zum heutigen Tag in gewissem Ansehen geblieben; für den allgemeinen Fall jedoch hat sie sich als unbrauchbar und sogar irreführend gezeigt. Dies hat darin seinen Grund, daß die Frage nach der bei einem bestimmten irreversibeln Prozeß verlorenen Arbeit gar nicht in bestimmter Weise zu beantworten ist, solange nicht näher angegeben wird, aus welcher Energiequelle denn die betreffende Arbeit hätte gewonnen werden sollen.

Ein Beispiel wird dies klarmachen. Die Wärmeleitung ist ein irreversibler Prozeß, oder, wie Clausius es ausdrückt: Wärme kann nicht ohne Kompensation aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen. Welches ist nun die Arbeit, welche definitiv verlorengeht, wenn die (kleine) Wärmemenge $Q$ durch direkte Leitung aus einem wärmeren Körper von der Temperatur $T_1$ in einen kälteren Körper von der Temperatur $T_2$ übergeht? Um diese Frage zu beantworten, benutzen wir den genannten Wärmeübergang zur Ausführung eines reversibeln Carnotschen Kreisprozesses zwischen den beiden Körpern als Wärmereservoiren. Dabei wird bekanntlich eine gewisse Arbeit gewonnen, und diese Arbeit ist es gerade, welche wir suchen; denn sie geht eben bei der direkten Überführung der Wärme durch Leitung verloren. Aber diese Arbeitsgröße hat gar keinen bestimmten Wert, ehe wir nicht wissen, woher die Arbeit stammen soll, ob zum Beispiel aus dem wärmeren Körper oder aus dem kälteren Körper oder ob irgend anders woher. Man bedenke nämlich, daß die von dem wärmeren Körper abgegebene Wärme bei dem reversibeln Kreisprozeß ja gar nicht gleich ist der von dem kälteren Körper aufgenommenen Wärme, weil doch ein gewisser Betrag Wärme in Arbeit verwandelt wird, und man kann mit genau demselben Rechte die gegebene, beim direkten Leitungsprozeß übergeführte Wärmemenge $Q$ mit der beim Kreisprozeß vom wärmeren Körper abgegebenen oder mit der vom kälteren Körper aufgenommenen Wärme

identifizieren. Je nachdem man das erste oder das zweite tut, erhält man für die Größe der beim Leitungsprozeß verlorenen Arbeit:

$$Q \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1} \text{ oder } Q \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_2}.$$

Diese Unbestimmtheit hat Clausius auch wohl erkannt und hat daher den einfachen Carnotschen Kreisprozeß entsprechend verallgemeinert durch die Annahme eines dritten Wärmereservoirs, dessen Temperatur nun ganz unbestimmt ist und dementsprechend auch eine unbestimmte Arbeit ergibt[1]).

Wir sehen also, daß der eingeschlagene Weg, die Irreversibilität eines Prozesses mathematisch zu fassen, im allgemeinen nicht zum Ziele führt, und wir sehen zugleich auch den eigentlichen Grund, warum dies nicht gelingen konnte. Die Fragestellung ist zu anthropomorph gefärbt, sie ist zu sehr auf die Bedürfnisse des Menschen zugeschnitten, dem es in erster Linie auf die Gewinnung nutzbarer Arbeit ankommt. Wenn man von der Natur eine bestimmte Antwort haben will, muß man von einem allgemeineren, weniger wirtschaftlich interessierten Standpunkt aus an sie herantreten. Das wollen wir jetzt zu tun versuchen.

Betrachten wir irgendeinen in der Natur vor sich gehenden Prozeß. Derselbe führt für alle daran beteiligten Körper aus einem bestimmten Anfangszustand, den ich den Zustand $A$ nennen will, in einen bestimmten Endzustand $B$ über. Der Prozeß ist entweder reversibel oder irreversibel, ein drittes ist nicht möglich. Ob er aber reversibel oder irreversibel ist, hängt einzig und allein von der Beschaffenheit der beiden Zustände $A$ und $B$ ab, nicht von der Art, wie der Prozeß im übrigen verlaufen ist; denn es kommt dabei nur auf die Beantwortung der Frage an, ob, wenn der Zustand $B$ einmal erreicht ist, die vollständige Rückkehr nach $A$ auf irgendwelche Weise erzielt werden kann oder nicht. Ist nun die vollständige Rückkehr von $B$ nach $A$ nicht möglich, also der Prozeß irreversibel, so ist offenbar der Zustand $B$ in der

[1]) R. Clausius, Die mechanische Wärmetheorie, 2. Aufl., I. Bd., S. 96, 1876.



Natur durch eine gewisse Eigenschaft vor dem Zustand $A$ ausgezeichnet; ich habe mir einmal vor Jahren erlaubt, das so auszudrücken, daß die Natur zum Zustand $B$ eine größere „Vorliebe" besitzt als zum Zustand $A$. Nach dieser Ausdrucksweise sind solche Prozesse in der Natur durchaus unmöglich, für deren Endzustand die Natur eine kleinere Vorliebe besitzen würde wie für den Anfangszustand. Einen Grenzfall bilden die reversibeln Prozesse; bei ihnen besitzt die Natur die gleiche Vorliebe für den Anfangs- wie für den Endzustand, und der Übergang kann zwischen ihnen beliebig nach beiden Richtungen erfolgen.

Nun handelt es sich darum, eine physikalische Größe zu suchen, deren Betrag als ein allgemeines Maß der Vorliebe der Natur für einen Zustand dienen kann. Es muß dies eine Größe sein, welche durch den Zustand des betrachteten Systems unmittelbar bestimmt ist, ohne daß man irgend etwas über die Vorgeschichte des Systems zu wissen braucht, ebenso wie das bei der Energie, beim Volumen und bei anderen Eigenschaften des Systems zutrifft. Diese Größe würde die Eigentümlichkeit besitzen, bei allen irreversibeln Prozessen zu wachsen, bei allen reversibeln Prozessen dagegen ungeändert zu bleiben, und der Betrag ihrer Änderung bei einem Prozesse würde ein allgemeines Maß liefern für die Irreversibilität des Prozesses.

R. Clausius hat nun diese Größe wirklich aufgefunden und hat sie die „Entropie" genannt. Jedes Körpersystem besitzt in jedem Zustand eine bestimmte Entropie, und diese Entropie bezeichnet die Vorliebe der Natur für den betreffenden Zustand, sie kann bei allen Prozessen, welche innerhalb des Systems vor sich gehen, stets nur wachsen, niemals abnehmen. Will man einen Prozeß betrachten, bei dem auch Einwirkungen von außen auf das System stattfinden, so muß man diejenigen Körper, von denen die Wirkungen ausgehen, als mit zum System gehörig betrachten; dann gilt der Satz wieder in der obigen Form. Dabei ist die Entropie eines Körpersystems einfach gleich der Summe der Entropien der einzelnen Körper, und die Entropie eines einzelnen Körpers wird nach Clausius gefunden mit Hilfe eines gewissen reversibeln Kreisprozesses. Zuleitung von Wärme vergrößert

die Entropie eines Körpers, und zwar um den Betrag des Quotienten der zugeführten Wärmemenge durch die Temperatur des Körpers; einfache Kompression dagegen ändert die Entropie nicht.

Um auf das oben besprochene Beispiel der von einem wärmeren Körper mit der Temperatur $T_1$ einem kälteren Körper mit der Temperatur $T_2$ direkt zugeleiteten Wärme $Q$ zurückzukommen, so vermindert sich bei diesem Prozeß nach dem eben Gesagten die Entropie des wärmeren Körpers, die des kälteren dagegen wächst, und die Summe beider Änderungen, also die Änderung der Gesamtentropie beider Körper, ist:

$$-\frac{Q}{T_1}+\frac{Q}{T_2}>0\,.$$

Diese positive Größe gibt also frei von aller Willkür das Maß für die Irreversibilität des Wärmeleitungsprozesses. Derartige Beispiele lassen sich natürlich in unzähliger Menge anführen. Jeder chemische Prozeß liefert einen Beitrag dazu.

So ist der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie samt allen seinen Folgerungen zum Prinzip der Vermehrung der Entropie geworden, und es wird Ihnen nun wohl verständlich erscheinen, weshalb ich, anknüpfend an die oben aufgeworfene Frage, meine Meinung dahin ausspreche, daß in der theoretischen Physik der Zukunft die erste, wichtigste Einteilung aller physikalischen Prozesse die in reversible und in irreversible Prozesse sein wird.

In der Tat zeigen alle reversibeln Prozesse, sei es, daß sie in der Materie oder im Äther oder in beiden verlaufen, untereinander eine viel größere Ähnlichkeit als mit irgendeinem irreversibeln Prozeß. Das ergibt sich schon aus der formellen Betrachtung der Differentialgleichungen, welche sie beherrschen. In den Differentialgleichungen der reversibeln Prozesse tritt das Zeitdifferential immer nur in einer geraden Potenz auf, entsprechend dem Umstand, daß das Vorzeichen der Zeit auch umgekehrt werden kann. Das gilt in gleicher Weise für Pendelschwingungen, elektrische Schwingungen, akustische und optische Wellen, wie für Bewegungen von Massenpunkten oder von Elektronen, wenn nur jede Art von Dämpfung ausgeschlossen ist. Hierher gehören aber auch



die in der Thermodynamik betrachteten unendlich langsam verlaufenden Prozesse, die aus lauter Gleichgewichtszuständen bestehen, in denen die Zeit überhaupt keine Rolle spielt oder, wie man auch sagen kann, in der nullten Potenz vorkommt, die auch zu den geraden Potenzen zu rechnen ist. Alle diese reversibeln Prozesse haben auch die gemeinsame Eigenschaft, daß sie, wie Helmholtz gezeigt hat, vollständig dargestellt werden durch das Prinzip der kleinsten Wirkung, welches auf jedwede ihren meßbaren Verlauf betreffende Frage eine eindeutige Antwort gibt, und insofern kann man die Theorie der reversibeln Prozesse als eine vollkommen abgeschlossene bezeichnen. Dafür haben die reversibeln Prozesse den Nachteil, daß sie samt und sonders nur ideal sind; in der wirklichen Natur gibt es keinen einzigen reversibeln Prozeß, da jeder natürliche Vorgang mehr oder minder mit Reibung oder mit Wärmeleitung verknüpft ist. Im Bereich der irreversibeln Prozesse ist aber das Prinzip der kleinsten Wirkung nicht mehr ausreichend; denn das Prinzip der Vermehrung der Entropie bringt in das physikalische Weltbild ein ganz neues, dem Wirkungsprinzip an sich fremdes Element, welches auch eine besondere mathematische Behandlung erfordert. Ihm entspricht der einseitige Verlauf der Vorgänge, die Erreichung eines festen Endzustandes.

Die vorstehenden Erwägungen werden, wie ich hoffe, genügt haben, um es deutlich zu machen, daß der Gegensatz zwischen reversibeln und irreversibeln Prozessen ein viel tiefer liegender ist als etwa der zwischen mechanischen und elektrischen Prozessen, und daß daher dieser Unterschied mit besserem Recht als irgendein anderer zum vornehmsten Einteilungsgrund aller physikalischen Vorgänge gemacht werden und in dem physikalischen Weltbild der Zukunft endgültig die Hauptrolle spielen dürfte.

Und doch ist die erörterte Klassifizierung noch einer ganz wesentlichen Verbesserung bedürftig. Denn es läßt sich nicht leugnen, daß in der geschilderten Form das System der Physik immer noch mit einer starken Dosis Anthropomorphismus versetzt ist. In der Definition der Irreversibilität sowohl wie auch in der der Entropie wird nämlich Bezug genommen auf die Ausführbarkeit gewisser Veränderungen in der Natur,

und das heißt doch im Grunde nichts anderes, als daß die Einteilung der physikalischen Vorgänge abhängig gemacht wird von der Leistungsfähigkeit menschlicher Experimentierkunst, welche doch sicherlich nicht immer auf einer bestimmten Stufe stehen bleibt, sondern sich stetig mehr und mehr vervollkommnet. Wenn also die Unterscheidung zwischen reversibeln und irreversibeln Prozessen wirklich für alle Zeiten bleibende Bedeutung haben soll, so muß sie noch wesentlich vertieft und namentlich unabhängig gemacht werden von jeglicher Bezugnahme auf menschliche Fähigkeiten. Wie das geschehen kann, möchte ich im folgenden besprechen.

## III.

Die ursprüngliche Definition der Irreversibilität leidet, wie wir gesehen haben, an dem bedenklichen Mangel, daß sie eine bestimmte Grenze menschlichen Könnens zur Voraussetzung hat, während doch eine solche Grenze in Wirklichkeit gar nicht nachzuweisen ist. Im Gegenteil: das Menschengeschlecht macht alle Anstrengungen, um die gegenwärtigen Grenzen seiner Leistungsfähigkeit stets weiter hinauszurücken, und wir hoffen, daß uns in späteren Zeiten noch mancherlei gelingen wird, was vielleicht vielen jetzt als unausführbar erscheint. Könnte es demnach nicht noch einmal eintreten, daß ein Prozeß, der bis jetzt immer als irreversibel angesehen wird, sich infolge einer neuen Entdeckung oder Erfindung als reversibel erweist? Dann würde das ganze Gebäude des zweiten Hauptsatzes unweigerlich zusammenstürzen, denn die Irreversibilität eines einzigen Prozesses bedingt, wie sich leicht nachweisen läßt, die aller übrigen.

Nehmen wir ein konkretes Beispiel. Die mikroskopisch gut wahrnehmbare höchst merkwürdige zitternde Bewegung, welche kleine, in einer Flüssigkeit suspendierte Partikel ausführen, die sogenannte Brownsche Molekularbewegung, ist nach den neuesten Untersuchungen eine direkte Folge der fortwährenden Stöße der Flüssigkeitsmolekeln gegen die Partikel. Wäre man nun imstande, mit Hilfe irgendeiner sehr feinen Vorrichtung richtend und ordnend, aber ohne merklichen Arbeitsaufwand, auf die einzelnen Partikel derartig



einzuwirken, daß aus der ungeordneten Bewegung eine irgendwie geordnete wird, so hätte man ohne Zweifel ein Mittel gefunden, einen Teil der Flüssigkeitswärme ohne Kompensation in grob sichtbare und daher auch nutzbare lebendige Kraft umzuwandeln. Wäre dies nicht ein Widerspruch gegen den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie? Wenn diese Frage zu bejahen wäre, dann könnte jener Satz doch gewiß nicht mehr den Rang eines Prinzips behaupten, da doch seine Gültigkeit von den Fortschritten der Experimentaltechnik abhinge. Man sieht: das einzige Mittel, um dem zweiten Hauptsatz eine prinzipielle Bedeutung zu sichern, kann nur darin bestehen, daß man den Begriff der Irreversibilität unabhängig macht von allen menschlichen Beziehungen.

Nun geht der Begriff der Irreversibilität zurück auf den Begriff der Entropie; denn irreversibel ist ein Prozeß, wenn er mit einer Zunahme der Entropie verbunden ist. Hierdurch wird das Problem zurückgeführt auf eine geeignete Verbesserung der Definition der Entropie. Nach der ursprünglichen Clausiusschen Definition wird ja die Entropie gemessen durch einen gewissen reversibeln Prozeß, und die Schwäche dieser Definition beruht darauf, daß derartige reversible Prozesse in Wirklichkeit gar nicht genau ausführbar sind. Man könnte zwar mit gewissem Recht erwidern, daß es sich hierbei gar nicht um wirkliche Prozesse und um einen wirklichen Physiker handelt, sondern um ideale Prozesse, sogenannte Gedankenexperimente, und um einen idealen Physiker, der sämtliche experimentelle Methoden mit absoluter Genauigkeit handhabt. Hier liegt nun aber gerade wieder die Schwierigkeit. Wie weit reichen denn derartige ideale Messungen des idealen Physikers? Daß man ein Gas komprimiert mit einem Druck, der dem Druck des Gases gleich ist, oder es erwärmt aus einem Wärmereservoir, welches die nämliche Temperatur besitzt wie das Gas, läßt sich noch mit Hilfe eines geeigneten Grenzüberganges verstehen, aber daß man zum Beispiel einen gesättigten Dampf durch isotherme Kompression auf reversiblem Wege in Flüssigkeit verwandelt, ohne daß jemals die Homogeneität der Substanz verlorengeht, wie das bei gewissen Betrachtungen in der Thermodynamik vorausgesetzt wird, muß schon bedenklich erscheinen. Noch viel auffallen-

der jedoch ist das, was in der physikalischen Chemie an Gedankenexperimenten dem Theoretiker zugetraut wird. Mit seinen semipermeabeln Wänden, die in Wirklichkeit nur unter ganz speziellen Umständen und dann nur mit gewisser Annäherung realisierbar sind, trennt er auf reversibelm Wege nicht nur alle beliebigen verschiedenen Molekülarten, einerlei ob sie in stabilem oder labilem Zustand sich befinden, sondern sogar die entgegengesetzt geladenen Ionen voneinander und von den undissoziierten Molekülen, und er läßt sich dabei weder durch die enormen elektrostatischen Kräfte stören, welche sich einer solchen Trennung widersetzen, noch durch den Umstand, daß in Wirklichkeit sofort beim Beginn der Trennung die Moleküle sich wieder zum Teil dissoziieren, die Ionen sich wieder zum Teil vereinigen. Solche ideale Prozesse sind aber nach der Clausiusschen Definition durchaus notwendig, um die Entropie der undissoziierten Moleküle mit der Entropie der dissoziierten Moleküle vergleichen zu können. Fürwahr, es muß fast wundernehmen, daß alle diese kühnen Gedankengänge die Prüfung ihrer Resultate durch die Erfahrung so gut bestanden haben.

Bedenkt man aber andererseits, daß in allen Resultaten jede Bezugnahme auf die wirkliche Ausführbarkeit jener idealen Prozesse wieder verschwunden ist — es sind ja nur Beziehungen zwischen direkt meßbaren Größen, wie Temperatur, Wärmetönung, Konzentration usw. —, so ist die Vermutung nicht von der Hand zu weisen, daß vielleicht die ganze vorübergehende Einführung solcher idealer Prozesse im Grunde einen Umweg bedeutet, und daß der eigentliche Inhalt des Prinzips der Vermehrung der Entropie mit allen seinen Konsequenzen von dem ursprünglichen Begriff der Irreversibilität oder von der Unmöglichkeit des Perpetuum mobile zweiter Art ebensowohl losgelöst werden kann, wie das Prinzip der Erhaltung der Energie sich losgelöst hat von dem Satz der Unmöglichkeit des Perpetuum mobile erster Art.

Diesen Schritt: die Emanzipierung des Entropiebegriffes von menschlicher Experimentierkunst und dadurch die Erhebung des zweiten Hauptsatzes zu einem realen Prinzip, vollzogen zu haben, ist das wissenschaftliche Lebenswerk Ludwig Boltzmanns. Es besteht, kurz gesagt, in der allgemeinen Zurückführung des Begriffes der Entropie auf den Begriff der Wahrscheinlichkeit. Dadurch erklärt sich zugleich auch die Bedeutung des oben von mir aushilfsweise gebrauchten Wortes: „Vorliebe“ der Natur für einen bestimmten Zustand. Die Natur zieht eben wahrscheinlichere Zustände den minder wahrscheinlichen vor, indem sie nur Übergänge in der Richtung größerer Wahrscheinlichkeit ausführt. Die Wärme geht von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper tieferer Temperatur über, weil der Zustand gleicher Temperaturverteilung wahrscheinlicher ist als jeder Zustand ungleicher Temperaturverteilung.



Die Berechnung einer bestimmten Größe der Wahrscheinlichkeit für jeden Zustand eines Körpersystems wird ermöglicht durch die Einführung der atomistischen Theorie und der statistischen Betrachtungsweise. Für die Wechselwirkungen der einzelnen Atome könnten dann die bekannten Gesetze der allgemeinen Dynamik, Mechanik und Elektrodynamik zusammengenommen, ganz ungeändert bestehen bleiben.

Durch diese Auffassung wird mit einem Schlage der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie aus seiner isolierten Stellung gerückt, das Geheimnisvolle an der Vorliebe der Natur verschwindet, und das Entropieprinzip knüpft sich als ein wohlfundierter Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung an die Einführung der Atomistik in das physikalische Weltbild.

Freilich ist nicht zu leugnen, daß dieser weitere Schritt in der Vereinheitlichung des Weltbildes mit mancherlei Opfern erkauft ist. Das vornehmste Opfer ist wohl der Verzicht auf eine wirklich vollständige Beantwortung aller auf die Einzelheiten eines physikalischen Vorganges bezüglichen Fragen, wie sie jede bloß statistische Behandlungsweise mit sich bringt. Denn wenn wir nur mit Mittelwerten rechnen, erfahren wir nichts von den einzelnen Elementen, aus denen sie gebildet sind.

Ein zweiter bedenklicher Nachteil scheint zu liegen in der Einführung zweier verschiedener Arten der ursächlichen Verknüpfung physikalischer Zustände: einerseits der absoluten Notwendigkeit, andererseits der bloßen Wahrscheinlichkeit ihres Zusammenhangs. Wenn eine ruhende schwere Flüssigkeit einem tieferen Niveau zustrebt, so ist das nach dem Satz

der Erhaltung der Energie eine notwendige Folge des Umstandes, daß sie nur dann in Bewegung geraten, das heißt kinetische Energie gewinnen kann, wenn die potentielle Energie verkleinert wird, also ihr Schwerpunkt tiefer rückt. Wenn aber ein wärmerer Körper an einen ihn berührenden kälteren Körper Wärme abgibt, so ist das nur enorm wahrscheinlich, keineswegs absolut notwendig; denn es lassen sich sehr wohl ganz spezielle Anordnungen und Geschwindigkeitszustände der Atome ersinnen, bei denen gerade das Umgekehrte eintritt. Boltzmann hat hieraus die Konsequenz gezogen, daß solche eigentümlichen Vorgänge, die dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie zuwiderlaufen, in der Natur wohl vorkommen könnten, und hat ihnen daher in seinem physikalischen Weltbild einen Platz offen gelassen. Das ist nun allerdings ein Punkt, in welchem man nach meiner Meinung ihm nicht zu folgen braucht. Denn eine Natur, in welcher solche Dinge passieren, wie das Zurückströmen der Wärme in den wärmeren Körper oder die spontane Entmischung zweier ineinander diffundierter Gase, wäre eben nicht mehr unsere Natur. Solange wir es nur mit letzterer zu tun haben, werden wir wohl besser fahren, wenn wir solche seltsame Vorgänge nicht zulassen, sondern umgekehrt diejenige allgemeine Bedingung aufsuchen und als in der Natur realisiert annehmen, welche jene allen Erfahrungen zuwiderlaufenden Phänomene von vornherein ausschließt. Boltzmann selber hat jene Bedingung für die Gastheorie formuliert, es ist, ganz allgemein gesprochen, die „Hypothese der elementaren Unordnung" oder kurz ausgedrückt die Voraussetzung, daß die einzelnen Elemente, mit denen die statistische Betrachtung operiert, sich vollständig unabhängig voneinander verhalten. Mit der Einführung dieser Bedingung ist die Notwendigkeit alles Naturgeschehens wieder hergestellt; denn ihre Erfüllung zieht nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Vermehrung der Entropie als direkte Konsequenz nach sich, so daß man das Wesen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie auch geradezu als das Prinzip der elementaren Unordnung bezeichnen kann. In dieser Formulierung kann das Entropieprinzip ebensowenig jemals zu einem Widerspruch führen, wie die auf rein mathematischer Grundlage



ruhende Wahrscheinlichkeitsrechnung, aus der es abgeleitet ist.

Wie hängt nun die Wahrscheinlichkeit eines Systems mit seiner Entropie zusammen? Das ergibt sich einfach aus dem Satze, daß die Wahrscheinlichkeit zweier voneinander unabhängiger Systeme durch das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten ($W = W_1 W_2$), die Entropie aber durch die Summe der Einzelentropien ($S = S_1 + S_2$) dargestellt wird. Demnach ist die Entropie proportional dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit ($S = k \log W$). Dieser Satz eröffnet den Zugang zu einer neuen, über die Hilfsmittel der gewöhnlichen Thermodynamik weit hinausreichenden Methode, die Entropie eines Systems in einem gegebenen Zustand zu berechnen. Namentlich erstreckt sich hiernach die Definition der Entropie nicht allein auf Gleichgewichtszustände, wie sie in der gewöhnlichen Thermodynamik fast ausschließlich betrachtet werden, sondern ebensowohl auch auf beliebige dynamische Zustände, und man braucht zur Berechnung der Entropie nicht mehr wie bei Clausius einen reversibeln Prozeß auszuführen, dessen Realisierung stets mehr oder weniger zweifelhaft erscheint, sondern man ist unabhängig von allen Künsten menschlicher Technik. Das Anthropomorphe ist mit einem Worte aus dieser Definition völlig ausgemerzt, und damit der zweite Hauptsatz ebenso wie der erste auf eine reale Basis gestellt.

Die Fruchtbarkeit der neuen Definition der Entropie hat sich aber nicht allein in der kinetischen Gastheorie, sondern auch in der Theorie der strahlenden Wärme gezeigt, da sie zur Aufstellung von Gesetzen geführt hat, die mit der Erfahrung gut übereinstimmen. Daß auch die strahlende Wärme eine Entropie besitzt, folgt schon daraus, daß ein Körper, der Wärmestrahlen emittiert, eine Einbuße von Wärme, also eine Abnahme seiner Entropie erfährt. Da die gesamte Entropie eines Systems nur wachsen kann, so muß demnach ein Teil der Entropie des ganzen Systems in der ausgestrahlten Wärme enthalten sein. Daher besitzt auch jeder monochromatische Strahl eine bestimmte, nur von seiner Helligkeit abhängige Temperatur; es ist diejenige Temperatur, welche ein schwarzer Körper besitzt, der Strahlen von der nämlichen Helligkeit emittiert. Der Hauptunterschied zwischen der Strahlungs-

theorie und der kinetischen Theorie liegt darin, daß bei der strahlenden Wärme die Elemente, deren Unordnung die Entropie bedingt, nicht mehr wie bei den Gasen die Atome sind, sondern die äußerst zahlreichen, einfachen, sinusförmigen Partialschwingungen, aus denen jeder Licht- und Wärmestrahl, auch der homogenste, als zusammengesetzt betrachtet werden muß.

Für die Gesetze der Wärmestrahlung im freien Äther ist besonders bemerkenswert, daß die in ihnen auftretenden Konstanten, ebenso wie die Gravitationskonstante, einen universellen Charakter besitzen insofern, als sie unabhängig sind von der Bezugnahme auf irgendeine spezielle Substanz oder irgendeinen speziellen Körper. Daher ist mit ihrer Hilfe die Möglichkeit gegeben, Einheiten für Länge, Zeit, Masse, Temperatur aufzustellen, welche ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch für außerirdische und außermenschliche Kulturen notwendig behalten müssen. Dasselbe gilt nämlich bekanntlich keineswegs von den Einheiten unseres gebräuchlichen Maßsystems. Denn diese sind, obwohl sie gewöhnlich als die absoluten Einheiten bezeichnet werden, doch durchweg den speziellen Verhältnissen unserer gegenwärtigen irdischen Kultur angepaßt. Das Zentimeter ist dem jetzigen Umfang unseres Planeten entnommen, die Sekunde der Zeit seiner Umdrehung, das Gramm dem Wasser als dem Hauptbestandteil der Erdoberfläche, die Temperatur den Fundamentalpunkten des Wassers. Jene Konstanten aber sind derart, daß auch die Marsbewohner und überhaupt alle in unserer Natur vorhandenen Intelligenzen notwendig einmal auf sie stoßen müssen, — wenn sie nicht schon darauf gestoßen sind.

Noch eines weiteren höchst merkwürdigen Aufschlusses will ich hier gedenken, den das Wesen der Entropie durch ihre Verknüpfung mit der Wahrscheinlichkeit erfahren hat. Der oben benutzte Satz, daß die Wahrscheinlichkeit zweier Systeme das Produkt ist der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Systeme, gilt bekanntlich nur für den Fall, daß die beiden Systeme im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung unabhängig voneinander sind; im anderen Fall ist die Wahrscheinlichkeit eine andere. Daher sollte man vermuten, daß in gewissen Fällen die Gesamtentropie zweier Systeme verschieden



ist von der Summe der Einzelentropien. Der Nachweis, daß solche Fälle wirklich in der Natur vorkommen, ist kürzlich in der Tat von Max Laue geliefert worden. Zwei ganz oder teilweise „kohärente" Lichtstrahlen (die der nämlichen Lichtquelle entstammen) sind im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht unabhängig voneinander, weil durch die Partialschwingungen des einen Strahles die des anderen zum Teil mitbestimmt sind. Nun kann man tatsächlich eine einfache optische Vorrichtung ersinnen, durch welche erreicht wird, daß zwei kohärente Strahlen von beliebigen Temperaturen sich direkt in zwei andere verwandeln, die eine größere Temperaturdifferenz besitzen. Also der alte Clausiussche Grundsatz, daß Wärme nicht ohne Kompensation von einem kälteren zu einem wärmeren Körper gehen kann, gilt nicht für kohärente Wärmestrahlen. Aber das Prinzip der Vermehrung der Entropie behält auch hier seine Gültigkeit; nur ist die Entropie der ursprünglichen Strahlen nicht gleich der Summe ihrer Einzelentropien, sondern kleiner[1]).

Ganz ähnlich verhält es sich nun offenbar mit der oben aufgeworfenen Frage nach der eventuellen Umwandlung der Brownschen Molekularbewegung in nutzbare Arbeit. Denn eine Vorrichtung, welche richtend und ordnend auf die einzelnen bewegten Partikel wirken würde, mag sie nun technisch herstellbar sein oder nicht, sie wäre jedenfalls, sobald sie in Funktion tritt, mit den Bewegungen der Partikel in gewissem Sinne „kohärent", und deshalb würde es keineswegs einen Widerspruch gegen den zweiten Hauptsatz bedeuten, wenn aus ihrer Wirksamkeit nutzbare lebendige Kraft hervorginge. Man hat nur zu berücksichtigen, daß die Entropie der Molekularbewegung sich nicht einfach zu der Entropie jener Vorrichtung hinzuaddieren würde.

Derartige Betrachtungen zeigen, wie vorsichtig man bei der Berechnung der Entropie eines zusammengesetzten Systems aus den Entropien der Teilsysteme zu verfahren hat. Man muß streng genommen bei jedem Teilsystem erst fragen, ob nicht vielleicht an irgendeiner anderen Stelle des ganzen

[1]) M. Laue, Ann. d. Physik Bd. 20, S. 365, 1906; Bd. 23, S. 1, 795, 1907; Verh. d. Dtsch. Physik. Ges. Bd. 9, S. 606, 1907; Physik. Ztschr. Bd. 9, S. 778, 1908.

Systems ein kohärentes Teilsystem vorhanden ist; sonst könnten sich im Falle einer Wechselwirkung der beiden Teilsysteme ganz unerwartete, dem Entropieprinzip scheinbar widersprechende Vorgänge ereignen. Kommen aber die beiden Teilsysteme nicht zur Wechselwirkung, so würde der durch die Nichtbeachtung ihrer Kohärenz begangene Fehler gar nicht bemerklich werden.

Wird man durch diese eigentümlichen Folgeerscheinungen der Kohärenz nicht unwillkürlich an die geheimnisvollen Wechselbeziehungen im geistigen Leben erinnert, die häufig ganz verborgen bleiben und daher auch ohne Nachteil ignoriert werden können, die aber, falls einmal besondere äußere Umstände zusammentreffen, zu ganz ungeahnten Wirkungen sich entfalten können?

Ja, wenn wir einmal unserer Phantasie freien Lauf lassen wollten, so dürften wir die Möglichkeit nicht von der Hand weisen, daß vielleicht in Entfernungen, deren Größe durch keine unserer Messungsmethoden faßbar ist, zu der uns umgebenden Körperwelt gewisse kohärente Körper existieren, die, solange sie von den unserigen getrennt bleiben, sich ebenso wie diese durchaus normal verhalten, sobald sie aber mit ihnen in Wechselwirkung treten würden, scheinbare, aber auch nur scheinbare Ausnahmen vom Entropieprinzip hervorrufen könnten. Auf diese Weise könnte die von seiten des zweiten Hauptsatzes drohende Gefahr des allgemeinen Wärmetodes, welche vielen Physikern und Philosophen diesen Satz unsympathisch gemacht hat, abgewendet werden, ohne daß seine Allgemeingültigkeit überhaupt angetastet zu werden braucht. Aber auch ohne dieses künstliche Auskunftsmittel scheint mir schon wegen der unbegrenzten Ausdehnung der unserer Beobachtung zugänglichen Welt jene Gefahr nicht irgendwelcher Beunruhigung wert zu sein; harren doch gegenwärtig viele weit dringendere Fragen ihrer Bearbeitung.

## IV.

Ich habe versucht, Ihnen in Kürze einige der Grundlinien anzudeuten, welche das physikalische Weltbild der Zukunft vermutlich einmal aufweisen wird. Überschauen wir nun rückwärts blickend die Wandlungen, welche das Weltbild im



Laufe der Entwicklung der Wissenschaft durchgemacht hat und vergegenwärtigen wir uns wieder die oben gefundenen charakteristischen Merkmale dieser Entwicklung, so muß man zugeben, daß das Zukunftsbild gegenüber der bunten Farbenpracht des ursprünglichen Bildes, welches den mannigfachen Bedürfnissen des menschlichen Lebens entsprossen war und zu welchem alle spezifischen Sinnesempfindungen ihren Beitrag beigesteuert hatten, merklich abgeblaßt und nüchtern, der unmittelbaren Evidenz beraubt erscheint, und dies ist für die Verwertung in der Wirklichkeit ein schwerer Nachteil. Dazu kommt noch der gravierende Umstand, daß eine absolute Ausschaltung der Sinnesempfindungen ja gar nicht möglich ist, da wir doch die anerkannte Quelle aller unserer Erfahrungen nicht verstopfen können, daß also von einer direkten Erkenntnis des Absoluten gar nicht die Rede sein kann.

Welches ist denn nun das eigentümliche Moment, welches trotz dieser offenbaren Nachteile dem zukünftigen Weltbild dennoch einen so entscheidenden Vorrang verschafft, daß es sich gegen alle früheren durchsetzen kann? — Es ist nichts anderes als die Einheit des Bildes. Die Einheit in bezug auf alle Einzelzüge des Bildes, die Einheit in bezug auf alle Orte und Zeiten, die Einheit in bezug auf alle Forscher, alle Nationen, alle Kulturen.

Sehen wir nämlich genauer zu, so glich das alte System der Physik gar nicht einem einzigen Bild, sondern viel eher einer Gemäldesammlung; denn für jede Klasse von Naturerscheinungen hatte man ein besonderes Bild. Und diese verschiedenen Bilder hingen nicht miteinander zusammen; man konnte eins von ihnen entfernen, ohne die anderen zu beeinträchtigen. Das wird in dem zukünftigen physikalischen Weltbild nicht möglich sein. Kein einziger Zug desselben wird als unwesentlich fortgelassen werden können, jeder ist vielmehr unentbehrlicher Bestandteil des Ganzen und besitzt als solcher eine bestimmte Bedeutung für die beobachtete Natur, und umgekehrt wird und muß jede beobachtbare physikalische Erscheinung in dem Bilde einen ihr genau entsprechenden Platz finden. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied gegenüber gewöhnlichen Bildern, die wohl in gewissen, aber durchaus nicht in allen Zügen dem Original zu entspre-

chen brauchen, — ein Unterschied, der, wie ich glaube, bisweilen auch in Physikerkreisen nicht genug beachtet wird. Findet man doch gerade in der neueren Fachliteratur gelegentlich Bemerkungen wie die, man müsse bei Anwendungen der Elektronentheorie oder der kinetischen Gastheorie sich stets gegenwärtig halten, daß sie nur ein angenähertes Bild der Wirklichkeit zu geben beanspruche. Wenn diese Bemerkung etwa so ausgelegt würde, daß man nicht von allen Konsequenzen der kinetischen Gastheorie eine Anpassung an die Erfahrungstatsachen verlangen dürfe, so würde eine solche Auffassung auf einem argen Mißverständnis beruhen.

Als Rudolf Clausius um die Mitte des vorigen Jahrhunderts aus den Grundannahmen der kinetischen Gastheorie gefolgert hatte, daß die Geschwindigkeiten der Gasmolekeln bei gewöhnlichen Temperaturen sich nach Hunderten von Metern pro Sekunde bemessen, wurde ihm als Einwand entgegengehalten, daß zwei Gase nur sehr langsam ineinander diffundieren, und daß lokale Temperaturschwankungen in Gasen sich ebenfalls nur sehr langsam ausgleichen. Da berief sich Clausius zur Verteidigung seiner Hypothese nicht etwa darauf, daß dieselbe ja nur ein angenähertes Bild der Wirklichkeit vorstellen solle und daß man nicht zu viel von ihr verlangen dürfe, sondern er zeigte durch Berechnung der mittleren freien Weglänge, daß das von ihm entworfene Bild auch in den beiden namhaft gemachten Zügen den physikalischen Beobachtungen wirklich entspricht. Denn er war sich sehr wohl bewußt, daß mit der Feststellung eines einzigen definitiven Widerspruchs die neue Gastheorie ihren Platz im physikalischen Weltbild unwiderruflich verlieren müsse; und das nämliche gilt auch noch heutzutage.

Gerade auf der Berechtigung dieser hohen an das physikalische Weltbild zu stellenden Anforderungen beruht nun offenbar die werbende Kraft, mit der sich dasselbe schließlich die allgemeine Anerkennung erzwingt, unabhängig vom guten Willen des einzelnen Forschers, unabhängig von den Nationalitäten und von den Jahrhunderten, ja unabhängig vom Menschengeschlecht überhaupt. Die letzte Behauptung wird allerdings auf den ersten Blick sehr gewagt, wenn nicht absurd erscheinen. Aber erinnern wir uns zum Beispiel unserer



früheren gelegentlichen Schlußfolgerung bezüglich der Physik der Marsbewohner, so wird man mindestens zugeben müssen, daß die behauptete Verallgemeinerung nur eine derjenigen ist, wie man sie in der Physik täglich übt, wenn man über das direkt Beobachtete hinaus Schlüsse macht, die nie und nimmer durch menschliche Beobachtungen geprüft werden können, und daß daher jedenfalls jemand, der ihnen Sinn und Beweiskraft aberkennt, sich selber damit von der physikalischen Denkweise lossagt.

Kein Physiker zweifelt wohl an der Zulässigkeit der Behauptung, daß ein mit physikalischer Intelligenz begabtes Geschöpf, welches ein spezifisches Organ für ultraviolette Strahlen besitzt, diese Strahlen als gleichartig mit den sichtbaren anerkennen würde, obwohl noch niemand weder einen ultravioletten Strahl noch ein solches Geschöpf gesehen hat, und kein Chemiker trägt Bedenken, dem auf der Sonne vorhandenen Natrium dieselben chemischen Eigenschaften zuzuschreiben, wie dem irdischen Natrium, obwohl er nicht hoffen kann, jemals sein Reagenzglas mit einem Salz von Sonnennatrium zu füllen.

Mit den letzten Ausführungen sind wir schon in die Beantwortung derjenigen Fragen eingetreten, welche ich in meinen einleitenden Worten an den Schluß gestellt habe: Ist das physikalische Weltbild lediglich eine mehr oder minder willkürliche Schöpfung unseres Geistes, oder finden wir uns zu der gegenteiligen Auffassung getrieben, daß es reale, von uns ganz unabhängige Naturvorgänge widerspiegelt? Konkreter gesprochen: Dürfen wir vernünftigerweise behaupten, daß das Prinzip der Erhaltung der Energie in der Natur schon gegolten hat, als noch kein Mensch darüber nachdenken konnte, oder daß die Himmelskörper sich auch dann noch nach dem Gravitationsgesetz bewegen werden, wenn unsere Erde mit allen ihren Bewohnern in Trümmer gegangen ist?

Wenn ich im Hinblick auf alles Bisherige diese Frage mit ja beantworte, so bin ich mir dabei wohl bewußt, daß diese Antwort sich in gewissem Gegensatz befindet zu einer Richtung der Naturphilosophie, die gerade gegenwärtig unter der Führung von Ernst Mach sich großer Beliebtheit gerade in naturwissenschaftlichen Kreisen erfreut. Danach gibt es keine

andere Realität als die eigenen Empfindungen, und alle Naturwissenschaft ist in letzter Linie nur eine ökonomische Anpassung unserer Gedanken an unsere Empfindungen, zu der wir durch den Kampf ums Dasein getrieben werden. Die Grenze zwischen Physischem und Psychischem ist lediglich eine praktische und konventionelle, die eigentlichen und einzigen Elemente der Welt sind die Empfindungen [1]).

Halten wir den letzten Satz mit dem zusammen, was wir unserer Überschau über den tatsächlichen Entwicklungsgang der Physik entnommen haben, so gelangen wir notwendig zu dem eigentümlichen Schluß, daß das charakteristische Merkmal dieser Entwicklung seinen Ausdruck findet in der fortschreitenden Eliminierung der eigentlichen Elemente der Welt aus dem physikalischen Weltbilde. Jeder gewissenhafte Physiker müßte demnach stets sorgfältig bemüht sein, das eigene Weltbild als etwas begrifflich Einzigartiges und von allen anderen total Verschiedenes genau zu unterscheiden, und wenn einmal zwei seiner Fachgenossen, die ganz unabhängig voneinander den nämlichen physikalischen Versuch angestellt haben, dabei entgegengesetzte Resultate gefunden zu haben behaupten, was ja gelegentlich vorkommt, so würde er einen prinzipiellen Fehler begehen, wenn er etwa schließen wollte, daß mindestens einer von den beiden im Irrtum befindlich sein muß. Denn der Gegensatz könnte ja auch durch einen Unterschied der beiderseitigen Weltbilder bedingt sein. — Ich glaube nicht, daß ein richtiger Physiker jemals auf solch seltsame Gedankengänge verfallen würde.

Indessen will ich gern zugeben, daß eine erfahrungsgemäß enorme Unwahrscheinlichkeit von der prinzipiellen Unmöglichkeit praktisch nicht abweicht; aber das möchte ich dafür hier um so ausdrücklicher hervorheben, daß die Angriffe, welche von jener Seite her gegen die atomistischen Hypothesen und gegen die Elektronentheorie gerichtet werden, unberechtigt und unhaltbar sind. Ja ich möchte ihnen geradezu die Behauptung entgegensetzen — und ich weiß, daß ich damit nicht allein stehe —: die Atome, so wenig wir von ihren näheren Eigenschaften wissen, sind nicht mehr und nicht

[1]) Ernst Mach, Beiträge zur Analyse der Empfindungen, S. 23, 142. Jena 1886, Gustav Fischer.



weniger real als die Himmelskörper oder als die uns umgebenden irdischen Objekte; und wenn ich sage: ein Wasserstoffatom wiegt $1{,}6 \cdot 10^{-24}$ g, so enthält dieser Satz keine geringere Art von Erkenntnis wie der, daß der Mond $7 \cdot 10^{25}$ g wiegt. Freilich kann ich ein Wasserstoffatom weder auf die Waagschale legen noch kann ich es überhaupt sehen, aber den Mond kann ich auch nicht auf die Waagschale legen, und was das Sehen betrifft, so gibt es bekanntlich auch unsichtbare Himmelskörper, deren Masse mehr oder weniger genau gemessen ist; wurde doch ja auch die Masse des Neptun gemessen, noch ehe überhaupt ein Astronom sein Fernglas auf ihn richtete. Eine Methode physikalischer Messung aber, bei der jedwede auf Induktion beruhende Erkenntnis ausgeschaltet ist, existiert überhaupt nicht; das gilt auch für die direkte Wägung. Ein einziger Blick in ein Präzisionslaboratorium zeigt uns die Summe von Erfahrungen und Abstraktionen, welche gerade in einer solchen scheinbar so einfachen Messung enthalten ist.

Es bleibt uns noch übrig zu fragen, woher es denn kommt, daß die Machsche Erkenntnistheorie eine so große Verbreitung unter den Naturforschern gefunden hat. Täusche ich mich nicht, so bedeutet sie im Grunde eine Art Reaktion gegen die stolzen Erwartungen, die man vor einem Menschenalter, im Gefolge der Entdeckung des Energieprinzips, an die speziell mechanische Naturanschauung geknüpft hatte, wie man sie zum Beispiel in den Schriften Emil du Bois-Reymonds niedergelegt finden kann. Ich will nicht sagen, daß diese Erwartungen nicht manche hervorragende Leistungen von bleibendem Wert gezeitigt haben — ich nenne nur die kinetische Gastheorie —, aber in vollem Umfang genommen haben sie sich doch als übertrieben herausgestellt, ja die Physik hat durch die Einführung der Statistik in ihre Betrachtungen auf eine vollständige Durchführung der Mechanik der Atome grundsätzlich verzichtet. Ein philosophischer Niederschlag der unausbleiblichen Ernüchterung war der Machsche Positivismus. Ihm gebührt in vollem Maße das Verdienst, angesichts der drohenden Skepsis den einzig legitimen Ausgangspunkt aller Naturforschung in den Sinnesempfindungen wiedergefunden zu haben. Aber er schießt

über das Ziel hinaus, indem er mit dem mechanischen Weltbild zugleich das physikalische Weltbild überhaupt degradiert.

So fest ich davon überzeugt bin, daß dem Machschen System, wenn es wirklich folgerichtig durchgeführt wird, kein innerer Widerspruch nachzuweisen ist, ebenso sicher scheint es mir ausgemacht, daß seine Bedeutung im Grunde nur eine formalistische ist, welche das Wesen der Naturwissenschaft gar nicht trifft, und dies deshalb, weil ihm das vornehmste Kennzeichen jeder naturwissenschaftlichen Forschung: die Forderung eines konstanten, von dem Wechsel der Zeiten und Völker unabhängigen Weltbildes fremd ist. Das Machsche Prinzip der Kontinuität bietet hierfür keinen Ersatz; denn Kontinuität ist nicht Konstanz.

Das konstante einheitliche Weltbild ist aber gerade, wie ich zu zeigen versucht habe, das feste Ziel, dem sich die wirkliche Naturwissenschaft in allen ihren Wandlungen fortwährend annähert, und in der Physik dürfen wir mit Recht behaupten, daß schon unser gegenwärtiges Weltbild, obwohl es je nach der Individualität des Forschers noch in den verschiedensten Farben schillert, dennoch gewisse Züge enthält, welche durch keine Revolution, weder in der Natur noch im menschlichen Geiste, je mehr verwischt werden können. Dieses Konstante, von jeder menschlichen, überhaupt jeder intellektuellen Individualität Unabhängige ist nun eben das, was wir das Reale nennen. Oder gibt es zum Beispiel heute wirklich noch einen ernst zu nehmenden Physiker, der an der Realität des Energieprinzips zweifelt? Eher umgekehrt, man macht die Anerkennung dieser Realität zu einer Vorbedingung bei der wissenschaftlichen Wertschätzung.

Freilich, darüber, wie weit man gehen darf in der Zuversicht, schon jetzt die Grundzüge des Weltbildes der Zukunft festgelegt zu haben, lassen sich keine allgemeinen Regeln aufstellen. Hier ist die größte Vorsicht am Platze. Aber um diese Frage handelt es sich erst in zweiter Linie. Worauf es hier einzig und allein ankommt, ist die Anerkennung eines solchen festen, wenn auch niemals ganz zu erreichenden Zieles, und dieses Ziel ist — nicht die vollständige Anpassung unserer Gedanken an unsere Empfindungen, sondern — die vollständige Loslösung des physikalischen Weltbildes



von der Individualität des bildenden Geistes. Es ist dies eine etwas genauere Umschreibung dessen, was ich oben die Emanzipierung von den anthropomorphen Elementen genannt habe, um das Mißverständnis auszuschließen, als ob das Weltbild von dem bildenden Geist überhaupt losgelöst werden sollte; denn das wäre ein widersinniges Beginnen.

Zum Schluß noch ein Argument, das vielleicht auf diejenigen, welche trotz alledem den menschlich-ökonomischen Gesichtspunkt als den eigentlich ausschlaggebenden hinzustellen geneigt sind, mehr Eindruck macht als alle bisherigen sachlichen Überlegungen. Als die großen Meister der exakten Naturforschung ihre Ideen in die Wissenschaft warfen: als Nicolaus Copernicus die Erde aus dem Zentrum der Welt entfernte, als Johannes Kepler die nach ihm benannten Gesetze formulierte, als Isaac Newton die allgemeine Gravitation entdeckte, als Ihr großer Landsmann Christian Huygens seine Undulationstheorie des Lichtes aufstellte, als Michael Faraday die Grundlagen der Elektrodynamik schuf — die Reihe wäre noch lange fortzusetzen —, da waren ökonomische Gesichtspunkte sicherlich die allerletzten, welche diese Männer in ihrem Kampfe gegen überlieferte Anschauungen und gegen überragende Autoritäten stählten. Nein — es war ihr felsenfester, sei es auf künstlerischer, sei es auf religiöser Basis ruhender Glaube an die Realität ihres Weltbildes. Angesichts dieser doch gewiß unanfechtbaren Tatsache läßt sich die Vermutung nicht von der Hand weisen, daß, falls das Machsche Prinzip der Ökonomie wirklich einmal in den Mittelpunkt der Erkenntnistheorie gerückt werden sollte, die Gedankengänge solcher führender Geister gestört, der Flug ihrer Phantasie gelähmt und dadurch der Fortschritt der Wissenschaft vielleicht in verhängnisvoller Weise gehemmt werden würde. Wäre es da nicht wahrhaft „ökonomischer", dem Prinzip der Ökonomie einen etwas bescheideneren Platz anzuweisen? Übrigens werden Sie schon aus der Formulierung dieser Frage ersehen, daß ich selbstverständlich weit davon entfernt bin, die Rücksicht auf die Ökonomie in höherem Sinne außer acht lassen oder gar verbannen zu wollen.

Ja, wir können noch einen Schritt weiter gehen. Jene Männer sprachen gar nicht von ihrem Weltbild, sondern sie

sprachen von der Welt oder der Natur selbst. Ist nun zwischen ihrer „Welt“ und unserem „Weltbild der Zukunft“ irgendein erkennbarer Unterschied? Sicherlich nicht. Denn daß es gar keine Methode gibt, einen solchen Unterschied zu prüfen, ist durch Immanuel Kant Gemeingut aller Denker geworden. Der zusammengesetzte Ausdruck „Weltbild“ ist nur der Vorsicht halber üblich geworden, um gewisse Illusionen von vornherein auszuschließen. Wir können ihn also, wenn wir uns nur vornehmen, die erforderliche Vorsicht anzuwenden und hinter dem Worte Welt nichts weiter zu suchen als jenes ideale Zukunftsbild, auch wieder durch das einfache Wort ersetzen und gelangen dann zu einer mehr realistischen Ausdrucksweise, die sich nun gerade auch vom ökonomischen Standpunkte aus augenscheinlich weit mehr empfiehlt als der im Grunde äußerst komplizierte und schwer ganz durchzudenkende Machsche Positivismus, und die ja auch tatsächlich von den Physikern stets angewendet wird, wenn sie in der Sprache ihrer Wissenschaft reden. —

Ich habe soeben von Illusionen gesprochen. Nun wäre es ganz gewiß auch von meiner Seite eine arge Illusion, wenn ich hoffen wollte, mit meinen Ausführungen allgemein überzeugt zu haben, ja auch nur allgemein verständlich gewesen zu sein; und ich werde mich also auch sorgfältig hüten, ihr anheimzufallen. Sicherlich wird über diese prinzipiellen Fragen noch vieles gedacht und geschrieben werden; denn der Theoretiker sind viele, und das Papier ist geduldig. Deshalb wollen wir um so einstimmiger und rückhaltloser dasjenige betonen, was von uns allen ohne Ausnahme jederzeit anerkannt und beherzigt werden muß: das ist in erster Linie die Gewissenhaftigkeit in der Selbstkritik, verbunden mit der Ausdauer im Kampfe für das einmal als richtig Erkannte, in zweiter Linie die ehrliche, auch durch Mißverständnisse nicht zu erschütternde Achtung vor der Persönlichkeit wissenschaftlicher Gegner, und im übrigen das ruhige Vertrauen auf die Kraft desjenigen Wortes, welches seit nunmehr neunzehnhundert Jahren als letztes, untrüglichstes Kennzeichen die falschen Propheten von den wahren scheiden lehrt: An ihren Früchten sollt Ihr sie erkennen!

## Neue Bahnen der physikalischen Erkenntnis.

(Rede, gehalten beim Antritt des Rektorats der Friedrich-Wilhelm-Universität Berlin, am 15. Oktober 1913.)

Durch das Vertrauen der berufenen Vertreter unserer Körperschaft an die Spitze ihrer Verwaltung gestellt, habe ich als erste öffentliche Amtspflicht die Aufgabe übernommen, heute beim Beginn des neuen Studienjahres die Angehörigen und die Freunde unserer Alma mater in einer, wie die Satzungen es ausdrücken, auf den Anfang des Lehrkursus sich beziehenden Rede zu begrüßen.

Wohl sind es Empfindungen besonderer Art, mit denen wir, Lehrer und Lernende, diesmal auf die im neuen Semester vor uns liegenden Aufgaben blicken mögen. Denn während das nun zurückliegende Jahr uns wie in festlichen Glanz getaucht erscheint, in seinem ganzen Verlauf durchleuchtet und durchwärmt von den Gedanken an große nationale Ideen, an die schweren für sie gebrachten Opfer und an die ruhmvollen daraus entsprossenen Siegestaten, deren letzte und größte noch gerade in diesen Tagen von dem gesamten deutschen Volk gefeiert werden soll, wird das kommende Semester, aller menschlichen Voraussicht nach, durchweg einen schlichten Charakter tragen und lediglich der regelmäßigen Arbeit gewidmet sein.

Das Beste, was wir von den Gedenkfesten des vergangenen Jahres in das neue hinübernehmen, ist der brennende Wunsch, daß unsere Nachfahren dereinst in ähnlicher Weise zu uns emporblicken möchten, wie wir es jetzt zu den Männern tun, welche vor hundert Jahren in Wort und Tat für das Vaterland gekämpft und gelitten haben. Möge niemand einen solchen Wunsch von vornherein als gänzlich aussichtslos von sich weisen mit der Begründung, daß doch heutzutage von der Erreichung so hoher Ziele nicht mehr die Rede sein könne.

Denn einmal dürfen wir nicht vergessen, daß die Kräfte, welche damals zur herrlichen Entfaltung kamen, ihre eigentliche Nahrung zogen gerade aus der stillen, ihrer hohen Bedeutung vielleicht weniger sich bewußten, aber desto innerlicher schaffenden Werktagsarbeit vorangegangener schlichter Zeiten, und zum andern kann keiner im voraus wissen, mit welchem Maßstab kommende Geschlechter dereinst an die Bewertung der Leistungen unserer Tage herangehen werden. Was wir aber unter allen Umständen mit voller Sicherheit voraussagen können, ist, daß unsere Generation nur dann mit Grund hoffen darf, vor dem Urteil der Nachwelt künftig einmal in Ehren zu bestehen, wenn sie die ihr zugefallenen besonderen Aufgaben nach bester Einsicht in treuer Pflichterfüllung zu lösen bemüht sein wird, ein jeder an dem Platze, auf welchen ihn sein Beruf und das Schicksal geführt hat.

So sei es auch mir heute an dieser Stelle gestattet, aus dem speziellen Arbeitsgebiet der von mir vertretenen Wissenschaft einen Ausschnitt vorzulegen, indem ich die fortschreitende Entwicklung der physikalischen Erkenntnis ins Auge fasse und versuche, eine Schilderung zu entwerfen von neuen Bahnen, welche dieselbe seit dem Anbruch dieses Jahrhunderts eingeschlagen hat.

Wohl noch niemals hat die experimentelle physikalische Forschung einen ähnlichen stürmischen Aufschwung erlebt wie seit etwa einem Menschenalter, und wohl noch nie ist das Bewußtsein ihrer Bedeutung für die menschliche Kultur in weitere Kreise gedrungen wie in der Gegenwart. Die Wellen der drahtlosen Telegraphie, die Elektronen, die Röntgenstrahlen, die Erscheinungen der Radioaktivität erregen mehr oder weniger jedermanns Interesse. Faßt man nun aber die weitere Frage ins Auge, in welcher Weise diese neuen glänzenden Entdeckungen unser Verständnis der Natur und ihrer Gesetze beeinflußt und gefördert haben, so scheint es da auf den ersten Blick gar nicht entsprechend glänzend auszusehen.

Wer heute aus einiger Entfernung den Zustand der gegenwärtigen physikalischen Theorien von höherer Warte aus zu beurteilen sucht, mag im Gegenteil leicht zu dem Eindruck



geführt werden, daß die theoretische Forschung durch die vielen neuen, zum Teil völlig unvorhergesehenen experimentellen Funde einigermaßen in Verwirrung geraten ist und sich gegenwärtig in einer unerquicklichen Periode ziellosen Umhertastens befindet, im geraden Gegensatz zu der abgeklärten Ruhe und Sicherheit, welche die jüngst vergangene theoretische Epoche auszeichnet, die daher nicht mit Unrecht als die klassische bezeichnet zu werden pflegt. Allenthalben werden alte, fest eingewurzelte Vorstellungen angegriffen, allgemein anerkannte Sätze umgestoßen und an ihre Stelle neue Hypothesen gesetzt, zum Teil von einer Kühnheit, die an die Fassungskraft auch der wissenschaftlich Gebildeten schier unerträgliche Ansprüche stellt und jedenfalls nicht geeignet scheint, das Vertrauen auf einen stetigen zielbewußten Fortschritt der Wissenschaft zu fördern. So mag die gegenwärtige theoretische Physik den Eindruck eines zwar altehrwürdigen, aber morsch gewordenen Gebäudes gewähren, an dem ein Bestandteil nach dem andern abzubröckeln beginnt und dessen Grundfesten sogar ins Schwanken zu geraten drohen.

Und doch wäre nichts unrichtiger als eine derartige Vorstellung. Gewiß gehen in dem Aufbau der physikalischen Theorien gegenwärtig große tiefgreifende Veränderungen vor sich. Aber eine nähere Besichtigung ergibt, daß es sich hier keineswegs um Werke der Zerstörung, sondern vielmehr um Ergänzungs- und Erweiterungsbauten handelt, daß gewisse Quadern des Baues nur deshalb von der Stelle gerückt werden, um an einem anderen Orte zweckmäßigeren und festeren Platz zu finden, und daß die bisherigen eigentlichen Fundamente der Theorie gerade gegenwärtig so fest und so gesichert ruhen wie zu keiner Zeit vorher. Diese Behauptung eingehender zu begründen, soll der nächste Zweck der folgenden Erörterungen sein.

Zuvor eine allgemeinere Überlegung. Der erste Anstoß zu einer Revision und Umbildung einer physikalischen Theorie geht fast immer aus von der Feststellung einer oder mehrerer Tatsachen, die in den bisherigen Rahmen der Theorie nicht hineinpassen. Die Tatsachen bilden stets den Archimedischen Punkt, von dem aus auch die gewichtigste Theorie aus den Angeln gehoben werden kann. Insofern ist für den richtigen

Theoretiker nichts interessanter als eine Tatsache, die mit einer bisher allgemein anerkannten Theorie in direktem Widerspruch steht; denn hier setzt seine eigentliche Arbeit ein.

Was ist nun in einem solchen Falle zu tun? Fest steht nur das eine: An der bestehenden Theorie muß irgend etwas geändert werden, und zwar so, daß sie mit der festgestellten Tatsache in Übereinstimmung kommt. Aber an welchem Punkt der Theorie die Verbesserung einzusetzen hat, das ist oft eine sehr schwierige und verwickelte Frage. Denn eine Tatsache gibt noch keine Theorie. Letztere besteht vielmehr in der Regel aus einer ganzen Reihe von einzelnen miteinander kombinierten Sätzen. Sie ist einem komplizierten Organismus zu vergleichen, dessen einzelne Teile so vielfach und innig miteinander zusammenhängen, daß ein Eingriff, den man an irgendeiner Stelle macht, immer auch an verschiedenen anderen, oft scheinbar weit entfernten Stellen mehr oder weniger fühlbar wird, was vollständig zu übersehen allerdings nicht immer ganz leicht ist. Da mithin eine jede Schlußfolgerung der Theorie aus dem Zusammenwirken von mehreren Sätzen derselben hervorgeht, so können auch für jeden Mißerfolg, zu dem die Theorie geführt hat, in der Regel mehrere Sätze verantwortlich gemacht werden, und es bieten sich fast immer verschiedene Möglichkeiten dar, um den rettenden Ausweg zu gewinnen. Gewöhnlich spitzt sich dann schließlich die Frage so weit zu, daß es zu einem Konflikt zwischen zwei oder drei Sätzen kommt, die bisher miteinander vereinigt in der Theorie Platz fanden, von denen aber angesichts der festgestellten Tatsache notwendig mindestens einer fallengelassen werden muß. Der Kampf zieht sich oft jahre- und jahrzehntelang hin, seine endgültige Entscheidung bedeutet aber nicht allein die Ausmerzung des einen, unterlegenen Satzes, sondern zugleich auch, worauf hier besonderes Gewicht zu legen ist, ganz naturgemäß eine entsprechende Befestigung und Rangerhöhung der übrigen, siegreich gebliebenen Sätze der Theorie.

Und nun ist das überaus wichtige und merkwürdige Resultat zu verzeichnen, daß in allen derartig entstandenen Konflikten der neueren Zeit die großen allgemeinen physikalischen



Prinzipien, so namentlich das Prinzip der Erhaltung der Energie, das Prinzip der Erhaltung der Bewegungsgröße, das Prinzip der kleinsten Wirkung, die Hauptsätze der Thermodynamik, es gewesen sind, welche ausnahmslos das Feld behauptet haben, und deren Bedeutung daher ganz erheblich gewachsen ist, während dagegen die im Kampfe unterlegenen Sätze solche sind, welche bisher zwar allen theoretischen Entwicklungen als scheinbar sicherer Ausgangspunkt dienten, aber nur deshalb, weil sie als so selbstverständlich angesehen wurden, daß man sie besonders zu erwähnen gewöhnlich entweder nicht für nötig fand, oder überhaupt vergaß. Zusammenfassend kann man geradezu sagen, daß die neueste Entwicklung der theoretischen Physik ihr Gepräge erhält durch den Sieg der großen physikalischen Prinzipien über gewisse tief eingewurzelte, aber doch nur gewohnheitsmäßige Annahmen und Vorstellungen.

Um diese Darlegungen näher zu veranschaulichen, mögen nun einige jener Sätze besprochen werden, welche bisher ohne jedes Bedenken als selbstverständliche Grundlagen einer jeden einschlägigen Theorie benutzt zu werden pflegten, welche sich aber im Lichte neuer Tatsachen den allgemeinen Prinzipien der Physik gegenüber als unhaltbar oder wenigstens als höchst zweifelhaft erwiesen haben. Ich nenne hier drei derselben: die Unveränderlichkeit der chemischen Atome, die gegenseitige Unabhängigkeit von Raum und Zeit, die Stetigkeit aller dynamischen Wirkungen.

Selbstverständlich ist es nicht meine Absicht, hier alle die schwerwiegenden Gründe anzuführen, welche gegen die Unveränderlichkeit der chemischen Atome sprechen; ich will nur eine einzige Tatsache anführen, welche zu einem unausweichlichen Konflikt dieser früher stets als selbstverständlich betrachteten Annahme mit einem allgemeinen physikalischen Prinzip geführt hat. Die Tatsache ist die beständige Wärmeentwicklung einer jeden Radiumverbindung, das physikalische Prinzip ist das der Erhaltung der Energie, und der Konflikt endete schließlich, obwohl anfangs auch Stimmen laut wurden, welche das Energieprinzip anzweifeln wollten, mit einem vollen Siege dieses Prinzips.

Ein Radiumsalz, eingeschlossen in einen hinreichend dicken Bleimantel, entwickelt fortwährend Wärme, für das Gramm Radium berechnet pro Stunde gegen 135 Kalorien, es bleibt infolgedessen beständig wärmer als die Umgebung, ähnlich wie ein geheizter Ofen. Das Prinzip der Erhaltung der Energie besagt nun, daß die beobachtete Wärme unmöglich aus nichts entstehen kann, sondern irgendeine anderweitige als Äquivalent dienende Veränderung zur Ursache haben muß. Beim Ofen ist das der fortwährende Verbrennungsprozeß, bei der Radiumverbindung muß daher mangels jeglichen anderen chemischen Vorgangs eine Veränderung des Radiumatoms selbst angenommen werden, und diese vom Standpunkt der früheren chemischen Wissenschaft unerhört kühn erscheinende Hypothese hat sich nach allen Richtungen bestätigt.

Streng formal genommen liegt allerdings in dem Begriff eines veränderlichen Atoms ein gewisser Widerspruch, da doch die Atome ursprünglich gerade als die unveränderlichen Bestandteile aller Materie definiert sind. Danach müßte man genau genommen die Bezeichnung „Atom“ reservieren für wirklich unveränderliche Elemente, also vielleicht Elektronen und Wasserstoff. Aber abgesehen davon, daß es vielleicht niemals festzustellen sein wird, ob es in absolutem Sinne unveränderliche Elemente überhaupt gibt, würde eine solche Umbenennung in der Literatur eine heillose Verwirrung anrichten; sind doch die heutigen chemischen Atome längst nicht mehr die Atome Demokrits, sondern durch eine andere weit schärfere Definition zahlenmäßig genau bestimmbar. Nur von ihnen ist die Rede, wenn man von einer Umwandlung der Atome spricht, und ein Mißverständnis in der angedeuteten Richtung erscheint gewiß ausgeschlossen.

Nicht minder selbstverständlich wie die Unveränderlichkeit der Atome galt bis vor kurzem die gegenseitige Unabhängigkeit der Raum- und Zeitgrößen. Die Frage, ob zwei an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisse gleichzeitig sind oder nicht, hatte einen bestimmten physikalischen Sinn, ohne daß man erst nach dem Beobachter zu fragen brauchte, der die Zeitmessung vornimmt. Heute ist das anders geworden. Denn eine durch die feinsten optischen und elektrodynamischen Experimente bis jetzt immer wieder bestätigte



Tatsache, welche kurz, wenn auch nicht vollkommen deutlich, als die Relativität aller Bewegungen bezeichnet wird, hat jene einfache Vorstellung in einen Konflikt gebracht mit dem durch die Maxwell-Lorentzsche Elektrodynamik zur Geltung gelangten sogenannten Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, welches besagt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im leeren Raum unabhängig ist von der Bewegung der Lichtquelle. Nimmt man also die Relativität als experimentell bewiesen an, so muß entweder das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit oder die gegenseitige Unabhängigkeit von Raum und Zeit geopfert werden.

Betrachten wir auch hierfür ein einfaches Beispiel. Es werde mittels drahtloser Telegraphie ein Zeitsignal gegeben von einer Zentralstation aus, etwa vom Eiffelturm, wie das in dem gegenwärtig projektierten internationalen Zeitdienst vorgesehen ist. Dann empfangen alle Stationen rings im Umkreise, welche sich in der nämlichen Entfernung von der Zentralstation befinden, das Signal zu gleicher Zeit und können danach ihre Uhren richten. Aber diese Art der Zeitregulierung wird prinzipiell unzulässig, wenn man, fußend auf der Relativität aller Bewegungen, den Standpunkt der Betrachtung von der Erde auf die Sonne verlegt und somit die Erde als bewegt ansieht. Denn nach dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist klar, daß diejenigen Stationen, welche, von der Zentralstation aus gesehen, in der Richtung der Erdbewegung liegen, das Signal später empfangen als die, welche in der entgegengesetzten Richtung liegen, weil die ersteren Stationen den von ihnen aufzufangenden Lichtwellen vorauseilen und von ihnen erst eingeholt werden müssen, während die letzteren Stationen den Wellen entgegenkommen. So wird durch das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eine absolute, das heißt vom Bewegungszustand des Beobachters unabhängige Zeitbestimmung überhaupt unmöglich gemacht; beides nebeneinander kann nicht bestehen. In dem bisherigen Verlauf des Kampfes hat das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit entschieden die Oberhand behalten, und es ist trotz mancher in neuerer Zeit erhobener Bedenken sehr wahrscheinlich, daß darin keine Änderung mehr eintreten wird.

Der dritte der oben angeführten Sätze betrifft die Stetigkeit aller dynamischen Wirkungen, früher eine unbestrittene Voraussetzung aller physikalischen Theorien, die sich, in freier Anlehnung an Aristoteles, zu dem bekannten Dogma verdichtete: natura non facit saltus. Aber auch in diese von alters her stets respektierte Feste der physikalischen Wissenschaft hat die heutige Forschung eine bedenkliche Bresche geschlagen. Diesmal sind es die Prinzipien der Thermodynamik, mit denen auf Grund neuerer Erfahrungstatsachen jener Satz in Kollision geraten ist, und wenn nicht alle Zeichen trügen, so sind die Tage seiner Gültigkeit gezählt. Die Natur scheint in der Tat Sprünge zu machen, und zwar solche von recht sonderbarer Art. Zur näheren Erläuterung sei es mir gestattet, einen anschaulichen Vergleich heranzuziehen.

Stellen wir uns ein Gewässer vor, in welchem starke Winde einen hohen Wellengang erzeugt haben. Auch nach völligem Aufhören der Winde werden die Wellen noch eine geraume Zeit lang sich erhalten und von einem Ufer zum andern wandern. Aber dabei wird sich eine gewisse charakteristische Veränderung vollziehen. Die Bewegungsenergie der längeren, gröberen Wellen wird sich, besonders beim Aufschlagen ans Ufer oder an andere feste Gegenstände, in immer steigendem Maße in Bewegungsenergie von kürzeren und feineren Wellen verwandeln, und dieser Prozeß wird so lange andauern, bis schließlich die Wellen so klein, die Bewegungen so fein geworden sind, daß sie sich dem äußeren Anblick vollständig entziehen. Das ist der allbekannte Übergang der sichtbaren Bewegung in Wärme, der molaren Bewegung in molekulare, der geordneten Bewegung in ungeordnete; denn bei der geordneten Bewegung haben viele benachbarte Moleküle eine gemeinschaftliche Geschwindigkeit, während bei der ungeordneten Bewegung ein jedes Molekül seine besondere und besonders gerichtete Geschwindigkeit besitzt.

Der hier geschilderte Zersplitterungsprozeß geht aber nicht ins Unendliche weiter, sondern er findet seine natürliche Grenze in der Größe der Atome. Denn die Bewegung eines einzelnen Atoms, allein für sich betrachtet, ist stets eine geordnete, da doch die einzelnen Teile eines Atoms sich alle



mit der nämlichen gemeinschaftlichen Geschwindigkeit bewegen. Je größer die Atome, desto weniger weit kann sich die gesamte Bewegungsenergie zersplittern. Soweit ist alles vollkommen klar und die klassische Theorie in bester Übereinstimmung mit der Erfahrung.

Nun denken wir uns einen anderen, ganz analogen Vorgang sich vollziehen, aber nicht mit den Wellen des Wassers, sondern mit solchen der Licht- und Wärmestrahlung, indem wir etwa annehmen, daß die von einem starkglühenden Körper emittierten Strahlen durch passende Spiegelung in einen gut abgeschlossenen Hohlraum eingesammelt worden sind und dort zwischen den reflektierenden Wänden des Raumes beständig hin und her geworfen werden. Auch hier wird sich eine allmähliche Umwandlung der Strahlungsenergie von längeren Wellen zu kürzeren, von geordneter Strahlung in ungeordnete vollziehen; den längeren, gröberen Wellen entsprechen die ultraroten Strahlen, den kürzeren, feineren die ultravioletten Strahlen des Spektrums. Man muß also nach der klassischen Theorie erwarten, daß die ganze Strahlungsenergie sich schließlich auf den ultravioletten Teil des Spektrums zurückziehen wird, oder mit anderen Worten, daß die ultraroten und auch die sichtbaren Strahlen allmählich ganz verschwinden und sich in unsichtbare, vorwiegend nur chemisch wirksame ultraviolette Strahlen verwandeln.

Von einem solchen Phänomen ist nun aber in der Natur keine Spur zu entdecken. Die Umwandlung erreicht vielmehr früher oder später ihr ganz bestimmtes, genau nachweisbares Ende, und dann bleibt der Strahlungszustand in jeder Hinsicht stabil.

Um diese Tatsache mit der klassischen Theorie zu vereinigen, sind schon die verschiedensten Versuche gemacht worden, aber es hat sich bisher stets gezeigt, daß der Widerspruch viel zu tief an die Wurzeln der Theorie greift, um dieselben unberührt zu lassen. So bleibt nichts übrig, als abermals die Grundlagen der Theorie zu revidieren. Und abermals ist zu konstatieren, daß sich die Prinzipien der Thermodynamik als unerschütterlich erwiesen haben. Denn der einzige bisher gefundene Weg, der eine vollständige Lösung des Rätsels zu versprechen scheint, nimmt seinen

Ausgangspunkt gerade von den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik, er kombiniert dieselben aber mit einer neuen eigentümlichen Hypothese, deren Inhalt an der Hand der beiden angeführten Bilder sich etwa folgendermaßen aussprechen läßt.

Bei den Wasserwellen findet die Zersplitterung der Bewegungsenergie dadurch ihr Ende, daß die Atome die Energie in gewisser Weise zusammenhalten, indem jedes Atom ein bestimmtes endliches Quantum Materie darstellt, das sich nur als Ganzes bewegen kann. In analoger Weise werden auch bei der Licht- und Wärmestrahlung, obwohl sie an sich gänzlich immaterieller Natur ist, dennoch gewisse Ursachen wirksam sein müssen, welche die Strahlungsenergie in bestimmten endlichen Quanten zusammenhalten, und um so stärker zusammenhalten, je kürzer die Wellen sind, je schneller also die Schwingungen erfolgen.

Wie man sich das Zustandekommen derartiger Quanten von rein dynamischer Art im einzelnen vorzustellen hat, darüber läßt sich zur Zeit noch nichts mit Sicherheit sagen. Auf alle Fälle hat die Quantenhypothese zu der Vorstellung geführt, daß es Veränderungen in der Natur gibt, die nicht stetig, sondern explosionsartig verlaufen. Ich brauche kaum daran zu erinnern, daß diese Vorstellung durch die Entdekkung und nähere Erforschung der radioaktiven Erscheinungen bedeutend an Anschaulichkeit gewonnen hat. Im übrigen treten alle mit den näheren Erklärungsversuchen verbundenen Schwierigkeiten einstweilen noch zurück hinter dem Umstand, daß die Quantenhypothese bisher Resultate gezeitigt hat, welche mit den bisherigen Strahlungsmessungen in besserer Übereinstimmung sind als die aller früheren Theorien.

Aber noch mehr. Wenn es ein günstiges Zeichen für eine neue Hypothese ist, daß sie sich auch auf solchen Gebieten bewährt, für die sie ursprünglich nicht gemacht wurde, so darf die Quantenhypothese sicherlich ein vorteilhaftes Zeugnis für sich in Anspruch nehmen. Ich will hier nur auf einen ganz besonders frappanten Punkt hinweisen. Seitdem die Verflüssigung von Luft, Wasserstoff und Helium gelungen ist, steht der Experimentalforschung in dem Gebiet tiefer Temperaturen ein neues reiches Arbeitsfeld offen, und hier haben



sich schon jetzt eine Reihe neuer, zum Teil höchst überraschender Resultate ergeben.

Um ein Stück Kupfer von minus 250 auf minus 249 Grad, also um einen Temperaturgrad, zu erwärmen, bedarf es nicht etwa der nämlichen Wärmemenge wie zur Erwärmung des Kupfers von 0 auf 1 Grad, sondern einer ungefähr dreißigmal kleineren; würde man mit der Anfangstemperatur des Kupfers noch tiefer herabgehen, so fände man die entsprechende Wärmemenge noch viele Male kleiner, ohne jede angebbare Grenze. Diese Tatsache läuft nicht nur allen gewohnheitsmäßigen Vorstellungen, sondern auch den Forderungen der klassischen Theorie schnurstracks zuwider. Denn wenn man auch schon seit mehr als hundert Jahren zwischen Temperatur und Wärmemenge genau zu unterscheiden gelernt hatte, so war man doch durch die kinetische Theorie der Materie zu der Folgerung geführt worden, daß beide Größen, wenn nicht genau proportional, so doch wenigstens einigermaßen parallel zueinander verlaufen.

Die Quantenhypothese hat diese Schwierigkeit vollkommen geklärt, und überdies hat sich bei dieser Gelegenheit noch ein anderes Resultat von hoher Wichtigkeit ergeben, nämlich daß die Kräfte, welche die Wärmeschwingungen in einem festen Körper hervorrufen, von ganz derselben Art sind wie die, welche die elastischen Schwingungen bewirken. Man kann also jetzt mit Hilfe der Quantenhypothese aus den elastischen Eigenschaften eines einatomigen Körpers seine Wärmeenergie für verschiedene Temperaturen quantitativ berechnen, — eine Leistung, von der die klassische Theorie noch weit entfernt war. Daraus entspringen dann eine Anzahl weiterer, auf den ersten Blick recht seltsam anmutender Fragen, wie zum Beispiel die, ob auch die Schwingungen einer tönenden Stimmgabel nicht absolut stetig, sondern quantenhaft erfolgen. Freilich sind bei akustischen Schwingungen wegen ihrer relativ geringen Frequenz die Energiequanten ungeheuer klein: beim eingestrichenen *a* zum Beispiel betragen sie nur etwa drei Quatrilliontel Arbeitseinheiten im absoluten mechanischen Maße. Die gewöhnliche Elastizitätstheorie würde daher deswegen ebensowenig einer Abänderung bedürfen wie wegen des ganz analogen Umstandes, daß sie die Materie als

vollkommen stetig behandelt, während dieselbe doch, genau genommen, atomistisch, also quantenhaft, konstituiert ist. Aber vom prinzipiellen Standpunkt aus muß das Umwälzende der neuen Auffassung immerhin einem jeden einleuchten, und wenn auch die Natur der dynamischen Quanten einstweilen noch ziemlich rätselhaft bleibt, so wird es doch durch die heute vorliegenden Tatsachen schwer gemacht, an ihrer Existenz, sei es in welcher Form immer, zu zweifeln. Denn was man messen kann, das existiert auch.

So beginnt im Lichte der neueren Forschung das physikalische Weltbild einen stets innigeren Zusammenhang seiner einzelnen Züge und zugleich eine gewisse eigentümliche Struktur derselben zu offenbaren, deren Feinheit früher dem weniger geschärften Blick noch verwischt erschien und darum verborgen bleiben mußte. Aber, so mag man immer wieder aufs neue fragen: Was bedeutet dieser Fortschritt im Grunde für die Befriedigung unseres Wissensdranges? Rücken wir durch die Verfeinerung unseres Weltbildes der Erkenntnis der Natur selber auch nur um einen Schritt näher? Dieser prinzipiellen Frage lassen Sie uns noch eine kurze Betrachtung widmen. Nicht als ob auf diesem unendlich vielfach durchdachten Gebiet hier etwas wesentlich Neues zu sagen wäre, sondern weil sich in diesem Punkte noch heute die Ansichten zum Teil schroff gegenüberstehen, und weil jeder, der ein tieferes Interesse an den eigentlichen Zielen der Wissenschaft nimmt, notwendig dazu Stellung nehmen muß.

Vor fünfunddreißig Jahren hat Hermann von Helmholtz an dieser selben Stelle ausgeführt, daß unsere Wahrnehmungen uns niemals ein Abbild, sondern höchstens ein Zeichen der Außenwelt zu liefern vermögen. Denn um irgendeine Art von Ähnlichkeit zwischen der Eigentümlichkeit der äußeren Vorgänge und der Eigentümlichkeit der durch sie erregten Empfindung aufzuzeigen, fehlt es an jeglichem Anhaltspunkt; alle Vorstellungen, die wir uns etwa von der Außenwelt machen, spiegeln eben im letzten Grunde doch nur unsere eigenen Empfindungen wider. Hat es da überhaupt noch einen vernünftigen Sinn, unserem Selbstbewußtsein eine von demselben unabhängige „Natur an sich“ gegenüberzustellen? Sind nicht vielmehr alle sogenannten Naturgesetze



im Grunde nur mehr oder minder zweckmäßige Regeln, mit denen wir den zeitlichen Ablauf unserer Empfindungen möglichst genau und bequem zusammenfassen? — Wenn das so wäre, so hätte sich nicht nur der gemeine Menschenverstand, sondern auch die exakte Naturforschung von jeher in einem grundsätzlichen Irrtum befunden; denn es ist unmöglich zu leugnen, daß die ganze bisherige Entwicklung der physikalischen Erkenntnis tatsächlich gerade auf eine möglichst weitgehende grundsätzliche Trennung der Vorgänge in der äußeren Natur von den Vorgängen in der menschlichen Empfindungswelt hinarbeitet.

Der Ausweg aus dieser verfänglichen Schwierigkeit ergibt sich sehr bald, wenn man den eingeschlagenen Gedankengang nur noch einen Schritt weiter verfolgt. Setzen wir einmal den Fall voraus, es sei ein physikalisches Weltbild gefunden worden, das allen zu machenden Ansprüchen genügt, das also alle empirisch gefundenen Naturgesetze vollkommen genau darzustellen vermag. Dann wird die Behauptung, daß jenes Bild der „wirklichen“ Natur auch nur einigermaßen ähnlich sei, auf keinerlei Weise bewiesen werden können. Aber dieser Satz hat auch eine Kehrseite, die gemeiniglich viel zuwenig betont wird: Genau ebenso wird die noch weit kühnere Behauptung, daß das vorausgesetzte Weltbild die wirkliche Natur in allen Punkten ohne Ausnahme absolut getreu wiedergibt, auf keinerlei Weise zu widerlegen sein. Denn um einen solchen Widerlegungsbeweis auch nur anzutreten, müßte man von der wirklichen Natur irgend etwas mit Sicherheit aussagen können, was doch anerkanntermaßen gänzlich ausgeschlossen ist.

Man sieht: hier klafft ein ungeheures Vakuum, in welches keine Wissenschaft je einzudringen vermag; und die Ausfüllung dieses Vakuums ist Sache nicht der reinen, sondern der praktischen Vernunft, ist Sache einer gesunden Weltanschauung.

Sowenig sich eine Weltanschauung wissenschaftlich beweisen läßt, so sicher kann man darauf bauen, daß sie jeglichem Ansturm gegenüber unerschütterlich standhalten wird, sofern sie nur mit sich selber und mit den Tatsachen der Erfahrung in Übereinstimmung bleibt. Aber man wähne nicht, daß es möglich sei, selbst in der exaktesten aller Naturwissen-

schaften, ganz ohne Weltanschauung, das will sagen, ganz ohne unbeweisbare Hypothesen, vorwärtszukommen. Auch für die Physik gilt der Satz, daß man nicht selig wird ohne den Glauben, zum mindesten den Glauben an eine gewisse Realität außer uns. Dieser zuversichtliche Glaube ist es, der dem vorwärtsdrängenden Schaffenstrieb die Richtung weist, er allein gewährt der herumtastenden Phantasie die nötigen Anhaltspunkte, nur er vermag es, den durch Mißerfolge ermüdeten Geist immer wieder aufzurichten und zu erneutem Vorstoß anzufeuern. Ein Forscher, der sich bei seinen Arbeiten nicht von irgendeiner Hypothese leiten läßt, sei sie auch so vorsichtig und provisorisch gefaßt als nur möglich, verzichtet von vornherein auf ein tieferes Verständnis seiner eigenen Resultate. Wer den Glauben an die Realität der Atome und der Elektronen, oder an die elektromagnetische Natur der Lichtwellen, oder an die Identität von Körperwärme und Bewegung verwirft, der wird deswegen ganz gewiß niemals eines logischen oder empirischen Widerspruchs überführt werden können. Aber er mag zusehen, wie er es von seinem Standpunkt aus fertig bringt, die physikalische Erkenntnis zu fördern.

Freilich: der Glaube allein tut's nicht, er kann, wie die Geschichte einer jeden Wissenschaft lehrt, leicht auch einmal in die Irre führen und in Beschränktheit und Fanatismus ausarten. Um ein zuverlässiger Führer zu bleiben, muß er beständig an der Hand der Denkgesetze und der Erfahrung nachgeprüft werden, und dazu verhilft in letzter Linie nur gewissenhafte, oft mühsame und entsagungsvolle Einzelarbeit. Kein König der Wissenschaft, der nicht, wenn es darauf ankommt, auch einmal Kärrnerdienste zu leisten fähig und willens ist, sei es im Laboratorium oder im Archiv, in der freien Natur oder am Schreibtisch. Gerade in solchem harten Ringen reift und läutert sich die Weltanschauung. Nur wer diesen Prozeß an seinem eigenen Leibe durchgekostet hat, wird dessen Sinn und Bedeutung voll zu würdigen wissen.

Damit wende ich mich nun zum Schluß noch besonders an Sie, liebe Kommilitonen, die Sie im Begriffe stehen, die Schwelle eines neuen Studiensemesters zu überschreiten. Die



Pforten unserer Universität sind geöffnet, binnen kurzem werden sich die Hörsäle füllen, und wiederum wird manches Saatkorn neu ausgestreut werden, manches schon aufgegangene der Frucht weiter entgegenreifen, genährt und gefördert durch die Ihnen von Ihren Lehrern übermittelten Schätze jahrhundertelanger, unermeßlich vielseitiger geistiger Arbeit.

Aber glauben Sie nicht, daß alles Ihnen auf dem Katheder Dargebotene der Weisheit letzten Schluß bedeutet. Solange es einen Fortschritt in der Wissenschaft gibt, solange ist dieselbe zeitlichem Irrtum unterworfen. Wer es einmal so weit gebracht hat, daß er nicht mehr irrt, der hat auch zu arbeiten aufgehört.

Darum: wenn Ihnen bei Ihren Studien Bedenken und Zweifel begegnen, betrachten Sie dieselben nicht von vornherein als etwas Unerfreuliches oder gar Unerlaubtes, das abgeschüttelt oder unterdrückt werden muß, sondern gehen Sie ihnen sorgfältig auf den Grund, wenden Sie sich vertrauensvoll an Ihre Lehrer, die Ihnen als Führer vorangehen, glauben Sie an deren reifere Erfahrung und halten Sie fest an der Hoffnung, auch für dunkle und schwierige Fragen durch gewissenhaft fortgesetztes Bemühen ein allmählich wachsendes Verständnis und gerade dadurch erst die gründlichste wissenschaftliche Förderung zu gewinnen.

Sollte aber Ihr ehrliches, durch mehrfache Proben bewährtes Streben Ihnen mit Entschiedenheit besondere, von den bisherigen abweichende Wege weisen, dann — folgen Sie Ihrer eigenen Überzeugung mehr als jeder anderen. Denn diese ist und bleibt Ihr höchstes, köstlichstes Gut, so gewiß als die Heranbildung zur wissenschaftlichen Selbständigkeit das schönste Ziel des akademischen Unterrichts bildet, und so gewiß eine in redlicher Arbeit erworbene eigene wissenschaftliche Überzeugung einen festen Ankergrund abgibt, um auch der sittlichen Weltanschauung allen den möglichen Wechselfällen des Lebens gegenüber den nötigen Halt zu gewähren.

Die edelste unter den sittlichen Blüten der Wissenschaft und zugleich die ihr eigentümlichste ist ohne Zweifel die Wahrhaftigkeit: jene Wahrhaftigkeit, die durch das Bewußtsein der persönlichen Verantwortung hindurch zur inneren Freiheit

führt und deren Wertschätzung in unserem gegenwärtigen öffentlichen wie privaten Leben noch viel höher bemessen werden sollte. In dem Maße, wie unser junges Geschlecht sich an dem Kampfe beteiligt, um ihr zu immer allgemeinerer Anerkennung zu verhelfen, darf es sich eines Sinnes fühlen mit den Helden, die vor hundert Jahren die Wahrhaftigkeit ihrer Liebe zum Vaterland mit ihrem Herzblut besiegelten. In solchem Gedenken und mit solcher Gesinnung lassen Sie uns eintreten in die Arbeit des neuen Semesters.

## Dynamische und statistische Gesetzmäßigkeit.

(Rede, gehalten bei der Feier zum Gedächtnis des Stifters der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin, am 3. August 1914.)

Nach altehrwürdigem Brauch begeht heute die Friedrich-Wilhelms-Universität, in freudigem Bekenntnis untilgbarer Dankesschuld, die Geburtsfeier ihres erhabenen Stifters, dessen Namen sie mit Stolz den ihren nennt, und entnimmt zugleich der besonderen Lage dieses Gedenktages die Anregung zu sinnender Rückschau auf das zur Neige gehende Semester. In einer Zeit der bittersten Not gegründet, durch ein Jahrhundert rastloser Arbeit zu hoher Blüte entfaltet, darf sie gegenwärtig mit Recht sich der genommenen Entwicklung freuen und fühlt sich gerade heute wieder besonders eng verbunden mit der Persönlichkeit ihres ersten Königlichen Herrn, der unter den Fürsten seiner Zeit emporragte durch die Makellosigkeit des Charakters, durch die Gewissenhaftigkeit und Treue, die er in allen Lagen seines schicksalsreichen Lebens zur Richtschnur des Handelns zu nehmen bemüht war.

Gewissenhaftigkeit und Treue, das sind auch die Wahrzeichen, unter denen unsere Universität groß geworden ist, während dagegen andere gleichzeitig gegründete, äußerlich noch glänzendere Schöpfungen menschlichen Genies, die eines solchen Merkmals entbehren mußten, vorzeitig in Staub zerronnen sind; sie sollen für immer die Leitsterne bleiben, welche Lehrern und Lernenden unserer Anstalt bei ihrer Arbeit wie bei all ihrem Tun voranleuchten. Niemals, zu keiner Zeit seit der Gründung unserer Universität, waren sie ihnen nötiger als in diesen Tagen, wo uns alle, die wir hier versammelt sind, ein einziges Gefühl im tiefsten Innern bewegt.

Wir wissen heute nicht, was der nächste Morgen bringen wird; wir ahnen nur, daß unserem Volke in kurzer Frist

etwas Großes, etwas Ungeheures bevorsteht, daß es um Gut und Blut, um die Ehre und vielleicht um die Existenz des Vaterlandes gehen wird. Aber wir sehen und fühlen auch, wie sich bei dem furchtbaren Ernst der Lage alles, was die Nation an physischen und sittlichen Kräften ihr eigen nennt, mit Blitzesschnelle in eins zusammenballt und zu einer gen Himmel lodernden Flamme heiligen Zornes sich entzündet, während so manches, was sonst für wichtig und erstrebenswert gilt, als wertloses Flitterwerk unbeachtet zu Boden fällt.

Doch nur, wenn ein jeder, ob alt oder jung, ob hoch oder niedrig, gewissenhaft und treu auf dem ihm vom Schicksal gewiesenen Posten ausharrt, dürfen wir hoffen, daß das sich nun wendende Blatt der Weltgeschichte kommenden Geschlechtern einst Gutes von uns künden wird. Darum ziemt es uns in der gegenwärtigen Stunde zunächst, der überkommenen Pflicht zu gedenken und uns zu sammeln in schlicht-sachlicher, wissenschaftlicher Betrachtung.

Auch der Wissenschaft sind Gewissenhaftigkeit und Treue keine fremden Begriffe; denn nicht nur dem praktischen Leben, auch der reinen Forschung, die gleichfalls auf der Universität eine Heimat hat und hoffentlich auch für immer behalten wird, ist solch sittlicher Gehalt vonnöten. Denn wehe dem Forscher, der in dem Vorwärtsdrängen nach großen, weitreichenden Resultaten, vielleicht geblendet durch die ersten Erfolge einer neuen geistigen Eroberung, die gewissenhafteste Prüfung und Sicherung der gewonnenen Stellung unterläßt, der nicht treu und fest den gewählten Ausgangspunkt und den eingeschlagenen Weg im Auge behält. Über Nacht kann es ihm geschehen, daß seine mühsam gewonnene Position abgeschnitten wird und sich der einstürmenden Kritik gegenüber als unhaltbar erweist. Und nicht minder wehe dem Forscher, der vor einem neuen, von anderer Seite eingebrachten Befunde, der sich nicht recht in seine eigenen Ideenkreise einfügen will, die Augen verschließt und ihn, wenn nicht als unrichtig, so doch als belanglos hinzustellen geneigt ist. Die Einsicht, die er für den Augenblick zurückweist, wird er für die Zukunft um teuren Preis erkaufen müssen.



Derartige unvorhergesehene und auch unvorherzusehende Befunde fehlen in keiner Wissenschaft, und um so weniger, je frischere Jugendkraft in ihr pulsiert. Denn eine jede Wissenschaft, selbst die Mathematik nicht ausgenommen, ist bis zu einem gewissen Grade Erfahrungswissenschaft, mag sie nun die Natur oder die geistige Kultur zum Gegenstande haben, und in jeder Wissenschaft gilt als vornehmste Losung die Aufgabe, in der Fülle der vorliegenden Einzelerfahrungen und Einzeltatsachen nach Ordnung und Zusammenhang zu suchen, um dieselben durch Ergänzung der Lücken zu einem einheitlichen Bilde zusammenzuschließen.

Aber auch die Art der Gesetzlichkeit ist, auf so verschiedenen Gebieten die in den einzelnen Wissenschaften behandelten Materien auch liegen mögen, keineswegs so verschieden, als es beim Anblick der gewaltigen Gegensätze, wie sie zum Beispiel ein historisches und ein physikalisches Problem bietet, zunächst erscheinen möchte. Zum mindesten wäre es ganz verkehrt, einen grundsätzlichen Unterschied etwa darin zu suchen, daß auf dem Gebiete der Naturwissenschaft die Gesetzlichkeit allenthalben eine absolute, der Ablauf der Erscheinungen ein notwendiger sei, der keinerlei Ausnahmen gestattet, während auf geistigem Gebiete die Verfolgung des kausalen Zusammenhanges streckenweise immer auch durch etwas Willkür und Zufall hindurchführe. Denn einerseits ist für jegliches wissenschaftliche Denken, auch auf den höchsten Höhen des menschlichen Geistes, die Annahme einer in tiefstem Grunde ruhenden absoluten, über Willkür und Zufall erhabenen Gesetzlichkeit unentbehrliche Voraussetzung, und auf der anderen Seite findet sich auch die exakteste der Naturwissenschaften, die Physik, sehr häufig veranlaßt, mit Vorgängen zu operieren, deren gesetzlicher Zusammenhang einstweilen noch völlig im Dunkeln bleibt, und die daher im wohlverstandenen Sinne des Wortes unbedenklich als zufällige bezeichnet werden können.

Betrachten wir nur einmal als speziell herausgegriffenes Beispiel das Verhalten radioaktiver Atome nach der nun wohl allseitig anerkannten Zerfallshypothese von Rutherford und Soddy. Wie kommt ein bestimmtes Uran-Atom dazu, nachdem es ungezählte Millionen von Jahren sich inmitten

seiner Umgebung vollständig unveränderlich und passiv verhalten hat, plötzlich innerhalb einer unmeßbar kurzen Zeit ohne jede feststellbare Veranlassung seinem Namen Schande zu machen und mit einer Gewalt zu explodieren, gegen welche unsere brisantesten Sprengstoffe sich wie Kinderpistolen ausnehmen, indem es seine Bruchstücke zum Teil mit Geschwindigkeiten von Tausenden von Kilometern in der Sekunde fortschleudert und zugleich elektromagnetische Strahlung von einer Feinheit aussendet, welche die der härtesten Röntgenstrahlen noch um ein Bedeutendes übertrifft, während dagegen ein unmittelbar benachbartes, allem Anschein nach vollkommen gleichartiges Atom noch weitere Millionen von Jahren in gleicher Passivität verharrt, bis endlich auch ihm die Schicksalsstunde schlägt? Fürwahr: hier auch nur mit einer Vermutung hinsichtlich des kausal bestimmenden dynamischen Gesetzes einzugreifen, erscheint zur Zeit um so hoffnungsloser, als bisher alle Versuche, durch Anwendung äußerer Mittel, zum Beispiel Erhöhung oder Erniedrigung der Temperatur, einen Einfluß auf den Verlauf der radioaktiven Erscheinungen zu gewinnen, völlig ergebnislos verlaufen sind. Und doch ist die genannte Atomzerfallshypothese für die physikalische Forschung von der allergrößten Bedeutung, sie hat in die anfangs schier verwirrende Menge von Einzeltatsachen mit einem Schlage Zusammenhang gebracht und hat eine Anzahl neuer Folgerungen gezeitigt, die zum Teil durch die Erfahrung in glänzender Weise bestätigt wurden, zum Teil zu neuen wichtigen Forschungen und Entdeckungen anregten.

Wie ist nun so etwas möglich? Wie kann man überhaupt aus der Betrachtung von Vorgängen, deren Verlauf im ganzen wie im einzelnen vorläufig noch vollständig dem blinden Zufall überlassen bleibt, wirkliche Gesetze ableiten? — Auch die Physik hat, wie schon lange vorher die sozialen Wissenschaften, die hohe Bedeutung einer von der rein kausalen gänzlich verschiedenen Betrachtungsweise kennengelernt und hat dieselbe seit etwa der Mitte des vorigen Jahrhunderts mit immer steigendem Erfolge angewendet; es ist dies die statistische Methode, mit deren Ausbildung die ganze neuere Entwicklung der theoretischen Physik aufs engste zusammen-



hängt. Statt den zur Zeit noch völlig im Dunkeln liegenden dynamischen Gesetzen eines Einzelvorganges ohne eine Aussicht auf greifbaren Erfolg nachzuforschen, werden zunächst einmal nur die an einer großen Zahl von Einzelvorgängen einer bestimmten Art gemachten Beobachtungen zusammengestellt und aus ihnen Durchschnitts- oder Mittelwerte gebildet. Für diese Mittelwerte ergeben sich dann je nach den besonderen Umständen des Falles gewisse erfahrungsmäßige Regeln, und die so gewonnenen Regeln gestatten, allerdings niemals mit absoluter Sicherheit, aber doch mit einer Wahrscheinlichkeit, die sehr häufig der Gewißheit praktisch gleichkommt, den Ablauf auch zukünftiger Vorgänge im voraus anzugeben, zwar nicht in allen Einzelheiten, wohl aber — und darauf kommt es bei den Anwendungen oft gerade am meisten an — in ihrem durchschnittlichen Verlauf.

Mag auch dem wissenschaftlichen Bedürfnis manches Forschers, den es vor allem nach Aufklärung des Kausalzusammenhanges verlangt, ein solches im Grunde provisorisches Verfahren unbefriedigend und unsympathisch erscheinen, für die praktische Physik ist dasselbe nun einmal tatsächlich unentbehrlich geworden. Ein Verzicht darauf würde einen Strich durch die wichtigsten neueren Errungenschaften der physikalischen Wissenschaft bedeuten. Übrigens ist zu bedenken, daß man in der Physik, genau genommen, nirgends mit absolut bestimmten Größen rechnet; denn eine jede durch physikalische Messungen gewonnene Zahl ist mit einem gewissen möglichen Fehler behaftet. Wer also nur wirklich bestimmte Zahlen, nicht zugleich auch einen Fehlerbereich zulassen wollte, müßte auf die Verwertung von Messungen und konsequenterweise auf induktive Erkenntnis überhaupt Verzicht leisten.

Immerhin erhellt aus der geschilderten Sachlage wohl hinreichend deutlich die überaus hohe Bedeutung, welche die Durchführung einer sorgfältigen und grundsätzlichen Trennung der beiden besprochenen Arten von Gesetzmäßigkeit: der dynamischen, streng kausalen, und der lediglich statistischen, für das Verständnis des eigentlichen Wesens jeglicher naturwissenschaftlichen Erkenntnis besitzt; es sei

mir daher gestattet, diesem Gegenstande und diesem Gegensatze heute einige Ausführungen zu widmen.

Am besten werden wir an ein paar Erscheinungen aus dem alltäglichen Leben anknüpfen. Nehmen wir zwei offene Glasröhren, vertikal aufgestellt und mit ihren unteren Enden durch einen Kautschukschlauch verbunden, und gießen wir von oben in die eine Röhre eine gewisse Menge einer schweren Flüssigkeit, etwa Quecksilber, so wird die Flüssigkeit durch den Verbindungsschlauch auch in die andere Röhre einströmen, und zwar so lange, bis die Flüssigkeitsoberflächen in beiden Röhren gleich hoch sind. Dieser Zustand des Gleichgewichts stellt sich bei jeder Störung immer wieder ein. Wenn wir zum Beispiel die eine Röhre schnell heben, so daß das Quecksilber für einen Augenblick mit emporgerissen wird und infolgedessen in der gehobenen Röhre höher steht, so wird es sich sogleich wieder senken, bis die Niveauhöhen auf beiden Seiten sich wieder ausgeglichen haben. Dies ist das bekannte elementare Gesetz der kommunizierenden Röhren, auf welchem jegliche Heberwirkung beruht.

Nun denken wir uns einen anderen Vorgang. Wir nehmen ein Stück Eisen, das in einem geheizten Ofen auf eine hohe Temperatur erwärmt ist, und werfen es in ein Gefäß mit kaltem Wasser. Die Wärme des Eisens wird sich der des Wassers mitteilen, und zwar so lange, bis vollkommene Gleichheit der Temperaturen erreicht ist. Dann ist, wie man sagt, der thermische Gleichgewichtszustand eingetreten, der sich bei jeder Störung stets wieder herstellen wird.

Offenbar zeigen die beiden beschriebenen Erscheinungen eine gewisse Analogie. In beiden Fällen ist für den Eintritt einer Veränderung maßgebend eine gewisse Differenz, das eine Mal eine Differenz der Niveauhöhen, das andere Mal eine Differenz der Temperaturen, und Gleichgewicht besteht nur dann, wenn die Differenz verschwindet. Man bezeichnet daher manchmal auch die Temperatur geradezu als das Wärmeniveau und kann dann sagen, daß im ersten Fall die Energie der Gravitation, im zweiten Fall die Energie der Wärme in der Richtung von höherem zu tieferem Niveau wandert, bis die Niveaus sich ausgeglichen haben.



Kein Wunder, daß diese Analogie von einer auf die höchsten Ziele eingestellten, aber zu vorschnellen Verallgemeinerungen neigenden Richtung der Energetik ohne weiteres als der Ausfluß eines gemeinsamen großen „Prinzips des Geschehens" erklärt wurde, welches jedwede Veränderung in der Natur auf Energieaustausch zurückführen will und die verschiedenen Energieformen als selbständig und gleichwertig nebeneinanderstehend behandelt. Jeder Energieform soll ein besonderer Intensitätsfaktor entsprechen, der Gravitation die Höhe, der Wärme die Temperatur, und die Differenz der Intensitätsfaktoren soll den Verlauf des Geschehens bestimmen. Der Anschaulichkeit dieses Satzes entspricht die Zuversicht, mit der seine allgemeine Gültigkeit verkündet wurde, und es konnte nicht fehlen, daß derselbe schnell in populäre Darstellungen und sogar in elementare Lehrbücher überging.

In Wirklichkeit ist die Analogie zwischen den beiden geschilderten Erscheinungen nur eine ganz oberflächliche, und die Gesetze, nach denen sie verlaufen, durch eine tiefe Kluft voneinander geschieden. Denn, wie die Gesamtheit aller heute vorliegenden Erfahrungen mit voller Bestimmtheit zu behaupten gestattet, gehorcht die erste Erscheinung einem dynamischen, die zweite aber einem statistischen Gesetz, oder mit anderen Worten: Daß die Flüssigkeit von höherem auf tieferes Niveau sinkt, ist notwendig, daß aber die Wärme von höherer zu tieferer Temperatur übergeht, ist nur wahrscheinlich.

Es versteht sich, daß eine derartige im ersten Augenblick höchst fremdartig, ja fast paradox anmutende Behauptung durch eine erdrückende Fülle von Belegen gestützt sein muß; ich werde mich bemühen, die wichtigsten derselben hier anzudeuten und damit zugleich meiner Aufgabe einer Schilderung des Gegensatzes zwischen dynamischer und statistischer Gesetzmäßigkeit gerecht zu werden. Was zunächst die Notwendigkeit des Herabsinkens der schweren Flüssigkeit betrifft, so läßt sich dieselbe leicht als eine Folge des Prinzips der Erhaltung der Energie erweisen. Denn wenn die auf dem höheren Niveau befindliche Flüssigkeit ohne besonderen äußeren Antrieb noch weiter in die Höhe stiege, die auf dem

tieferen Niveau befindliche noch weiter herabsinken würde, so läge damit eine Schöpfung von Energie aus dem Nichts vor, im Widerspruch zu dem genannten Prinzip. Bei der zweiten Erscheinung liegt die Sache schon anders. Hier könnte sehr wohl ein Übergang von Wärme aus dem kalten Wasser in das heiße Eisen eintreten, ohne daß das Prinzip der Erhaltung der Energie verletzt wird; denn da die Wärme selber eine Form der Energie ist, so würde dieses Prinzip nur verlangen, daß die Menge der vom Wasser abgegebenen Wärme ebenso groß ist wie die der von dem Eisen aufgenommenen Wärme.

Aber auch sonst zeigen die beiden Erscheinungen in ihrem Verlauf schon dem unbefangenen Beobachter gewisse charakteristische Verschiedenheiten. Die von dem höheren Niveau herabsinkende Flüssigkeit bewegt sich um so schneller, je tiefer sie sinkt; wenn der Gleichstand der Niveauhöhen erreicht ist, wird die Flüssigkeit nicht stehenbleiben, sondern sich infolge ihrer Trägheit über die Gleichgewichtslage hinaus bewegen, so daß nun die ursprünglich höhere Flüssigkeit tiefer zu stehen kommt; dabei wird die Geschwindigkeit wieder abnehmen und die Flüssigkeit allmählich zum Stillstand kommen; und hierauf wird sich das Spiel in gerade umgekehrter Richtung wiederholen. Könnte jeglicher Verlust von Bewegungsenergie, namentlich an die angrenzende Luft und an die Röhrenwandung durch Reibung, vermieden werden, so würde die Flüssigkeit bis in alle Ewigkeit um ihre Gleichgewichtslage hin und her pendeln. Ein solcher Prozeß wird daher auch als reversibel bezeichnet.

Ganz anders bei der Wärme. Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Eisen und Wasser wird, um so langsamer erfolgt der Wärmeübergang von dem Eisen zum Wasser, und wenn man fragt, wie lange es dauert, bis die Gleichheit der Temperaturen erreicht ist, so ergibt die Rechnung, daß dazu eine unendlich lange Zeit gehören würde, oder mit anderen Worten: Es wird stets eine kleine Temperaturdifferenz noch übrigbleiben, mag man auch noch solange zuwarten. Von einem Hin- und Herpendeln der Wärme zwischen den beiden Körpern ist also gar keine Rede, der Wärmeübergang erfolgt



vielmehr immer nur einseitig und stellt daher einen irreversiblen Prozeß dar.

Es gibt in der Gesamtheit der physikalischen Erscheinungen keinen tiefer ausgeprägten Gegensatz als den zwischen reversiblen und irreversiblen Prozessen. Zu den ersteren gehören die Gravitationserscheinungen, die mechanischen und elektrischen Schwingungen, die akustischen und elektromagnetischen Wellen. Sie alle lassen sich unschwer einem einzigen dynamischen Gesetz unterordnen: dem Prinzip der kleinsten Wirkung, welches das Prinzip der Erhaltung der Energie zugleich mitenthält. Zu den irreversiblen Prozessen gehören die Wärmeleitung, die elektrische Leitung, die Reibung, die Diffusion, sowie sämtliche chemische Reaktionen, sofern sie überhaupt mit merklicher Geschwindigkeit verlaufen. Für diese hat R. Clausius seinen für die Physik und Chemie so ungemein fruchtbaren zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie abgeleitet, dessen Bedeutung darauf beruht, daß er einem jeden irreversiblen Prozeß seine Richtung vorschreibt. Aber erst L. Boltzmann war es vorbehalten, den Inhalt des zweiten Hauptsatzes und damit die Gesamtheit der irreversiblen Prozesse, deren Eigentümlichkeiten einer gemeinsamen dynamischen Erklärung unüberwindliche Schwierigkeiten bereiteten, durch die Einführung der atomistischen Betrachtungsweise auf seine eigentliche Wurzel zurückzuführen.

Nach der atomistischen Hypothese ist die Wärmeenergie eines Körpers nichts anderes als die Gesamtheit der äußerst feinen schnellen unregelmäßigen Bewegungen seiner einzelnen Moleküle, die Höhe seiner Temperatur entspricht der mittleren lebendigen Kraft der Moleküle, und der Wärmeübergang von einem heißen zu einem kälteren Körper beruht darauf, daß die lebendigen Kräfte der beiderseitigen Moleküle bei den durch die Berührung der Körper bedingten häufigen Zusammenstößen sich gegenseitig im Mittel ausgleichen. Das ist aber nicht so zu verstehen, als ob bei jedem einzelnen Zusammenstoß zweier Moleküle dasjenige mit größerer lebendiger Kraft an Geschwindigkeit einbüßt, dasjenige mit geringerer lebendiger Kraft dagegen beschleunigt wird; denn wenn zum Beispiel ein schnell bewegtes Molekül von der

Seite her, quer gegen seine Bewegungsrichtung, von einem langsamer bewegten Molekül getroffen wird, muß seine Geschwindigkeit noch weiter wachsen, während die des langsameren Moleküls sich noch weiter vermindert. Aber im großen und ganzen wird doch nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit, falls nicht ganz exzeptionelle Verhältnisse vorliegen, eine gewisse Vermischung der lebendigen Kräfte eintreten, und dies entspricht einem Ausgleich der Temperaturen der beiden Körper. Alle aus dieser Anschauung heraus entwickelten Folgerungen, die besonders für gasförmige Körper schon ziemlich ins einzelne gehen, haben sich als verträglich mit der Erfahrung erwiesen.

Allein so vielversprechend und aussichtsvoll diese atomistische Betrachtungsweise auch erscheinen mag, sie wurde bis vor kurzem doch vielfach im Grunde nur als eine geistvolle Hypothese bewertet, da manchem vorsichtigen Forscher der gewaltige Sprung aus dem sichtbaren, direkt kontrollierbaren, in das unsichtbare Gebiet, aus dem Makrokosmos in den Mikrokosmos, doch allzu gewagt dünkte. Selbst Boltzmann vermied es offensichtlich, die Tragweite seiner Anschauungen und Berechnungen durch allzu kühnes Vorstürmen zu gefährden, er legte Wert darauf, die atomistische Hypothese als ein bloßes Bild der Wirklichkeit zu bezeichnen. Heute dürfen wir weitergehen, insoweit es überhaupt einen Sinn hat, vom Standpunkt der Erkenntnistheorie aus, einem Bilde die Wirklichkeit entgegenzusetzen. Denn wir kennen jetzt eine Reihe von Erfahrungen, welche der atomistischen Hypothese den nämlichen Grad von Sicherheit verleihen, wie ihn etwa die mechanische Theorie der Akustik oder die elektromagnetische Theorie der Licht- und Wärmestrahlung besitzt.

Nach dem oben von mir als unzulänglich bezeichneten energetischen Prinzip alles Geschehens müßte der Zustand einer ruhenden Flüssigkeit von gleichmäßiger Temperatur ein absolut unveränderlicher sein; denn wenn nirgendwo Intensitätsdifferenzen vorhanden sind, fehlt auch jede Ursache zum Eintritt einer Veränderung. Nun kann man aber die Verhältnisse in einer Flüssigkeit sichtbar machen dadurch, daß man in eine durchsichtige Flüssigkeit, zum Beispiel



Wasser, zahlreiche sehr kleine Staubteilchen oder auch Tröpfchen einer anderen Flüssigkeit, zum Beispiel von Mastix oder Gummigutt, hineinbringt. Ich glaube, niemand, der einmal durch ein Mikroskop in guter Beleuchtung ein derartiges Präparat beobachtet hat, wird den ersten Eindruck des ihm sich darbietenden Schauspiels vergessen. Es ist der Einblick in eine neue Welt. Statt der erwarteten Kirchhofruhe bemerkt er einen äußerst lebhaften, munteren Tanz der kleinen suspendierten Teilchen, wobei gerade die kleinsten sich am tollsten gebärden; von irgendeinem Reibungswiderstand der Flüssigkeit ist keine Spur zu bemerken; wenn einmal ein Teilchen stillstehen bleibt, fängt dafür wieder ein anderes an, sich zu bewegen. Man wird unwillkürlich an das aufgeregte Treiben in einem Ameisenhaufen erinnert, welchen man mit einem Stock berührt hat. Aber während die gereizten Tierchen sich allmählich wieder beruhigen und bei eintretender Dunkelheit ihre Beweglichkeit verlieren, zeigen die unter dem Mikroskop befindlichen Teilchen, solange nur die Temperatur der Flüssigkeit nicht verändert wird, niemals auch nur die mindesten Anzeichen einer Ermüdung — ein wirkliches Perpetuum mobile, im wörtlichsten Sinne dieses auch in mannigfachen anderen Bedeutungen gebrauchten Ausdrucks.

Das beschriebene, im Jahre 1827 von dem englischen Botaniker Brown entdeckte Phänomen wurde zwar schon vor 25 Jahren von dem französischen Physiker Gouy auf die Wärmebewegungen der Flüssigkeitsmoleküle zurückgeführt, welche, selber unsichtbar, an die zwischen ihnen herumschwimmenden mikroskopisch sichtbaren Teilchen fortwährend anstoßen und sie dadurch in unregelmäßige Bewegung versetzen; aber der endgültige Beweis für die Richtigkeit dieser Auffassung wurde erst in neuester Zeit erbracht, indem die von Einstein und Smoluchowski theoretisch abgeleiteten statistischen Gesetze über die Verteilungsdichte, die Geschwindigkeiten, die zurückgelegten Wege, ja sogar die Drehungen der mikroskopischen Teilchen in allen Einzelheiten ihre glänzende quantitative Bestätigung fanden, namentlich durch die experimentellen Arbeiten von Jean Perrin, den die philosophische Fakultät unserer Universität bei ihrer

Jahrhundertfeier als Zeichen ihrer Anerkennung dafür mit dem Doktorhut geschmückt hat.

Es bleibt sonach für den Physiker, der nun einmal an die induktive Beweisführung gebunden ist, kein Zweifel: Die Materie ist atomistisch konstituiert, die Wärme ist Bewegung der Moleküle, und die Wärmeleitung, wie alle übrigen irreversiblen Vorgänge, gehorcht nicht dynamischen, sondern statistischen, das heißt Wahrscheinlichkeitsgesetzen. Freilich ist es schwer, sich auch nur eine annähernde Vorstellung zu machen von dem winzigen Grad der Wahrscheinlichkeit, die dafür besteht, daß einmal für einen Augenblick die Wärme in umgekehrter Richtung, vom kalten Wasser zum heißen Eisen, übergeht. Wenn jemand in einen mit zahlreichen verschiedenen Buchstaben angefüllten Sack blindlings hineingreift, einen Buchstaben nach dem anderen hervorzieht und die Buchstaben in der Reihenfolge, wie sie gezogen sind, nebeneinanderlegt, so wird man immerhin die Möglichkeit zugeben müssen, daß dabei vernünftige Worte herauskommen können, vielleicht sogar ein Gedicht von Goethe. Oder wenn jemand mit einem gewöhnlichen Würfel hundert Würfe hintereinander macht, so wird niemand die Möglichkeit bestreiten können, daß bei allen Würfen ohne Ausnahme jedesmal sechs geworfen wird, da doch das Ergebnis jedes Wurfes unabhängig ist von dem der vorherigen Würfe. Aber wenn in Wirklichkeit einmal so etwas passieren sollte, so würde jedermann doch ohne weiteres sagen: es geht nicht mit rechten Dingen zu, der Würfel ist vielleicht nicht vollkommen symmetrisch, und kein Verständiger würde sich dem Gewicht dieser Behauptung entziehen. Denn die Wahrscheinlichkeit, daß unter normalen Umständen ein derartiger Ausnahmefall eintritt, ist doch gar zu gering. Und dennoch ist sie immer noch ganz ungeheuer groß gegenüber der Wahrscheinlichkeit, daß einmal Wärme aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergeht. Man bedenke nur, daß es sich bei dem Würfel nur um sechs Zahlen, also um sechs verschiedene Fälle, bei den Buchstaben um 25, bei den Molekülen dagegen um viele Millionen in den kleinsten noch sichtbaren Raumteilen handelt, die mit den verschiedensten Geschwindigkeiten behaftet sind. Also vom Standpunkt der praktischen Physik



aus ist gewiß kein Grund zu Bedenken vorhanden wegen der Möglichkeit einer Abweichung von der Allgemeingültigkeit der Gesetze der Wärmeleitung.

Anders steht es allerdings mit der Theorie. Denn es muß jedem einleuchten, daß eine wenn auch noch so kleine Wahrscheinlichkeit von der absoluten Unmöglichkeit durch eine abgrundtiefe Kluft getrennt ist; ja diese Kluft macht sich unter besonderen Umständen wirklich geltend. Man braucht nur hinreichend oft zu würfeln, um schließlich, sogar mit großer Wahrscheinlichkeit, auch auf hundert Sechser hintereinander rechnen zu können, oder man braucht das Buchstabenspiel nur mit hinlänglicher Ausdauer zu wiederholen, um schließlich auch den Faustmonolog herauszubekommen. Immerhin ist es gut, daß wir nicht auf diese Methode des Dichtens allein angewiesen sind; denn um auf einen solchen Erfolg rechnen zu können, würde weder das Lebensalter eines Menschen noch wahrscheinlich das des Menschengeschlechts überhaupt ausreichen.

Was aber die Anwendung auf die Physik betrifft, so sind derartige minimale Wahrscheinlichkeiten unter Umständen doch sehr ernsthaft zu nehmen. Wenn ein Pulvermagazin eines schönen Tages in die Luft fliegt, ohne daß man irgendeinen äußeren Anlaß der Explosion ausfindig machen kann, so wird ein solches Ereignis gewiß nicht ignoriert werden, und doch ist die sogenannte Selbstzündung eben auch anzusehen als bedingt durch eine oft an sich sehr unwahrscheinliche Häufung von verhängnisvollen Zusammenstößen chemisch reagierender Moleküle, deren Gesetze nur auf statistischem Wege erschlossen werden können. Man sieht, wie vorsichtig man auch in der exakten Wissenschaft mit den Wörtchen „gewiß“ und „sicherlich“ umgehen muß und wie bescheiden oft die Tragweite von Erfahrungsgesetzen einzuschätzen ist.

So werden wir durch Theorie und Erfahrung gleichmäßig genötigt, in allen Gesetzmäßigkeiten der Physik einen fundamentalen Unterschied zu machen zwischen Notwendigkeit und Wahrscheinlichkeit, und bei jeder beobachteten Gesetzmäßigkeit zuallererst zu fragen, ob sie dynamischer oder ob sie statistischer Art ist. Dieser Dualismus, der mit der Ein-

führung der statistischen Betrachtungsweise unvermeidlich in alle physikalischen Gesetzmäßigkeiten hineingetragen worden ist, will manchem unbefriedigend erscheinen, und man hat daher schon den Versuch gemacht, ihn, wenn es nun doch nicht anders geht, dadurch zu beseitigen, daß man die absolute Gewißheit bzw. Unmöglichkeit überhaupt leugnet und nur noch größere oder geringere Grade von Wahrscheinlichkeit zuläßt. Danach gäbe es in der Natur gar keine dynamischen Gesetze mehr, sondern nur noch statistische; der Begriff einer absoluten Notwendigkeit wäre in der Physik überhaupt aufgehoben. Eine solche Auffassung dürfte sich aber sehr bald als ein ebenso verhängnisvoller wie kurzsichtiger Irrtum herausstellen, selbst wenn wir ganz davon absehen wollen, daß alle reversiblen Prozesse ohne Ausnahme durch dynamische Gesetze geregelt werden und daß gar kein Grund vorliegt, diese Gesetze fallen zu lassen. Denn sowenig wie irgendeine andere Wissenschaft der Natur oder des menschlichen Geistes kann die Physik der Voraussetzung einer absoluten Gesetzmäßigkeit entbehren, ja gerade den Schlußfolgerungen der Statistik, von denen hier die Rede ist, wäre ohne sie die wesentlichste Grundlage entzogen.

Man bedenke doch, daß auch die Sätze der Wahrscheinlichkeitsrechnung einer exakten Formulierung und einer strengen Beweisführung nicht nur fähig, sondern auch bedürftig sind, weshalb sie auch von jeher in besonders hohem Maße das Interesse hervorragender Mathematiker gefesselt haben. Wenn die Wahrscheinlichkeit dafür, daß auf ein bestimmtes Ereignis ein anderes bestimmtes Ereignis folgt, gleich $^1/_2$ ist, so heißt das nicht etwa, daß man über das Eintreten des zweiten Ereignisses überhaupt nichts weiß, sondern es wird damit positiv behauptet, daß unter allen Fällen, in denen das erste Ereignis eintritt, gerade 50 Prozent das zweite Ereignis herbeiführen, und daß dieses Prozentualverhältnis um so genauer herauskommt, je zahlreichere Fälle der Betrachtung zugrunde gelegt werden. Ja auch über die bei einer geringeren Anzahl von beobachteten Fällen zu erwartende Abweichung von dem Mittelwerte, über die sogenannte Dispersion, gibt die Wahrscheinlichkeitsrechnung genau Auskunft, und wenn einmal die gemachten Beobachtungen einen



Widerspruch mit der vorher berechneten Größe der Dispersion ergeben, so kann man mit Sicherheit daraus schließen, daß in den Grundlagen der Berechnung eine unrichtige Annahme, ein sogenannter systematischer Fehler steckt.

Um solch weitgehende Behauptungen aufstellen zu können, sind naturgemäß auch sehr weitgehende Voraussetzungen notwendig, und so wird es sich verstehen lassen, daß in der Physik die exakte Berechnung von Wahrscheinlichkeiten nur dann möglich ist, wenn für die elementarsten Wirkungen, also im allerfeinsten Mikrokosmos, lediglich dynamische Gesetze als gültig angenommen werden dürfen. Entziehen sich diese auch einzeln der Beobachtung durch unsere groben Sinne, so liefert doch die Voraussetzung ihrer absoluten Unabänderlichkeit die unumgänglich notwendige feste Grundlage für den Aufbau der Statistik.

Nach diesen Darlegungen erscheint also der Dualismus zwischen statistischer und dynamischer Gesetzmäßigkeit aufs engste verknüpft mit dem Dualismus zwischen Makrokosmos und Mikrokosmos, den wir als eine experimentell erhärtete Tatsache hinnehmen müssen. Tatsachen lassen sich nun aber einmal nicht durch Theorien aus der Welt schaffen, mag man dies nun unbefriedigend finden oder nicht, und so wird nichts übrigbleiben, als sowohl den dynamischen wie auch den statistischen Gesetzen die ihnen gebührende Stelle in dem gesamten System der physikalischen Theorien einzuräumen.

Dabei dürfen freilich Dynamik und Statistik nicht etwa als koordiniert nebeneinanderstehend aufgefaßt werden. Denn während ein dynamisches Gesetz dem Kausalbedürfnis vollständig genügt und daher einen einfachen Charakter trägt, stellt jedes statistische Gesetz ein Zusammengesetztes vor, bei dem man niemals definitiv stehenbleiben kann, da es stets noch das Problem der Zurückführung auf seine einfachen dynamischen Elemente in sich birgt. Die Lösung derartiger Probleme bildet eine der Hauptaufgaben der fortschreitenden Wissenschaft; an ihnen arbeitet die Chemie in gleicher Weise wie die physikalischen Theorien der Materie und der Elektrizität. Auch die Meteorologie darf in diesem Zusammenhang erwähnt werden; denn in den Bestrebungen von V. Bjerknes sehen wir einen groß angelegten Plan, alle meteorologische

Statistik auf ihre einfachen Elemente, nämlich auf physikalische Gesetzmäßigkeiten, zurückzuführen. Mag der Versuch praktischen Erfolg haben oder nicht, gemacht muß er einmal werden, schon weil es im Wesen jeglicher Statistik liegt, daß sie wohl oft das erste, aber niemals das letzte Wort zu sprechen hat.

Wie unter den dynamischen Gesetzen das Prinzip der Erhaltung der Energie oder der erste Hauptsatz der Wärmetheorie, so steht unter den statistischen Gesetzen der Physik der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie in vorderster Reihe. Auch dieser Satz ist, obwohl er ein Wahrscheinlichkeitssatz ist und obwohl man infolgedessen oft von den Grenzen seiner Gültigkeit spricht, sehr wohl einer exakten allgemeingültigen Formulierung fähig. Eine solche läßt sich etwa folgendermaßen aussprechen. Alle physikalischen und chemischen Zustandsänderungen verlaufen im Mittel so, daß sie die Wahrscheinlichkeit des Zustands vergrößern. Nun ist unter allen Zuständen, die ein System von Körpern annehmen kann, der wahrscheinlichste Zustand dadurch ausgezeichnet, daß alle Körper die nämliche Temperatur besitzen; aus diesem und keinem anderen Grunde erfolgt die Wärmeleitung im Mittel stets im Sinne eines Ausgleichs der Temperaturen, also in der Richtung von höherer zu tieferer Temperatur. Über einen einzelnen Vorgang vermag aber der zweite Hauptsatz stets nur dann etwas mit Bestimmtheit auszusagen, wenn man von vornherein sicher ist, daß der Verlauf des speziellen Vorgangs nicht merklich abweicht von dem mittleren Verlauf einer großen Anzahl von Vorgängen, die alle von dem nämlichen Anfangszustand ihren Ausgang nehmen. Um die Erfüllung dieser Bedingung zu sichern, genügt theoretisch die Einführung der sogenannten Hypothese der elementaren Unordnung. Experimentell gibt es kein anderes Mittel, als den betreffenden Versuch öfters hintereinander zu wiederholen, oder auch ihn durch verschiedene Beobachter, die unabhängig voneinander arbeiten, reproduzieren zu lassen. Eine derartige Wiederholung eines bestimmten Versuches, oder die Anstellung einer ganzen Versuchsreihe, ist ja auch tatsächlich das Verfahren, das in der praktischen Physik allgemein angewendet wird. Denn



kein Physiker wird sich bei seinen Messungen jemals auf einen einzigen Versuch beschränken, schon wegen der Elimination der unvermeidlichen Versuchsfehler.

Mit der Energie hat aber der zweite Wärmesatz direkt gar nichts zu tun. Ein gutes Beispiel für einen Vorgang, der überhaupt nicht von Energieumwandlungen begleitet zu sein braucht, bietet die Diffusion, die lediglich deshalb erfolgt, weil eine gleichmäßige Mischung zweier verschiedener Substanzen wahrscheinlicher ist als eine ungleichmäßige. Man kann zwar auch die Diffusion der Energetik unterordnen, indem man für diesen besonderen Zweck den besonderen Begriff der freien Energie einführt, der eine bequeme Formulierung zuläßt und für viele Fälle auch die Anschauung erleichtert, aber dies Verfahren ist doch insofern ein indirektes, als die freie Energie sich ihrerseits im Grunde nur durch ihre Beziehungen zur Wahrscheinlichkeit verstehen läßt.

Verweilen wir nach diesen flüchtigen Ausblicken zum Schluß noch bei den Gesetzmäßigkeiten in den Vorgängen des geistigen Lebens, so finden wir hier zum Teil ganz ähnliche Verhältnisse, nur daß die strenge Kausalität hinter der Wahrscheinlichkeit, der Mikrokosmos hinter dem Makrokosmos, vollkommen zurücktritt. Aber dennoch ist auch hier auf allen Gebieten, bis hinauf zu den höchsten Problemen des menschlichen Willens und der Moral, die Annahme eines absoluten Determinismus für jede wissenschaftliche Untersuchung die unentbehrliche Grundlage. Freilich ist dabei eine Vorsicht geboten, die zwar auch in der Naturwissenschaft gilt, aber dort wegen ihrer Selbstverständlichkeit gewöhnlich nicht besonders hervorgehoben wird: die nämlich, daß der zu untersuchende Vorgang durch die Untersuchung selber in seinem Verlauf nicht gestört wird. Wenn ein Physiker die Temperatur eines Körpers messen will, so darf er dazu kein Thermometer verwenden, durch dessen Anbringung die Temperatur des Körpers verändert wird. Aus diesem Grunde erstreckt sich die Möglichkeit einer vollständig objektiven wissenschaftlichen Untersuchung geistiger Vorgänge prinzipiell genommen nur auf die Beurteilung fremder Persönlichkeiten, soweit sie von der eigenen Person unabhängig sind,

für die eigene Person auch noch auf die Vergangenheit, insofern dieselbe fertig abgeschlossen vor dem inneren Auge des Denkers liegt, nicht aber auf die eigene Gegenwart und nicht auf die eigene Zukunft, zu welcher der Weg immer nur durch die Gegenwart hindurchführt. Denn das Denken und Forschen selber gehört auch mit zu den geistigen Vorgängen im Menschen, und wenn das Objekt der Untersuchung mit dem denkenden Subjekt identisch wird, so verändert es sich fortwährend in dem Maße, wie die Erkenntnis fortschreitet.

Es ist daher auch von vornherein völlig aussichtslos, vom Standpunkt des Determinismus aus die Vorgänge der eigenen Zukunft erschöpfend behandeln und damit zugleich den Begriff der sittlichen Freiheit erledigen zu wollen. Wer die uns durch das Bewußtsein gegebene freie, durch keinerlei Kausalgesetz eingeschränkte Selbstbestimmung für logisch unvereinbar hält mit dem absoluten Determinismus auf allen Gebieten des geistigen Lebens, der begeht einen prinzipiellen Fehler von ähnlicher Art wie der obenerwähnte Physiker, wenn er die bemerkte Vorsicht nicht beachtet, oder wie ihn ein Physiologe begehen würde, wenn er sich einbildete, die natürlichen Funktionen eines Muskels an dem anatomischen Präparat desselben studieren zu können.

So setzt sich die Wissenschaft selber ihre eigene unübersteigliche Grenze. Aber der Mensch in seinem unablässigen Drange kann sich mit dieser Grenze nicht begnügen, er will und muß über sie hinausdringen, da er eine Antwort braucht auf die wichtigste, unaufhörlich wiederkehrende Frage seines Lebens: Wie soll ich handeln? — Und eine volle Antwort auf diese Frage findet er nicht beim Determinismus, nicht bei der Kausalität, überhaupt nicht bei der reinen Wissenschaft, sondern er findet sie nur bei seiner sittlichen Gesinnung, bei seinem Charakter, bei seiner Weltanschauung.

Gewissenhaftigkeit und Treue, das sind die Führer, die ihm wie in der Wissenschaft, so auch weit darüber hinaus den rechten Lebensweg weisen, die ihm keineswegs glänzende Augenblickserfolge, wohl aber die höchsten Güter des menschlichen Geistes, nämlich den inneren Frieden und die wahre Freiheit gewährleisten. Sie stellen auch das unzerreißbare



Band dar, welches unsere Universität nun schon länger als ein Jahrhundert hindurch mit dem Andenken an ihren Königlichen Stifter verbindet. Möge sich dieses Band auch fernerhin als wirksam erweisen, möge unter solcher Führung seine Schöpfung, unsere geliebte alma mater, auch während der folgenden Jahrhunderte durch alle inneren und äußeren Stürme hindurch blühen, wachsen und gedeihen!

# Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie.

(Nobel-Vortrag, gehalten vor der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften zu Stockholm am 2. Juni 1920.)

Wenn ich den Sinn der mir am heutigen Tage obliegenden Verpflichtung, einen auf meine Schriften bezugnehmenden öffentlichen Vortrag zu halten, richtig verstehe, so glaube ich dieser Aufgabe, deren Bedeutung mir durch die Dankesschuld gegen den hochherzigen Gründer unserer Stiftung tief eingeprägt wird, nicht besser entsprechen zu können, als indem ich den Versuch mache, Ihnen die Geschichte der Entstehung der Quantentheorie in großen Zügen zu schildern und daran anknüpfend in knappem Rahmen ein Bild von der bisherigen Entwicklung dieser Theorie und ihrer gegenwärtigen Bedeutung für die Physik zu entwerfen.

Blicke ich zurück auf die nun schon zwanzig Jahre zurückliegende Zeit, da sich der Begriff und die Größe des physikalischen Wirkungsquantums zum erstenmal aus dem Kreise der vorliegenden Erfahrungstatsachen herauszuschälen begann, und auf den langen, vielfach verschlungenen Weg, der schließlich zu seiner Enthüllung führte, so will mir heute diese ganze Entwicklung bisweilen vorkommen als eine neue Illustration zu dem altbewährten Goetheschen Wort, daß der Mensch irrt, solange er strebt. Und es möchte die ganze angestrengte Geistesarbeit eines emsig Forschenden im Grunde genommen vergeblich und hoffnungslos erscheinen, wenn er nicht manchmal durch auffallende Tatsachen den unumstößlichen Beweis dafür in die Hand bekäme, daß er am Ende aller seiner Kreuz- und Querfahrten schließlich doch der Wahrheit wenigstens um einen Schritt wirklich endgültig nähergekommen ist. Unumgängliche Voraussetzung, wenn auch noch lange nicht die Gewähr für einen



Erfolg ist freilich die Verfolgung eines bestimmten Zieles, dessen Leuchtkraft auch durch anfängliche Mißerfolge nicht getrübt wird.

Für mich war ein solches Ziel seit langem die Lösung der Frage nach der Energieverteilung im Normalspektrum der strahlenden Wärme. Seitdem Gustav Kirchhoff gezeigt hatte, daß die Beschaffenheit der Wärmestrahlung, die sich in einem von beliebigen emittierenden und absorbierenden, gleichmäßig temperierten Körpern begrenzten Hohlraum ausbildet, völlig unabhängig ist von der Natur der Körper (1) [1]), war die Existenz einer universellen Funktion erwiesen, die nur von der Temperatur und der Wellenlänge, aber von keinerlei besonderen Eigenschaften irgendeiner Substanz abhängt, und die Auffindung dieser merkwürdigen Funktion versprach tiefere Einblicke in den Zusammenhang zwischen Energie und Temperatur, welche ja das erste Problem der Thermodynamik und dadurch auch der ganzen Molekularphysik bildet. Um zu ihr zu gelangen, bot sich kein anderer Weg als der, unter allen verschiedenartigen in der Natur vorkommenden Körpern sich irgendeinen von bekanntem Emissions- und Absorptionsvermögen auszusuchen und die Beschaffenheit der mit ihm im stationären Energieaustausch stehenden Wärmestrahlung zu berechnen. Diese mußte sich dann nach dem Kirchhoffschen Satz als unabhängig von der Beschaffenheit des Körpers ergeben.

Als ein für diesen Zweck besonders geeigneter Körper erschien mir der geradlinige Oszillator von Heinrich Hertz, dessen Emissionsgesetze, bei gegebener Schwingungszahl, Hertz kurz zuvor vollständig entwickelt hatte (2). Wenn in einem rings von spiegelnden Wänden umgebenen Hohlraum sich eine Anzahl solcher Hertzscher Oszillatoren befindet, so werden sie durch Abgabe und Aufnahme elektromagnetischer Wellen, nach Analogie akustischer Tongeber und Resonatoren, miteinander Energie austauschen, und schließlich müßte sich in dem Hohlraum die stationäre, dem Kirchhoffschen Gesetz entsprechende sogenannte schwarze Strahlung einstellen. Ich gab mich damals der uns allerdings heutzutage

[1]) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf die Anmerkungen am Schluß des Aufsatzes.

etwas naiv anmutenden Erwartung hin, die Gesetze der klassischen Elektrodynamik würden, wenn man nur allgemein genug vorginge und sich von zu speziellen Hypothesen fernhielte, hinreichen, um das Wesentliche des zu erwartenden Vorgangs zu erfassen und dadurch zum angestrebten Ziele zu gelangen. Daher entwickelte ich zunächst die Gesetze der Emission und Absorption eines linearen Resonators auf möglichst allgemeiner Grundlage, tatsächlich auf einem Umwege, den ich mir durch Benutzung der damals im Grunde schon fertig vorliegenden Elektronentheorie von H. A. Lorentz hätte ersparen können. Aber da ich der Elektronenhypothese noch nicht ganz traute, so zog ich es vor, die Energie zu betrachten, die durch eine in angemessenem Abstand von dem Resonator um ihn herumgelegte Kugelfläche aus- und einströmt. Dabei kommen nur Vorgänge im reinen Vakuum in Betracht, deren Kenntnis aber genügt, um die nötigen Schlüsse auf die Energieänderungen des Resonators zu ziehen.

Die Frucht dieser längeren Reihe von Untersuchungen, von denen einzelne durch Vergleiche mit vorliegenden Beobachtungen, namentlich den Dämpfungsmessungen von V. Bjerknes, geprüft werden konnten und sich dabei bewährten (3), war die Aufstellung der allgemeinen Beziehung zwischen der Energie eines Resonators von bestimmter Eigenperiode und der Energiestrahlung des entsprechenden Spektralgebiets im umgebenden Felde beim stationären Energieaustausch (4). Es ergab sich dabei das bemerkenswerte Resultat, daß diese Beziehung gar nicht abhängt von der Natur des Resonators, insbesondere auch nicht von seiner Dämpfungskonstante — ein Umstand, der mir deshalb sehr erfreulich und willkommen war, weil sich dadurch das ganze Problem insofern vereinfachen ließ, als statt der Energie der Strahlung die Energie des Resonators gesetzt werden konnte, und dadurch an die Stelle eines verwickelten, aus vielen Freiheitsgraden zusammen gesetzten Systems ein einfaches System von einem einzigen Freiheitsgrad trat.

Freilich bedeutete dies Ergebnis nicht mehr als einen vorbereitenden Schritt für die Inangriffnahme des eigentlichen Problems, das nun in seiner ganzen unheimlichen Höhe sich desto steiler auftürmte. Der erste Versuch zu einer Bewältigung mißlang; denn meine ursprüngliche stille Hoffnung, die von dem Resonator emittierte Strahlung werde sich in irgendeiner charakteristischen Weise von der absorbierten Strahlung unterscheiden und dadurch zu einer Differentialgleichung Anlaß geben, durch deren Integration man zu einer besonderen Bedingung für die Beschaffenheit der stationären Strahlung gelangen könne, erwies sich als trügerisch. Der Resonator reagierte nur auf diejenigen Strahlen, die er auch emittierte, und zeigte sich nicht im mindesten empfindlich gegen benachbarte Spektralgebiete.



Zudem rief meine Unterstellung, der Resonator vermöge eine einseitige, also irreversible Wirkung auf die Energie des umgebenden Strahlungsfeldes auszuüben, den energischen Widerspruch Ludwig Boltzmanns hervor (5), der mit seiner reiferen Erfahrung in diesen Fragen den Nachweis führte, daß nach den Gesetzen der klassischen Dynamik jeder der von mir betrachteten Vorgänge auch in genau entgegengesetzter Richtung verlaufen kann, derart, daß eine einmal vom Resonator emittierte Kugelwelle umgekehrt von außen nach innen fortschreitend in stetig sich verkleinernden konzentrischen Kugelflächen bis auf den Resonator zusammenschrumpft, von ihm wieder absorbiert wird und ihn dadurch andererseits veranlaßt, die vormals absorbierte Energie nach derjenigen Richtung, von der sie gekommen, wieder in den Raum hinauszusenden; und wenn ich auch derartige singuläre Vorgänge, wie einwärts gerichtete Kugelwellen, durch die Einführung einer besonderen einschränkenden Festsetzung, der Hypothese der natürlichen Strahlung, ausschließen konnte, so zeigte sich bei allen diesen Analysen doch immer deutlicher, daß zur vollständigen Erfassung des Kernpunkts der ganzen Frage noch ein wesentliches Bindeglied fehlen müsse.

So blieb mir nichts übrig, als das Problem einmal von der entgegengesetzten Seite in Angriff zu nehmen, von der Thermodynamik her, auf deren Boden ich mich ohnehin von Hause aus sicherer fühlte. In der Tat kamen mir hier meine früheren Studien über den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie dadurch zugute, daß ich gleich von vornherein darauf verfiel, nicht die Temperatur, sondern die Entropie des Resonators

mit seiner Energie in Beziehung zu bringen, und zwar nicht die Entropie selber, sondern ihren zweiten Differentialkoeffizienten nach der Energie, weil dieser eine direkte physikalische Bedeutung für die Irreversibilität des Energieaustausches zwischen Resonator und Strahlung besitzt. Da ich indessen in jener Zeit noch zu sehr phänomenologisch orientiert war, um näher nach dem Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit zu fragen, so sah ich mich zunächst allein auf die vorliegenden Ergebnisse der Erfahrung angewiesen. Nun stand damals, im Jahre 1899, im Vordergrund des Interesses das kurz zuvor von W. Wien aufgestellte Energieverteilungsgesetz (6), dessen experimentelle Prüfung einerseits von F. Paschen an der Hochschule in Hannover, andererseits von O. Lummer und E. Pringsheim an der Reichsanstalt in Charlottenburg in Angriff genommen war. Dieses Gesetz stellt die Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Temperatur vermittels einer Exponentialfunktion dar. Berechnet man den dadurch bedingten Zusammenhang zwischen der Entropie und der Energie eines Resonators, so ergibt sich das merkwürdige Resultat, daß der reziproke Wert des obengenannten Differentialkoeffizienten, den ich hier einmal mit $R$ bezeichnen will, proportional ist der Energie (7). Diese überaus einfache Beziehung kann als der vollständig adäquate Ausdruck des Wienschen Energieverteilungsgesetzes gelten; denn mit der Abhängigkeit von der Energie ist auch die von der Wellenlänge stets unmittelbar mitgegeben durch das allgemein sichergestellte Wiensche Verschiebungsgesetz (8).

Da es sich bei dem ganzen Problem um ein universelles Naturgesetz handelt und da ich damals, wie noch heute, von der Ansicht durchdrungen war, daß ein Naturgesetz um so einfacher lautet, je allgemeiner es ist, wobei allerdings die Frage, welche Formulierung als die einfachere zu betrachten ist, nicht immer zweifelsfrei und endgültig entschieden werden kann, so glaubte ich eine Zeitlang in dem Satz, daß die Größe $R$ der Energie proportional ist, das Fundament des ganzen Energieverteilungsgesetzes erblicken zu sollen (9). Diese Auffassung erwies sich aber bald den Ergebnissen neuerer Messungen gegenüber als unhaltbar. Während sich nämlich für



kleine Werte der Energie bzw. für kurze Wellen das Wiensche Gesetz auch in der Folge ausgezeichnet bestätigte, stellten für längere Wellen zuerst O. Lummer und E. Pringsheim merkliche Abweichungen fest (10), und vollends die von H. Rubens und F. Kurlbaum mit den ultraroten Restrahlen von Flußspat und Steinsalz ausgeführten Messungen (11) offenbarten ein total verschiedenartiges, aber ebenfalls unter Umständen wieder höchst einfaches Verhalten, welches sich dahin charakterisieren läßt, daß die Größe $R$ nicht der Energie, sondern dem Quadrat der Energie proportional ist, und zwar mit um so größerer Genauigkeit, zu je größeren Energien und Wellenlängen man übergeht (12).

So waren nun durch direkte Erfahrung für die Funktion $R$ zwei einfache Grenzen festgelegt: für kleine Energien Proportionalität mit der Energie, für große Energien Proportionalität mit dem Quadrat der Energie. Nichts lag daher näher, als für den allgemeinen Fall die Größe $R$ gleichzusetzen der Summe eines Gliedes mit der ersten Potenz und eines Gliedes mit der zweiten Potenz der Energie, so daß für kleine Energien das erste, für große Energien das zweite Glied ausschlaggebend wird, und damit war die neue Strahlungsformel gefunden (13), welche bis jetzt ihren experimentellen Prüfungen gegenüber ziemlich befriedigend standgehalten hat. Von einer endgültigen genauen Bestätigung durch die Erfahrung darf freilich auch heute noch nicht gesprochen werden, vielmehr wäre eine erneute Prüfung dringend erwünscht (14).

Aber selbst wenn die Strahlungsformel sich als absolut genau bewähren sollte, so würde sie, lediglich in der Bedeutung einer glücklich erratenen Interpolationsformel, doch nur einen recht beschränkten Wert besitzen. Daher war ich von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen physikalischen Sinn zu verschaffen, und diese Frage führte mich von selbst zu der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit, also auf Boltzmannsche Ideengänge; bis sich nach einigen Wochen der angespanntesten Arbeit meines Lebens das Dunkel lichtete und eine neue ungeahnte Fernsicht aufzudämmern begann.

Es sei mir hier eine kleine Einschaltung gestattet. Die Entropie ist nach Boltzmann ein Maß für die physikalische Wahrscheinlichkeit, und das Wesen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie besteht darin, daß in der Natur ein Zustand um so häufiger vorkommt, je wahrscheinlicher er ist. Nun mißt man unmittelbar immer nur Differenzen von Entropien, niemals die Entropie selber, und insofern kann man gar nicht ohne eine gewisse Willkür von der absoluten Entropie eines Zustandes reden. Aber dennoch empfiehlt sich die Einführung der passend definierten absoluten Größe der Entropie, und zwar aus dem Grunde, weil mit ihrer Hilfe gewisse allgemeine Sätze sich besonders einfach formulieren lassen. Es geht hier, soviel ich sehe, ganz ebenso wie bei der Energie. Auch die Energie ist nicht selber meßbar, sondern nur ihre Differenzen. Daher rechnete man früher nicht mit der Energie, sondern mit der Arbeit, und noch Ernst Mach, der sich vielfach mit dem Satz der Erhaltung der Energie beschäftigt hat, der aber allen über das Gebiet der Beobachtung hinausgehenden Spekulationen grundsätzlich aus dem Wege ging, hat es stets vermieden, von der Energie selber zu sprechen. Ebenso blieb man in der Thermochemie anfänglich immer bei den Wärmetönungen, also bei Energiedifferenzen, stehen, bis namentlich Wilhelm Ostwald mit Nachdruck darauf hinwies, daß manche umständliche Überlegung sich wesentlich abkürzen läßt, wenn man statt mit den kalorimetrischen Zahlen mit den Energien selber rechnet. Die in dem Ausdruck der Energie dann zunächst noch unbestimmt bleibende additive Konstante ist später durch den relativistischen Satz von der Proportionalität zwischen Energie und Trägheit endgültig festgelegt worden (15).

Ähnlich wie für die Energie kann man nun auch für die Entropie und infolgedessen auch für die physikalische Wahrscheinlichkeit einen absoluten Wert definieren, indem man die additive Konstante etwa dadurch festlegt, daß mit der Energie (besser noch mit der Temperatur) zugleich auch die Entropie verschwindet. Auf Grund einer derartigen Betrachtungsweise ergab sich für die Berechnung der physikalischen Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Energieverteilung in einem System von Resonatoren ein bestimmtes verhältnismäßig einfaches kombinatorisches Verfahren, welches genau zu dem durch das Strahlungsgesetz bedingten Entropieausdruck führt (16), und es gewährte mir eine besonders wertvolle Genugtuung für manche durchgemachte Enttäuschung, daß Ludwig Boltzmann in dem Briefe, mit dem er die Zusendung meines Aufsatzes beantwortete, sein Interesse und sein grundsätzliches Einverständnis mit dem von mir eingeschlagenen Gedankengang zu erkennen gab.



Zur numerischen Durchführung der angedeuteten Wahrscheinlichkeitsbetrachtung bedarf es der Kenntnis zweier universeller Konstanten, deren jede eine selbständige physikalische Bedeutung besitzt und deren nachträgliche Berechnung aus dem Strahlungsgesetz daher eine Prüfung der Frage ermöglicht, ob das ganze Verfahren nur als ein rechnerischer Kunstgriff zu bewerten ist oder ob ihm ein wirklicher physikalischer Sinn innewohnt. Die erste Konstante ist mehr formaler Natur, sie hängt zusammen mit der Definition der Temperatur. Würde man die Temperatur definieren als die mittlere kinetische Energie eines Moleküls in einem idealen Gase, also eine winzig kleine Größe, so würde diese Konstante den Wert $^2/_3$ besitzen (17). Im konventionellen Temperaturmaß dagegen nimmt die Konstante einen äußerst kleinen Wert an, welcher naturgemäß in engem Zusammenhang steht mit der Energie eines einzigen Moleküls und dessen genaue Kenntnis daher zu einer Berechnung der Masse eines Moleküls und der damit zusammenhängenden Größen führt. Häufig wird diese Konstante auch als Boltzmannsche Konstante bezeichnet, obwohl Boltzmann selber sie meines Wissens niemals eingeführt hat — ein eigentümlicher Umstand, der wohl dadurch zu erklären ist, daß Boltzmann, wie aus gelegentlichen Äußerungen von ihm hervorzugehen scheint (18), gar nicht an die Ausführbarkeit einer genauen Messung der Konstante dachte. Nichts kann den geradezu stürmischen Fortschritt, den die Kunst des Experimentierens in den letzten zwanzig Jahren gemacht hat, besser illustrieren als die Tatsache, daß seitdem nicht nur eine, sondern eine ganze Anzahl Methoden entdeckt wurde, um die Masse eines einzelnen Moleküls mit fast derselben Genauigkeit zu messen wie die eines Planeten.

Während zu der Zeit, als ich die entsprechende Berechnung aus dem Strahlungsgesetz ausführte, eine exakte Prüfung der gewonnenen Zahl überhaupt nicht möglich war und nicht viel mehr übrig blieb als die Feststellung der Zulässigkeit ihrer Größenordnung, gelang es bald darauf E. Rutherford und H. Geiger (19), mittels direkter Zählung der $\alpha$-Teilchen den Wert der elektrischen Elementarladung zu $4{,}65 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten zu bestimmen, dessen Übereinstimmung mit der von mir berechneten Zahl $4{,}69 \cdot 10^{-10}$ als eine entscheidende Bestätigung für die Brauchbarkeit meiner Theorie angesehen werden durfte. Seitdem haben weiter ausgebildete Methoden von E. Regener, R. A. Millikan u. a. (20) zu einer kleinen Erhöhung dieses Wertes geführt.

Sehr viel unbequemer als die der ersten war die Deutung der zweiten universellen Konstanten des Strahlungsgesetzes, welche ich, weil sie das Produkt einer Energie und einer Zeit vorstellt, nach der ersten Berechnung $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ erg · sec, als elementares Wirkungsquantum bezeichnete. Während sie für die Gewinnung des richtigen Ausdrucks für die Entropie durchaus unentbehrlich war — denn nur mit ihrer Hilfe ließ sich die Größe der für die angestellte Wahrscheinlichkeitsbetrachtung maßgebenden „Elementargebiete" oder „Spielräume" der Wahrscheinlichkeit festlegen (21) —, erwies sie sich gegenüber allen Versuchen, sie in irgendeiner angemessenen Form dem Rahmen der klassischen Theorie einzupassen, als sperrig und widerspenstig. Solange man sie als unendlich klein betrachten durfte, also bei großen Energien oder langen Zeitperioden, war alles in schönster Ordnung; im allgemeinen Falle jedoch klaffte an irgendeiner Stelle ein Riß, der um so auffallender wurde, zu je schwächeren und schnelleren Schwingungen man überging. Das Scheitern aller Versuche, die entstandene Kluft zu überbrücken, ließ bald keinen Zweifel mehr übrig: entweder war das Wirkungsquantum nur eine fiktive Größe; dann war die ganze Deduktion des Strahlungsgesetzes prinzipiell illusorisch und stellte weiter nichts vor als eine inhaltsleere Formelspielerei, oder aber der Ableitung des Strahlungsgesetzes lag ein wirklich physikalischer Gedanke zugrunde; dann mußte das Wirkungsquantum in der Physik eine fundamentale Rolle spielen, dann



kündigte sich mit ihm etwas ganz Neues, bis dahin Unerhörtes an, das berufen schien, unser physikalisches Denken, welches seit der Begründung der Infinitesimalrechnung durch Leibniz und Newton sich auf der Annahme der Stetigkeit aller ursächlichen Zusammenhänge aufbaut, von Grund aus umzugestalten.

Die Erfahrung hat für die zweite Alternative entschieden. Daß aber die Entscheidung so bald und so zweifellos fallen konnte, das verdankt die Wissenschaft nicht der Prüfung des Energieverteilungsgesetzes der Wärmestrahlung, noch weniger der von mir gegebenen speziellen Ableitung dieses Gesetzes, sondern das verdankt sie den rastlos vorwärtsdrängenden Arbeiten derjenigen Forscher, welche das Wirkungsquantum in den Dienst ihrer Untersuchungen gezogen haben.

Den ersten Vorstoß auf diesem Gebiete machte A. Einstein, welcher einerseits darauf hinwies, daß die Einführung der durch das Wirkungsquantum bedingten Energiequanten geeignet erscheint, um für eine Reihe von bemerkenswerten bei Lichtwirkungen gemachten Beobachtungen, wie die Stokessche Regel, die Elektronenemission, die Gasionisierung, eine einfache Erklärung zu gewinnen (22), andererseits durch die Identifizierung des Ausdrucks für die Energie eines Systems von Resonatoren mit der Energie eines festen Körpers eine Formel für die spezifische Wärme fester Körper ableitete, die den Gang der spezifischen Wärme, insbesondere ihre Abnahme bei sinkender Temperatur, im ganzen richtig wiedergibt (23). Damit war nach verschiedenen Richtungen hin eine Anzahl von Fragen aufgeworfen, deren genauere vielseitige Durcharbeitung im Laufe der Zeit zahlreiches wertvolles Material zutage förderte. Es kann hier meine Aufgabe nicht sein, einen auch nur annähernd vollständigen Bericht von der Fülle der hier geschaffenen Leistungen zu erstatten; lediglich darum kann es sich handeln, die wichtigsten charakteristischen Etappen auf dem Wege der fortschreitenden Erkenntnis hervorzuheben.

Zunächst für thermische und chemische Vorgänge. Was die spezifische Wärme fester Körper betrifft, so wurde die Einsteinsche Betrachtung, die auf der Annahme einer

einzigen Eigenschwingung der Atome beruht, von M. Born und Th. von Kármán erweitert auf den der Wirklichkeit besser angepaßten Fall verschiedenartiger Eigenschwingungen (24), und P. Debye gelang es durch eine kühne Vereinfachung der Voraussetzungen über den Charakter der Eigenschwingungen, eine verhältnismäßig einfache Formel für die spezifische Wärme fester Körper aufzustellen (25), welche besonders für tiefe Temperaturen nicht nur die von W. Nernst und seinen Schülern gemessenen Werte ausgezeichnet wiedergibt, sondern auch mit den elastischen und optischen Eigenschaften der Körper gut verträglich ist. Aber auch bei der spezifischen Wärme von Gasen machen sich die Wirkungsquanten bemerklich. Schon W. Nernst hatte frühzeitig darauf hingewiesen (26), daß dem Energiequantum einer Schwingung auch ein Energiequantum einer Rotation entsprechen muß, und demgemäß war zu erwarten, daß auch die Rotationsenergie der Gasmoleküle bei sinkender Temperatur verschwindet. Die Messungen von A. Eucken über die spezifische Wärme von Wasserstoff ergaben die Bestätigung dieses Schlusses (27), und wenn die Rechnungen von A. Einstein und O. Stern, P. Ehrenfest u. a. bisher keine genau befriedigende Übereinstimmung ergaben, so liegt das verständlicherweise an unserer noch unvollständigen Kenntnis von dem Modell eines Wasserstoffmoleküls. Daß die durch die Quantenbedingung ausgezeichneten Rotationen der Gasmoleküle tatsächlich in der Natur vorhanden sind, kann nach den Arbeiten von N. Bjerrum, E. v. Bahr, H. Rubens und G. Hettner u. a. über Absorptionsbanden im Ultraroten nicht mehr bezweifelt werden, wenn auch eine allseitig erschöpfende Erklärung dieser merkwürdigen Rotationsspektra bisher noch nicht hat gegeben werden können.

Da schließlich alle Affinitätseigenschaften einer Substanz durch ihre Entropie bedingt sind, so eröffnet die quantentheoretische Berechnung der Entropie auch den Zugang zu allen Problemen der chemischen Verwandtschaftslehre. Charakteristisch für den absoluten Wert der Entropie eines Gases ist die Nernstsche chemische Konstante, welche O. Sackur direkt durch ein kombinatorisches, dem von mir bei Oszillatoren angewandten nachgebildetes Verfahren berechnete (28), während O. Stern und H. Tetrode, im engeren Anschluß an die aus Messungen zu gewinnenden Daten, mittels der Betrachtung eines Verdampfungsvorganges die Differenz der Entropien im dampfförmigen und festen Aggregatzustand bestimmten (29).



Handelte es sich in den bisher betrachteten Fällen stets um Zustände thermodynamischen Gleichgewichts, für welche also die Messungen nur statistische, auf viele Partikel und längere Zeiträume bezogene Mittelwerte liefern können, so führt die Beobachtung von Elektronenstößen direkt in die dynamischen Einzelheiten der untersuchten Vorgänge ein, und deshalb liefert die von J. Franck und G. Hertz ausgeführte Bestimmung des sogenannten Resonanzpotentials oder derjenigen kritischen Geschwindigkeit, welche ein Elektron mindestens besitzen muß, um durch seinen Stoß gegen ein neutrales Atom dieses zur Emission eines Lichtquantums zu veranlassen, eine Methode zur Messung des Wirkungsquantums, wie man sie sich direkter nicht wünschen kann (30). Auch für die Anregung der von C. G. Barkla entdeckten charakteristischen Strahlung des Röntgenspektrums lassen sich nach den Versuchen von D. L. Webster, E. Wagner u. a. entsprechende Methoden ausbilden, welche zu ganz übereinstimmenden Resultaten führen.

Der Erzeugung von Lichtquanten durch Elektronenstöße steht als umgekehrter Vorgang gegenüber die Elektronenemission durch Bestrahlung mit Licht-, Röntgen- oder $\gamma$-Strahlen, und auch hier wieder spielen die durch das Wirkungsquantum und durch die Schwingungsfrequenz bedingten Energiequanten eine charakteristische Rolle, wie sich schon frühzeitig an der auffallenden Tatsache zu erkennen gab, daß die Geschwindigkeit der emittierten Elektronen nicht etwa von der Intensität der Bestrahlung (31), sondern nur von der Farbe des auffallenden Lichtes abhängt (32). Aber auch in quantitativer Hinsicht haben sich die oben angedeuteten Einsteinschen Beziehungen zum Lichtquantum nach jeder Richtung bewährt, wie besonders R. A. Millikan durch Messung der Austrittsgeschwindigkeiten emittierter Elektronen festgestellt hat (33), während die Bedeutung

des Lichtquantums für die Einleitung photochemischer Reaktionen von E. Warburg aufgedeckt wurde (34).

Wenn schon die bisher von mir angeführten, den verschiedenartigsten Gebieten der Physik entnommenen Erfahrungen zusammengenommen ein erdrückendes Beweismaterial zugunsten der Existenz des Wirkungsquantums darstellen, so erhielt die Quantenhypothese doch ihr allerstärkstes Fundament durch die Begründung und Ausbildung der Atomtheorie von Niels Bohr. Denn dieser Theorie war es beschieden, in dem Wirkungsquantum den lange gesuchten Schlüssel zu entdecken zur Eingangspforte in das Wunderland der Spektroskopie, welche seit der Entdeckung der Spektralanalyse allen Öffnungsversuchen hartnäckig getrotzt hatte; und nachdem der Weg einmal freigelegt war, ergoß sich in jähem Schwall ein Strom neugewonnener Erkenntnis über dieses ganze Gebiet nebst den Nachbargebieten der Physik und der Chemie. Die erste glänzende Errungenschaft war die Ableitung der Balmerschen Serienformel für Wasserstoff und Helium, einschließlich der Zurückführung der universellen Rydbergschen Konstanten auf lauter bekannte Zahlengrößen (35), wobei sogar deren kleine Verschiedenheit bei Wasserstoff und bei Helium als notwendig bedingt durch die schwache Bewegung des schweren Atomkerns erkannt wurde. Daran schloß sich die Erforschung anderer Serien im optischen und im Röntgenspektrum an der Hand des überaus fruchtbaren, erst jetzt in seiner fundamentalen Bedeutung klargestellten Ritzschen Kombinationsprinzips.

Wer aber angesichts dieser zahlenmäßigen Übereinstimmungen, die bei der besonderen Genauigkeit spektroskopischer Messungen auch besonders schlagende Beweiskraft beanspruchen durften, immer noch sich geneigt gefühlt hätte, an ein Spiel des Zufalls zu glauben, der wäre schließlich doch gezwungen gewesen, den letzten Zweifel fallen zu lassen, als A. Sommerfeld zeigte, daß aus einer sinngemäßen Erweiterung der Gesetze der Quantenteilung auf Systeme mit mehreren Freiheitsgraden und aus der Berücksichtigung der von der Relativitätstheorie geforderten Veränderlichkeit der trägen Masse jene Zauberformel hervorgeht, vor welcher das Wasserstoff- wie auch das Heliumspektrum die Rätsel ihrer



Feinstruktur entschleiern mußte (36), soweit das überhaupt durch die feinsten gegenwärtig möglichen Messungen, diejenigen von F. Paschen, festzustellen war (37) — eine Leistung, vollkommen ebenbürtig der berühmten Entdeckung des Planeten Neptun, dessen Dasein und Bahnelemente von Leverrier berechnet waren, ehe noch ein menschliches Auge ihn erblickt hatte. Auf demselben Wege weiter fortschreitend, gelangte P. Epstein zur vollständigen Erklärung des Starkeffektes der elektrischen Aufspaltung der Spektrallinien (38), P. Debye zu einer einfachen Deutung der von Manne Siegbahn durchforschten *K*-Serie des Röntgenspektrums (39), und nun folgte eine große Reihe weiterer Untersuchungen, welche in die dunklen Geheimnisse des Aufbaues der Atome mehr oder minder erfolgreich hineinleuchteten.

Nach allen diesen Resultaten, zu deren vollständiger Darstellung noch mancher klangvolle Name hier notwendig hätte herangezogen werden müssen, bleibt für einen Beurteiler, der nicht geradezu an den Tatsachen vorübergehen will, kein anderer Entschluß übrig als der, dem Wirkungsquantum, welches sich bei jedem einzelnen in der bunten Schar verschiedenartigster Vorgänge immer wieder als die nämliche Größe, nämlich etwa zu $6{,}54 \cdot 10^{-27}$ erg. sec ergeben hat (40), das volle Bürgerrecht in dem System der universellen physikalischen Konstanten zuzuschreiben. Es muß wohl als ein seltsames Zusammentreffen erscheinen, daß gerade in der nämlichen Zeit, da der Gedanke der allgemeinen Relativität sich freie Bahn gebrochen hat und zu unerhörten Erfolgen fortgeschritten ist, die Natur gerade an einer Stelle, wo man sich dessen am allerwenigsten versehen konnte, ein Absolutes geoffenbart hat, ein tatsächlich unveränderliches Einheitsmaß, mittels dessen sich die in einem Raumzeitelement enthaltene Wirkungsgröße durch eine ganz bestimmte von Willkür freie Zahl darstellen läßt und damit ihres bisherigen Charakters entkleidet wird.

Freilich ist mit der Einführung des Wirkungsquantums noch keine wirkliche Quantentheorie geschaffen. Ja vielleicht ist der Weg, den die Forschung bis dahin noch zurückzulegen hat, nicht weniger weit als der von der Entdeckung der Lichtgeschwindigkeit durch Olaf Römer bis zur Be-

gründung der Maxwellschen Lichttheorie. Die Schwierigkeiten, welche sich der Einführung des Wirkungsquantums in die wohlbewährte klassische Theorie gleich von Anfang an entgegengestellt haben, sind schon von mir berührt worden. Sie haben sich im Laufe der Jahre eher gesteigert als verringert, und wenn auch in der Zwischenzeit die ungestüm vorwärtsdrängende Forschung über einige derselben einstweilen zur Tagesordnung übergegangen ist, so berühren die zurückgelassenen, einer nachträglichen Ergänzung harrenden Lücken den gewissenhaften Systematiker um so peinlicher. Was namentlich in der Bohrschen Theorie dem Aufbau der Wirkungsgesetze als Grundlage dient, setzt sich zusammen aus gewissen Hypothesen, die noch vor einem Menschenalter von jedem Physiker ohne Zweifel glatt abgelehnt worden wären. Daß im Atom gewisse ganz bestimmte quantenmäßig ausgezeichnete Bahnen eine besondere Rolle spielen, mochte noch als annehmbar hingenommen werden, weniger leicht schon, daß die in diesen Bahnen mit bestimmter Beschleunigung kreisenden Elektronen gar keine Energie ausstrahlen. Daß aber die ganz scharf ausgeprägte Frequenz eines emittierten Lichtquantums verschieden sein soll von der Frequenz der emittierenden Elektronen, mußte von einem Theoretiker, der in der klassischen Schule aufgewachsen ist, im ersten Augenblick als eine ungeheuerliche und für das Vorstellungsvermögen fast unerträgliche Zumutung empfunden werden.

Aber Zahlen entscheiden, und die Folge davon ist, daß sich jetzt die Rollen gegen früher allmählich vertauscht haben. Während es sich anfangs darum handelte, ein neues fremdartiges Element einem allgemein als fest anerkannten Rahmen mit mehr oder minder gelindem Zwang anzupassen, ist nunmehr der Eindringling, nachdem er sich einen gesicherten Platz erobert hat, seinerseits zur Offensive übergegangen, und es steht heute schon fest, daß er den alten Rahmen in irgendeiner Weise auseinandersprengen wird. Fraglich ist nur noch, an welcher Stelle und bis zu welchem Grade ihm das gelingen wird.

Wenn es gestattet ist, schon heute eine Mutmaßung über den zu erwartenden Ausgang dieses heißen Ringens zu äußern, so scheint alles dafür zu sprechen, daß aus der klassischen



Theorie die großen Prinzipien der Thermodynamik auch in der Quantentheorie ihren zentralen Platz nicht nur unangetastet behaupten, sondern sogar entsprechend erweitern werden. Was bei der Begründung der klassischen Thermodynamik die Gedankenexperimente bedeuteten, das bedeutet einstweilen in der Quantentheorie die Adiabatenhypothese von P. Ehrenfest (41), und wie R. Clausius als Ausgangspunkt für die Messung der Entropie den Grundsatz einführte, daß zwei beliebige Zustände eines materiellen Systems bei passender Behandlung durch reversible Prozesse ineinander übergeführt werden können, so eröffnen uns die neuen Ideen von Bohr einen ganz entsprechenden Weg in das Innere des von ihm erschlossenen Wunderlandes.

Im einzelnen ist es besonders eine Frage, von deren erschöpfender Beantwortung wir nach meiner Meinung eine weitgehende Aufklärung erwarten dürfen. Was wird aus der Energie eines Lichtquantums nach vollendeter Emission? Breitet sie sich bei ihrer weiteren Fortpflanzung im Sinne der Huygensschen Wellentheorie nach verschiedenen Richtungen aus, indem sie einen stets größeren Raum einnimmt, in endlos fortschreitender Verdünnung? Oder fliegt sie im Sinne der Newtonschen Emanationstheorie wie ein Projektil in einer einzigen Richtung weiter? Im ersteren Falle würde das Quantum niemals mehr imstande sein, seine Energie auf eine einzige Raumstelle so stark zu konzentrieren, daß sie dort ein Elektron aus seinem Atomverband lösen kann, im zweiten Fall würde der Haupttriumph der Maxwellschen Theorie: die Kontinuität zwischen dem statischen und dem dynamischen Felde und mit ihr das bisherige volle Verständnis für die bis in die feinsten Einzelheiten durchforschten Interferenzphänomene, geopfert werden müssen — beides für den heutigen Theoretiker sehr unerfreuliche Konsequenzen.

Sei dem aber wie immer: in jedem Falle kann darüber kein Zweifel bestehen, daß die Wissenschaft einmal auch dieses schwere Dilemma bemeistern wird, und daß dasjenige, was uns heute unbefriedigend erscheint, dereinst von einer höheren Warte aus gerade als das durch besondere Harmonie und Einfachheit Ausgezeichnete angesehen werden wird. Bis zur Erreichung dieses Zieles aber wird das Problem des

Wirkungsquantums nicht aufhören, die Forschung immer von neuem anzuregen und zu befruchten, und je größere Schwierigkeiten sich seiner Lösung entgegenstellen, um so bedeutsamer wird sie sich schließlich erweisen für die Ausbreitung und Vertiefung unserer gesamten physikalischen Erkenntnis.

## Anmerkungen.

Die Literaturangaben machen nach keiner Richtung hin auf Vollständigkeit Anspruch und sollen nur zu einer ersten Orientierung dienen.

1. G. Kirchhoff, Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. Gesammelte Abhandlungen, S. 597 (§ 17). Leipzig: J. A. Barth 1882.

2. H. Hertz, Ann. d. Physik Bd. 36, S. 1, 1889.

3. Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. vom 20. Februar 1896. Ann. d. Physik Bd. 60, S. 577, 1897.

4. Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. vom 18. Mai 1899, S. 455.

5. L. Boltzmann, Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. vom 3. März 1898, S. 182.

6. W. Wien, Ann. d. Physik Bd. 58, S. 662, 1896.

7. Nach dem Wienschen Energieverteilungsgesetz wird die Abhängigkeit der Energie $U$ eines Resonators von der Temperatur dargestellt durch eine Beziehung von der Form:

$$U = a \cdot e^{-\frac{b}{T}}.$$

Bezeichnet also $S$ die Entropie des Resonators, so ergibt sich, da

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU},$$

für die Größe $R$ des Textes der Wert:

$$R = 1 : \frac{d^2S}{dU^2} = -bU.$$

8. Nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz ist die Energie $U$ eines Resonators mit der Eigenschwingungszahl $\nu$:

$$U = \nu \cdot f\left(\frac{T}{\nu}\right).$$

9. Ann. d. Physik Bd. 1, S. 719, 1900.

10. O. Lummer und E. Pringsheim, Verhandl. d. Dtsch. Physik. Ges. Bd. 2, S. 163, 1900.

11. H. Rubens und F. Kurlbaum, Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. vom 25. Oktober 1900, S. 929.

12. Für große $T$ ist nämlich nach den Versuchen von H. Rubens und F. Kurlbaum $U = cT$, folglich nach dem in (7) geschilderten Rechnungsverfahren:

$$R = 1 : \frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{U^2}{c}.$$



13. Setzt man nämlich:

$$R = 1 : \frac{d^2S}{dU^2} = -bU - \frac{U^2}{c},$$

so ergibt sich durch Integration:

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{1}{b}\log\left(1 + \frac{bc}{U}\right)$$

und daraus die Strahlungsformel:

$$U = \frac{bc}{e^{\frac{b}{T}} - 1}.$$

Vgl. Verhandl. d. Dtsch. Physik. Ges. vom 19. Oktober 1900, S. 202.

14. Vgl. W. Nernst und Th. Wulf, Verhandl. d. Dtsch. Physik. Ges. Bd. 21, S. 294, 1919.

15. Der absolute Wert der Energie ist nämlich gleich dem Produkt aus der trägen Masse und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.

16. Verhandl. d. Dtsch. Physik. Ges. vom 14. Dezember 1900, S. 237.

17. Allgemein ist, wenn $k$ die erste Strahlungskonstante bezeichnet, die mittlere kinetische Energie eines Gasmoleküls:

$$U = \frac{3}{2}kT.$$

Setzt man also $T = U$, so wird $k = \frac{2}{3}$. Im konventionellen (absoluten Kelvinschen) Temperaturmaß dagegen ist $T$ dadurch definiert, daß die Temperaturdifferenz zwischen siedendem und gefrierendem Wasser gleich 100 gesetzt wird.

18. Vgl. z. B. L. Boltzmann, Zur Erinnerung an Josef Loschmidt. Populäre Schriften S. 245, 1905.

19. E. Rutherford und H. Geiger, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 81, S. 162, 1908.

20. Vgl. R. A. Millikan, Phys. Ztschr. Bd. 14, S. 796, 1913.

21. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines physikalischen Zustandes beruht nämlich auf der Abzählung derjenigen endlichen Anzahl von gleichwahrscheinlichen Einzelfällen, durch die der betreffende Zustand verwirklicht wird, und zu einer bestimmten Abgrenzung dieser Einzelfälle voneinander ist eine bestimmte Festsetzung über den Begriff eines jeden Einzelfalles notwendig.

22. A. Einstein, Ann. d. Physik Bd. 17, S. 132, 1905.

23. A. Einstein, Ann. d. Physik Bd. 22, S. 180, 1907.

24. M. Born und Th. v. Kármán, Phys. Ztschr. Bd. 14, S. 15, 1913.

25. P. Debye, Ann. d. Physik Bd. 39, S. 789, 1912.

26. W. Nernst, Phys. Ztschr. Bd. 13, S. 1064, 1912.

27. A. Eucken, Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. S. 141, 1912.

28. O. Sackur, Ann. d. Physik Bd. 36, S. 958, 1911.

29. O. Stern, Phys. Ztschr. Bd. 14, S. 629, 1913. H. Tetrode, Ber. d. Akad. d. Wiss. v. Amsterdam, 27. Februar und 27. März 1915.

30. J. Franck und G. Hertz, Verhandl. d. Dtsch. Phys. Ges. Bd. 16, S. 512, 1914.

31. Ph. Lenard, Ann. d. Physik Bd. 8, S. 149, 1902.
32. E. Ladenburg, Verhandl. d. Dtsch. Phys. Ges. Bd. 9, S. 504, 1907.
33. R. A. Millikan, Phys. Ztschr. Bd. 17, S. 217, 1916.
34. E. Warburg, Über den Energieumsatz bei photochemischen Vorgängen in Gasen. Sitz.-Ber. d. preuß. Akad. d. Wiss. von 1911 an.
35. N. Bohr, Phil. Mag. Bd. 30, S. 394, 1915.
36. A. Sommerfeld, Ann. d. Physik Bd. 51, S. 1, 125, 1916.
37. F. Paschen, Ann. d. Physik Bd. 50, S. 901, 1916.
38. P. Epstein, Ann. d. Physik Bd. 50, S. 489, 1916.
39. P. Debye, Phys. Ztschr. Bd. 18, S. 276, 1917.
40. E. Wagner, Ann. d. Physik Bd. 57, S. 467, 1918. R. Ladenburg, Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik Bd. 17, S. 144, 1920.
41. P. Ehrenfest, Ann. d. Physik Bd. 51, S. 327, 1916.

# Kausalgesetz und Willensfreiheit.

(Öffentlicher Vortrag, gehalten in der Preußischen Akademie der Wissenschaften am 17. Februar 1923.)

Meine hochverehrten Damen und Herren! Kausalgesetz und Willensfreiheit — ein Thema so alt wie der innere Drang eines jeden ernsthaft nachdenkenden Menschen, das Bewußtsein seiner eigenen sittlichen Würde in Einklang zu bringen mit seiner Überzeugung von dem Walten einer strengen Gesetzlichkeit in dem gesamten Getriebe der äußeren und inneren Welt. Offenbart sich hier doch auf den ersten Anblick ein Gegensatz, wie er schärfer kaum gedacht werden kann. Auf der einen Seite der Ablauf aller Geschehnisse nach unverbrüchlichen Regeln — in der Natur wie im Geistesleben —, die Vorbedingung jeder wissenschaftlichen Erkenntnis und die Grundlage allen praktischen Handelns. Auf der anderen Seite die uns in unserem Selbstbewußtsein, also durch die unmittelbarste Erkenntnisquelle, die es geben kann, verbürgte Gewißheit, daß wir letzten Endes selber Herr sind über unsere eigenen Gedanken und Entschließungen, daß wir in jedem Augenblick die Möglichkeit haben, so oder so zu handeln, klug oder töricht, gut oder schlecht. Wie reimt sich dies beides zusammen? Sicherlich ist doch jeder einzelne von uns auch nur ein Stück der großen Welt, und daher ebenso wie alle übrigen Wesen ihren Gesetzen unterworfen.

Schier unbegrenzt ist die Anzahl der Untersuchungen und die Fülle der Gedanken, welche die scharfsinnigsten Geister aller Kulturvölker diesem Problem gewidmet haben, und entsprechend unbegrenzt ist die Zahl der Vorschläge, welche zu seiner Lösung beigebracht worden sind. Erwarten Sie nicht, verehrte Anwesende, oder vielleicht besser gesagt: fürchten Sie nicht, daß ich den Ehrgeiz habe, alle auf diesem

Gebiet angestellten Spekulationen um eine weitere zu vermehren. Was mich dazu veranlaßt hat, zu diesem Thema hier vor Ihnen das Wort zu nehmen, ist ein rein praktischer Beweggrund, ist der Hinblick auf eine ebenso augenfällige wie unbefriedigende Tatsache.

Nach alledem, was bis jetzt über unser Problem in Jahrhunderten gedacht und geschrieben worden ist, sollte man annehmen, daß wir heute seiner Lösung, wenn auch nicht vollkommen mächtig geworden, so doch wenigstens insofern einigermaßen nahegekommen sind, als über gewisse Grundlagen derselben bei allen Denkern einige Übereinstimmung erzielt worden ist. Was wir in Wirklichkeit gewahren, ist eher das Gegenteil. Seit langem ist über die Bedeutung des Kausalgesetzes in der Natur- und Geisteswelt, über Sinnliches und Übersinnliches, über Willensfreiheit und Willensgebundenheit nicht so heftig gestritten worden, wie in unseren Tagen, und man kann sagen, daß über diese Dinge in weiten Kreisen gegenwärtig eine höchst unerfreuliche Unklarheit besteht. Fast hat es den Anschein, als ob die denkende Menschheit bezüglich dieser Fragen in zwei getrennte Lager gespalten ist. Den einen ist es in erster Linie um das Erkennen zu tun; sie sehen in einer strengen Kausalität, auch für alle geistigen Vorgänge, ein unentbehrliches Postulat der wissenschaftlichen Forschung und tragen daher kein Bedenken, als Preis für ein vollständiges Verständnis dessen, was die Welt im Innersten zusammenhält, auch die eigene Willensfreiheit zum Opfer zu bringen. Die andern, mehr dem Handeln zugewandten Naturen, deren Selbstgefühl sich aufbäumt gegen die Zumutung, durch eine Unterordnung unter die Herrschaft starrer Gesetze zu einem blutlosen Automaten herabgewürdigt zu werden, und die daher die Willensfreiheit als das höchste Gut des denkenden Menschen in Anspruch nehmen, möchten dem Kausalgesetz wenigstens auf dem Gebiet des höheren Seelenlebens die Gültigkeit am liebsten ganz absprechen, zum mindesten aber so stark als irgend möglich beschneiden. Zwischen beiden Lagern bewegt sich eine größere Anzahl vorsichtig Abwägender, die durch ein unbestimmtes, aber starkes Gefühl, daß beide Parteien in gewissem Sinne recht haben möchten, daran verhindert



werden, sich einer von ihnen voll anzuschließen, obwohl sie sich nicht recht klar darüber sind, an welchem Punkte sich ihr Gedankengang von demjenigen der Extremen trennt, da sie weder den logischen Gründen der einen Seite noch den ethischen Gründen der anderen Seite etwas ganz Durchschlagendes entgegenzusetzen wissen. So verfolgen sie mit aller gebührenden Achtung, aber doch zugleich mit einiger Besorgnis und stillem Unbehagen, das allmähliche, aber sichere und unaufhaltsame Vordringen der wissenschaftlichen Forschung, die längst nicht mehr an der Grenzlinie zwischen Körper- und Geisteswelt haltmacht, und suchen, ein jeder nach bestem Wissen und Können, aber ohne rechten Erfolg, nach einem festen Schutzwall, hinter dem sich ihr Freiheitsbewußtsein vor dem Eindringen der rein kausalen Betrachtungsweise sicher fühlen kann.

Bei dieser recht unbefriedigenden Sachlage dürfte es wohl nicht ohne Interesse sein, einmal von einem Vertreter der exakten Naturforschung zu hören, was sich vom Standpunkt seiner Wissenschaft aus, deren Methodik jedenfalls auf ein hohes Maß von Zuverlässigkeit Anspruch machen darf, über das vorliegende Problem etwa sagen läßt. Und wenn es mir nicht gelingen sollte, Ihre Zustimmung zu allen meinen Ausführungen zu erlangen, so würde ich es doch schon als einen Erfolg betrachten, wenn durch sie Ihr Widerspruch herausgefordert und Ihnen damit Ihre eigene Stellung zu den hier behandelten Fragen noch deutlicher zum Bewußtsein gebracht werden würde.

## I.

Um einer sachlich befriedigenden Lösung unseres Problems auf die Spur zu kommen, fragen wir vor allem ganz allgemein nach der Bedeutung und der Gültigkeit des Kausalgesetzes. Der Kausalbegriff ist uns aus dem gewöhnlichen Leben vertraut und erscheint daher zunächst als der einfachste von der Welt. Alles, was sich ereignet, hat eine oder mehrere Ursachen, welche zusammen das betreffende Ereignis als Wirkung notwendig nach sich ziehen, und umgekehrt kann jedes Ereignis als die Ursache eines oder mehrerer mit Notwendigkeit darauf folgender Ereignisse angesehen werden.

Nach diesem Satze richten wir unser ganzes praktisches Handeln ein, er ist uns durch tägliche, stündliche Übung so vollständig in Fleisch und Blut übergegangen, daß wir ihn sogar halb unbewußt anwenden.

Wenn jemand — um zunächst bei einem ganz trivialen Beispiel zu bleiben —, der ruhig in seinem Zimmer sitzt, unvermutet ein auffallendes Geräusch hört, so wendet er wohl den Kopf, um sich nach der Ursache des Geräusches umzusehen; und wenn er seine Erwartung, dieselbe durch den Augenschein zu entdecken, nicht bestätigt findet, so vermutet er sie vielleicht in einem anderen Zimmer des Hauses, vielleicht auch draußen auf der Straße, vielleicht auch in noch größerer Entfernung, und wenn alles dieses nicht zutrifft, sieht er sich schließlich wohl veranlaßt, an eine subjektive Sinnestäuschung, eine Halluzination, zu denken.

Wie aber, so wollen wir einmal fragen, wenn alle diese Möglichkeiten nicht in Betracht kommen? Ist es von vornherein ganz ausgemacht und gar nicht anders denkbar, daß es für ein Ereignis in jedem Falle eine natürliche Ursache geben muß? Würde man auf einen logischen Widerspruch stoßen, wenn man den Kausalzusammenhang sich einmal ganz wegdenken wollte? Eine einfache Überlegung zeigt uns, daß diese Frage entschieden zu verneinen ist. Denn wir können uns sehr wohl denken, daß ein gehörtes Geräusch gar keine natürliche Ursache hat. In einem solchen Falle reden wir von einem Wunder oder auch von Zauberei. Schon der einfache Hinweis auf die Existenz einer großen und reichen Weltliteratur darüber beweist uns, daß sich Wunder sehr wohl denken lassen. Ja, wir können uns ohne Schwierigkeit denken, daß in der Welt sozusagen alles drunter und drüber geht; denken können wir uns, daß morgen die Sonne zur Abwechslung einmal im Westen aufgeht, denken und in allen Einzelheiten ausmalen können wir uns, daß sich im nächsten Augenblick die Tür dieses Saales öffnet, und daß leibhaftig hereingeschritten kommt irgendeine längst abgeschiedene historische Persönlichkeit, vielleicht gar der Stifter unserer Akademie, um sich einmal umzusehen, was aus seiner Sozietät der Wissenschaften geworden ist.



So unsinnig und unmöglich uns vom Wirklichkeitsstandpunkt aus das Eintreten eines solchen, aller Kausalität spottenden Ereignisses scheinen mag, so ist diese Art der Unmöglichkeit dennoch wohl zu unterscheiden von einer logischen Unmöglichkeit oder Vernunftwidrigkeit, wie zum Beispiel derjenigen, daß jemals ein Teil irgendeines Dinges größer sein könnte als das Ganze. Denn das vermögen wir uns beim besten Willen nicht zu denken, da es einen Widerspruch in sich selbst enthält. Diese Art der Unmöglichkeit ist daher denknotwendig, während eine Verletzung des Kausalgesetzes sich mit der formalen Logik sehr wohl vertragen kann. Hieraus folgt für uns das wichtige Resultat, daß sich über die Gültigkeit des Kausalgesetzes in der wirklichen Welt auf rein logischem Wege sicherlich nichts entscheiden läßt.

Die Wirklichkeit ist eben, obwohl freilich oft gerade das Gegenteil behauptet wird, nur ein ganz spezieller, schmaler Ausschnitt aus dem unermeßlichen Bereich dessen, was die Gedanken zu umspannen vermögen. Damit steht durchaus nicht im Widerspruch, daß unsere Einbildungskraft in letzter Linie stets an wirkliche Erlebnisse anknüpft; denn diese sind ja für uns der Ausgangspunkt alles Denkens. Aber wir besitzen nun einmal die Gabe, in Gedanken über die Wirklichkeit hinauszuschreiten. Ohne diese Fähigkeit unserer Einbildungskraft hätten wir weder Poesie noch Kunst. Sie ist unser höchstes, wertvollstes Gut, das uns oft in lichtere Regionen entführt, wenn die graue Alltäglichkeit gar zu unerträglich auf uns lastet.

Aber auch die strenge wissenschaftliche Forschung kann ohne das freie Spiel der Einbildungskraft nicht vorwärtskommen. Wer nicht gelegentlich auch einmal kausalwidrige Dinge zu denken vermag, wird seine Wissenschaft nie um eine neue Idee bereichern können. Und nicht nur bei der Hypothesenbildung, sondern sogar in der endgültigen Formulierung fertiger wissenschaftlicher Resultate wird oft kausalfreies Denken vorausgesetzt. Ein einfaches Beispiel aus der Physik wird dies näher erläutern. Denken wir uns einen Lichtstrahl, der von einer entfernten punktförmigen Lichtquelle, etwa einem leuchtenden Stern, herkommend, durch

beliebig viele, verschieden beschaffene und verschieden geformte durchsichtige Medien, wie Luft, Glas, Wasser usw., hindurchgehend das Auge trifft. Welchen Weg wird das Licht einschlagen, um von dem Stern ins Auge zu gelangen? Im allgemeinen sicherlich nicht den geradlinigen, weil doch das Licht beim Übergang aus einem Medium in ein anderes jedesmal eine Brechung erleidet, sondern einen um so verwickelteren, je zahlreicher und mannigfacher die Zwischenkörper angeordnet sind. Schon allein in der Atmosphäre ist der Lichtweg sehr kompliziert, weil die Luft in verschiedenen Höhenlagen verschiedene Brechbarkeit besitzt. Aber alle diese zusammengesetzten Fragen werden vollkommen genau geregelt durch den einen merkwürdigen Satz, daß das von dem Stern ausgehende Licht unter allen ihm zur Verfügung stehenden Wegen stets gerade denjenigen wählt, welcher es in der kürzesten Zeit bis zum Auge führt, wobei nur zu berücksichtigen ist, daß das Licht in den verschiedenen Medien sich verschieden schnell fortpflanzt. Dieses sehr fruchtbare sogenannte „Prinzip der schnellsten Ankunft" hätte gar keinen Sinn, wenn wir nicht imstande wären, auch solche Lichtwege zu überdenken, die in Wirklichkeit gar nicht vorkommen, also kausal unmöglich sind. Es ist, als ob das Licht eine gewisse Intelligenz besäße und die löbliche Absicht verfolgte, möglichst schnell an sein vorgestecktes Ziel zu kommen. Dabei hat es nicht einmal Zeit, die verschiedenen möglichen Wege wirklich auszuprobieren, sondern muß sich sofort für den richtigen entscheiden. Ähnliche Fälle gibt es in der Physik noch mehrere andere, zum Beispiel die sogenannten virtuellen Bewegungen, welche den dynamischen Gesetzen nicht gehorchen und daher, kausal genommen, ebenfalls unmöglich sind, aber dennoch eine wichtige Rolle in der Theorie spielen, also jedenfalls keinem Denkgesetz widersprechen.

## II.

Nachdem wir uns so überzeugt haben, daß das Kausalgesetz keineswegs zu den Denknotwendigkeiten gehört, erhebt sich um so bedeutsamer die Frage nach dem eigentlichen Wesen der Kausalität und nach der Gültigkeit des Kausal-



gesetzes im Bereich der wirklichen Welt. Als Kausalität können wir ganz allgemein den gesetzlichen Zusammenhang im zeitlichen Ablauf der Ereignisse bezeichnen. Ist nun dieser Zusammenhang in der Natur der Dinge selbst begründet oder ist er ganz oder teilweise ein Produkt der Einbildungskraft, welches der Mensch sich ursprünglich zu dem Zweck geschaffen hat, um sich im praktischen Leben zurechtzufinden, und das ihm in der Folge unentbehrlich geworden ist? Vor allem aber: Ist der Kausalzusammenhang ein absolut vollkommener, unzerreißbarer, oder läßt er gelegentlich auch Lücken und Sprünge zu?

Es liegt am nächsten, den Versuch zu machen, ob nicht diese Fragen sich allein durch systematisches Nachdenken klären lassen, und in der Tat sind dieselben auf solche Weise Jahrhunderte hindurch behandelt worden von den hervorragendsten Geistern derjenigen Richtung, welche in der Geschichte der Philosophie unter der Bezeichnung des Rationalismus zusammengefaßt wird. Hier ist nun leicht zu verstehen, daß alles auf den gewählten Ausgangspunkt ankommt; denn aus nichts wird nichts, ohne bestimmte Voraussetzungen läßt sich überhaupt nichts folgern. Daher greifen die Philosophen des Rationalismus in der Regel zunächst hinauf zu der allerhöchsten, ihnen absolut maßgebenden Instanz, der Gottheit, und leiten aus deren Attributen die Antwort auf die sie interessierenden Grundprobleme her. Da nun aber die Attribute der Gottheit als keineswegs feststehend und bekannt anzusehen sind, da im Gegenteil die höchsten Ideale in den Gedankenkreisen verschiedener Persönlichkeiten recht verschiedene Färbungen aufweisen, so kann es nicht ausbleiben, daß auch die gewonnenen Resultate entsprechend verschieden ausfallen, oder mit anderen Worten, daß in jedem derartigen philosophischen System sich letzten Endes nur die besondere religiöse Weltanschauung seines Schöpfers widerspiegelt.

Bei René Descartes, der häufig als der Vater der neueren Philosophie bezeichnet wird, hat Gott alle Gesetze der Natur und des Geistes aus seinem eigenen freien Wollen geschaffen, nach Zwecken, die so hoch sind, daß unser menschliches Denken gar nicht fähig ist, sie in ihrer ganzen Bedeutung

zu begreifen. Daher sind in dem System von Descartes Wunder und Mysterien keineswegs ausgeschlossen.

Im Gegensatz dazu ist Baruch Spinozas Gott ein Gott der Harmonie und der Ordnung, er durchdringt alles Weltgeschehen derart, daß das Gesetz vom allgemeinen Kausalzusammenhang selber als göttlich, also als absolut vollkommen und unverbrüchlich anzusehen ist. Daher gibt es in Spinozas Welt keinen Zufall und kein Wunder.

Der Gott von Gottfried Wilhelm Leibniz hinwiederum hat ursprünglich die ganze Welt nach einem einheitlichen, seiner höchsten Weisheit entsprechenden Plane aufgebaut, indem er von vornherein jedem einzelnen Dinge die Gesetze seiner besonderen Wirksamkeit ein für allemal einpflanzte, so daß es sich nun im Grunde ganz unabhängig von allen anderen Dingen nur seinem eigenen Wesen gemäß verhält und entwickelt. Daher ist bei Leibniz die Wechselwirkung zwischen zwei Dingen nur eine scheinbare. — Man sieht: soviel Philosophen, soviel Theorien. Auf diesem Wege kann man nicht wirklich vorwärtskommen.

Deshalb bedeutete es einen entscheidenden Fortschritt, als gegenüber der hier angedeuteten naiveren rationalistischen Auffassung von England her unter dem Namen des Empirismus eine skeptischere Richtung sich Bahn zu brechen begann. Für sie ist vor allem charakteristisch die Lehre, daß es bestimmte, von vornherein gesicherte Erkenntnisse oder angeborene Ideen, wie sie der Rationalismus voraussetzen muß, überhaupt nicht gibt, sondern daß unsere Seele sich bei der Geburt verhält wie ein unbeschriebenes Blatt, in welches erst die Erfahrung ihre Zeichen einträgt. Das einzige nun, was uns Kunde bringt von der gesamten Außen- und Innenwelt, und zugleich das einzige, von dem wir etwas mit Bestimmtheit aussagen können, sind unsere persönlichen Erlebnisse, vor allem die in unserm Bewußtsein auftretenden Empfindungen. Diese bilden daher die einzige feste unangreifbare Grundlage und den Ausgangspunkt alles Denkens, das eigentliche Material, mit welchem unser Verstand und unsere Einbildungskraft arbeitet. Was wir als warm oder kalt, blau oder rot, hart oder weich empfinden, dessen sind wir unmittelbar gewiß, ohne daß eine besondere Definition



nötig oder auch nur möglich wäre. Man spricht zwar manchmal auch von Sinnestäuschungen, wie zum Beispiel bei einer ungewöhnlichen Luftspiegelung. Aber das bedeutet nicht, daß die Empfindung unrichtig ist, sondern daß die Schlüsse unrichtig sind, die wir aus der vorhandenen Empfindung ziehen. Was uns täuscht, ist nicht unser Sinn, sondern unser Verstand.

Die Empfindung selber ist etwas durchaus Subjektives, daher dürfen wir aus den Empfindungen der Sinne nicht ohne weiteres auf die Gegenstände schließen. Die grüne Farbe ist nicht eine Eigenschaft des Blattes, sondern sie ist eine Eigentümlichkeit der Empfindung, die wir beim Anblick des Blattes verspüren. Ebenso verhält es sich mit den übrigen Sinnen. Nimmt man alle Sinnesempfindungen weg, so bleibt von dem „Gegenstande" überhaupt gar nichts mehr übrig. Bei John Locke scheint der Tastsinn noch eine etwas bevorzugte Rolle vor den übrigen Sinnen zu spielen, da Locke die durch diesen Sinn vermittelten mechanischen Eigenschaften der Körper, wie Dichtigkeit, Ausdehnung, Form, Bewegungszustand, den Körpern selbst zuschreibt, während die späteren Empiristen, wie namentlich David Hume, konsequenterweise auch alle mechanischen Eigenschaften rein subjektiv deuten.

Im Licht dieser Auffassung löst sich die sogenannte Außenwelt auf in einen Komplex von Empfindungen, und das Kausalgesetz bedeutet nichts weiter als eine erfahrungsgemäß festgestellte Regelmäßigkeit in der Aufeinanderfolge von Empfindungen, die wir als etwas Gegebenes, nicht weiter Analysierbares hinnehmen müssen, die aber auch jeden Augenblick einmal ein Ende nehmen könnte.

Wenn eine schnell bewegte Billardkugel auf eine andere Kugel stößt und diese in Bewegung setzt, so folgen zwei verschiedene Sinneseindrücke aufeinander: der der einen bewegten Kugel und der der anderen bewegten Kugel. Wir können durch wiederholte Beobachtung bestimmte Gesetzmäßigkeiten zwischen ihnen feststellen und registrieren, so zum Beispiel die Abhängigkeit der Geschwindigkeit der gestoßenen Kugel von der Geschwindigkeit und der Masse der stoßenden Kugel, wir können auch weiter damit in gesetz-

lichem Zusammenhang stehende Erscheinungen aufdecken, wie zum Beispiel das Geräusch, das wir beim Stoß hören, oder die vorübergehende Abplattung an der Berührungsstelle der beiden sich stoßenden Kugeln, die wir etwa durch einen abfärbenden Überzug der einen Kugel sichtbar machen können; aber das sind wieder nur verschiedene Sinneseindrücke, die sich in gesetzmäßiger Weise neben oder zwischen die anderen schieben, die aber als solche gegeben und keineswegs logisch auseinander ableitbar sind.

Auch wenn wir von einer Kraft reden, die die bewegte Kugel auf die ruhende ausübt, führen wir damit nur einen Analogiebegriff ein, welcher derjenigen Empfindung entlehnt ist, die wir in unseren Muskeln spüren, wenn wir die ursprünglich ruhende Kugel nicht mittels der bewegten Kugel, sondern mit der Hand anstoßen. Der Kraftbegriff hat sich für die Formulierung der Bewegungsgesetze als äußerst nützlich erwiesen, aber erkenntnismäßig führt er an sich nicht um einen Schritt weiter. Denn von einem eigentlichen inneren kausalen Band oder gar von einer logischen Brücke zu sprechen, welche die verschiedenen Bewegungserscheinungen miteinander verbindet, fehlt uns jeder Anhaltspunkt. Zwei verschiedene Empfindungen sind eben verschieden und bleiben verschieden, soviel Beziehungen zwischen ihnen man auch feststellen mag.

Danach beschränkt sich der ganze Inhalt des Kausalgesetzes im Grunde genommen auf den Satz, daß auf gleiche oder ähnliche Empfindungskomplexe als Ursache stets gleiche oder ähnliche Empfindungskomplexe als Wirkung folgen, wobei die Frage, was als ähnlich zu bezeichnen ist, einer jedesmaligen besonderen Prüfung bedarf. Durch diese Formulierung wird dem Kausalbegriff jeder tiefere Sinn aberkannt, wenn auch die praktische Bedeutung des Kausalgesetzes, die darin besteht, daß es dem denkenden Menschen den Blick in die Zukunft eröffnet, im wesentlichen ungeschmälert bestehen bleibt.

Wodurch erklärt es sich nun aber, daß wir im gewöhnlichen Leben den Kausalzusammenhang als etwas Objektives, von uns Unabhängiges auffassen, daß wir in ihm doch nun einmal tatsächlich viel mehr sehen, als nur eine regelmäßige Aneinanderreihung persönlicher Empfindungen? Die Lehre der Skeptiker antwortet: Durch die enorme Zweckmäßigkeit dieser Auffassung, in Verbindung mit der Macht der Gewohnheit. Allerdings läßt sich nicht leicht hoch genug bewerten, was alles durch Gewohnheit bewirkt werden kann. Von Kindheit an beeinflußt sie unser Fühlen, Wollen und Denken. Was wir gewohnt sind zu sehen, glauben wir auch zu verstehen. Wenn wir einen neuen auffallenden Vorgang zum ersten Male kennenlernen, sind wir vielleicht höchlich erstaunt; wenn wir denselben Vorgang zum zehnten Male sehen, finden wir ihn natürlich; wenn wir ihn zum hundertsten Male sehen, kommt er uns selbstverständlich vor und wir suchen vielleicht seine Notwendigkeit zu beweisen.



Vor hundert Jahren kannte man in der Technik der Fahrzeuge keine andere Kraftquelle als die menschliche und die tierische Kraft. Die Folge war, daß man auch keine andere für möglich hielt. Wie köstlich wirkt in Fritz Reuters „Reis' nah Belligen" das Erstaunen des biederen Landbewohners Korl Witt, der beim erstmaligen Anblick einer fahrenden Eisenbahnlokomotive jede Wette darauf eingehen will, daß da drinnen ein Pferd sitzt. Unsere heutige Jugend, die mit Dampfmaschinen und Elektromotoren aufgewachsen ist, wird den Humor dieser naiven Äußerung eines natürlichen Kausalbedürfnisses gar nicht mehr recht würdigen können.

Insofern ist also die skeptische Auffassung von der Natur des Kausalzusammenhanges verständlich und gerechtfertigt. Prüfen wir nun aber einmal genauer, wohin uns schließlich diese Auffassung führt, wenn wir sie wirklich vollkommen konsequent weiterverfolgen. Vor allem ist zu bedenken, daß, wenn von den im Bewußtsein gegebenen Empfindungen als der einzigen Erkenntnisquelle die Rede ist, es immer nur die eigene Empfindung, das eigene Bewußtsein ist, welches in Betracht kommt. Daß andere Menschen auch Empfindungen haben, können wir nur nach Analogie mutmaßen, aber nicht unmittelbar wissen und auch nicht logisch beweisen. Das wird besonders deutlich, wenn wir mit der Frage nach dem Vorhandensein von Empfindungen aus der höheren in die niedere Tierwelt und bis zur Pflanzenwelt hinabsteigen. Ent-

weder müssen wir irgendwo mehr oder weniger willkürlich ein Abbrechen der Empfindungsfähigkeit annehmen, oder wir müssen auch die Pflanzenwelt, ja, wie manche wollen, auch die unbelebte Natur mit Empfindung ausstatten. Die Unmöglichkeit, eine solche Anschauung streng zu begründen, liegt auf der Hand. Es bleibt also, wenn wir vollkommen konsequent verfahren und jegliche Willkür ausschalten wollen, nichts übrig, als auf dem Boden der eigenen Empfindung stehenzubleiben. Dann erscheint das Kausalgesetz als eine erfahrungsmäßige Regel, welche die Aufeinanderfolge der verschiedenen eigenen Empfindungen verknüpft, von der wir aber natürlich niemals wissen können, ob sie nicht im nächsten Augenblick durchbrochen werden wird. Wir müssen uns also eigentlich jederzeit auf ein Wunder gefaßt machen.

Daß Wunder sich sehr wohl denken und ausmalen lassen, haben wir ja schon zu Anfang ausführlich besprochen, und im Traum können wir sie tatsächlich jede Nacht erleben. Wenn wir aber nun fernerhin konsequent sein wollen, so müssen wir dann auch weitergehen und zugeben, daß der Traum sich überhaupt durch gar kein charakteristisches Merkmal von der Wirklichkeit unterscheiden läßt. Das Kausalgesetz kann uns hierbei nichts helfen; denn es soll ja weder hier noch dort unbeschränkte Gültigkeit besitzen, und annähernd kann man auch im Traum sehr wohl kausal geordnete Empfindungen haben. Die Stärke der Empfindungen kann auch nicht entscheidend sein; denn es gibt bekanntlich Träume, deren seelische Eindrücke denen der Wirklichkeit kaum nachstehen. Wer will beweisen, meine verehrten Damen und Herren, daß jeder einzelne von Ihnen den gegenwärtigen Augenblick, jedes Wort, das ich jetzt zu Ihnen spreche, nicht träumt? Man sage auch nicht, daß ein Traum sich verrät durch das plötzliche Abbrechen beim Erwachen. Man kann auch im Traum erwachen und dennoch weiter träumen. Es könnte sich sehr wohl ereignen, daß jemand regelmäßig jede Nacht einen Traum hat, welcher die kausale Fortsetzung des Traumes der vorigen Nacht bildet. Ein solches Unglückswesen würde ein doppeltes Leben führen und würde nie sicher darüber ins klare kommen, welches nun eigentlich das wirkliche und welches das geträumte ist.



Wir sehen: Mit rein logischen Mitteln ist diesem ganzen Gedankensystem, welches gewöhnlich als Solipsismus bezeichnet wird, nicht beizukommen. Der Solipsist stellt sein Ich in den Mittelpunkt allen Geschehens und jeglichen Erkennens, ihm gilt alles das und nur das als wirklich und unbezweifelbar, was er selber erlebt, alles andere ist abgeleitet und sekundär. Für den Solipsisten geht regelmäßig abends in dem Augenblick, da er einschläft, die Welt lautlos unter, um am anderen Morgen ebenso lautlos wieder neu zu erstehen, und zwar merkwürdigerweise genau ebenso, „als ob" sie während der Nacht weiterbestanden hätte.

Man braucht sich in diese sonderbaren Vorstellungen nur etwas zu vertiefen, um sie sogleich als völlig absurd und unannehmbar abzulehnen. In Wirklichkeit ist ja die Sachlage gerade umgekehrt. Die Welt kümmert sich nicht einen Pfifferling darum, ob der Solipsist wacht oder schläft, und selbst wenn er für immer die Augen schlösse, würde sie kaum eine besondere Notiz davon nehmen, sondern ungeändert ihren gewöhnlichen Gang weitergehen.

Vor derartigen ungeheuerlichen Konsequenzen sind denn auch selbst die extremsten Skeptiker zurückgeschreckt, freilich, wie es nicht anders sein kann, stets nur auf Grund von einer Art Kompromiß zwischen den Forderungen ihres gesunden Menschenverstandes und den rein logischen Folgerungen des von ihnen vertretenen Standpunktes. Es ist von besonderem Interesse, dies im einzelnen zu verfolgen und jedesmal die Stelle aufzusuchen, wo von dem geradlinigen Gedankengang abgewichen wird.

So schließt George Berkeley ungefähr folgendermaßen: Unter unseren Empfindungseindrücken gibt es auch solche, welche ohne, ja gegen unseren Willen verlaufen; darum müssen diese Empfindungen ihren Ursprung anderswo haben als in uns selber. Hier wird also ganz naiv das Kausalgesetz auf das Entstehen der Empfindungen angewendet, während doch andererseits die Empfindungen das einzig Gegebene sein sollen und die allgemeine Gültigkeit des Kausalgesetzes durch die ausdrückliche Zulassung von Wundern grundsätzlich in Abrede gestellt wird. Da Berkeley eine tief religiöse Natur war, so konnte es nicht fehlen, daß bei ihm als letzte Ursache

aller Empfindungen und damit aller Dinge überhaupt ein allmächtiger und allgütiger Schöpfer erscheint, von dem aus nun wieder ganz nach der Weise der Rationalisten alles andere, wie es eben gebraucht wird, abgeleitet werden kann.

Fassen wir zusammen, so können wir etwa folgendes als das Ergebnis dieser Betrachtungen aussprechen: Der skeptische Empirismus ist, rein logisch genommen, in seinen Grundlagen unanfechtbar und auch in seinen Folgerungen durchaus einwandfrei, aber er führt, in Reinkultur weiter gezüchtet, schließlich unweigerlich in eine Sackgasse, nämlich zum Solipsismus. Will man sich vor diesem retten, so bleibt mithin nichts anderes übrig, als an irgendeiner Stelle des Weges, am besten gleich zu Anfang, einen entschlossenen Seitensprung zu wagen durch Einführung einer besonderen, weder durch Empfindungseindrücke unmittelbar geforderten noch aus ihnen durch logische Schlüsse abzuleitenden Hypothese metaphysischer Art.

Diese Wahrheit als erster klar erkannt und einen derartigen rettenden Schritt bewußt vollzogen zu haben, ist das unvergängliche Verdienst von Immanuel Kant, dem Begründer des Kritizismus. Nach Kant sind die im Bewußtsein gegebenen Empfindungseindrücke nicht das einzige Mittel zur Gewinnung von Erkenntnis, sondern zu ihnen fügt die Vernunft noch etwas aus eigenem hinzu, indem sie sich von vornherein, unabhängig von aller Erfahrung, gewisse Begriffe schafft, die Kategorien, deren Gebrauch die notwendige Voraussetzung dafür bildet, daß überhaupt Erkenntnisse erworben werden können. Für unser Problem ist von Wichtigkeit, daß zu den Kantschen Kategorien auch der Kausalbegriff gehört und daß auch das Kausalgesetz dort als ein synthetisches Urteil a priori erscheint, etwa in der Fassung: „Alles, was geschieht, setzt etwas voraus, woraus es nach einer Regel folgt." Dieser Satz gilt nach Kant unabhängig von aller Erfahrung. Aber er läßt sich nicht etwa umkehren, d. h. nicht alles, was regelmäßig aufeinanderfolgt, steht im Kausalzusammenhang. Es gibt zum Beispiel wohl kaum eine regelmäßigere Aufeinanderfolge als die von Tag und Nacht, und doch wird kaum jemand behaupten wollen, daß



der Tag die Ursache der Nacht sei. Die absolute Regelmäßigkeit ist also bei Kant noch nicht, wie bei den Skeptikern, gleichbedeutend mit der Kausalität des Zusammenhanges. In dem genannten Beispiel stammt sie nur daher, daß beide Ereignisse, Tag und Nacht, Wirkungen einer und derselben Ursache sind, nämlich der Achsendrehung der Erde, in Verbindung mit der Undurchsichtigkeit des Erdkörpers für die Sonnenstrahlen.

Damit wäre also die Frage nach der allgemeinen Gültigkeit des Kausalgesetzes in bejahendem Sinne beantwortet. Indessen ist nicht zu verkennen, daß der Kantschen Lehre, so befriedigend und abschließend sie in den meisten ihrer Resultate erscheint, dennoch schon wegen ihrer dogmatisch gehaltenen Fassung eine gewisse Willkür anhaftet, und es läßt sich wohl verstehen, daß sie im Laufe der Zeit nicht nur verschiedene Um- und Weiterbildungen, sondern auch direkte Anfechtungen erfahren hat.

Selbstverständlich muß ich auf den Versuch verzichten, die Entwicklung, die das Kausalproblem in der Philosophie seit Kant genommen hat, hier auch nur in großen Zügen anzudeuten. Nur einige besonders hervorstechende Merkmale derselben seien hier hervorzuheben gestattet. Wohl die ernstlichste Gegnerschaft erwuchs der Kantschen Systematik von seiten derjenigen Philosophen, die Bedenken trugen, sich allzuweit auf metaphysisches Gebiet vorzuwagen. Daß man allerdings der Metaphysik nicht ganz entraten kann, ohne schließlich rettungslos dem Solipsismus zu verfallen, haben wir schon oben gesehen, und insofern läßt sich an jedem System, welches sowohl die Metaphysik als auch den Solipsismus vermeiden will, irgendwo eine Lücke logischer Art nachweisen, worauf im einzelnen einzugehen hier zu weit führen würde. Aber durch vorsichtige Konstruktionen kann man immerhin solchen Lücken ein ziemlich unauffälliges Ansehen geben.

Während nun die Lehre Kants und mit ihr die ganze übrige Transzendentalphilosophie, vom absoluten Idealismus an bis hin zum extremen Materialismus, von vornherein ausgesprochenermaßen auf metaphysischem Boden wurzelt, sucht im Gegensatz dazu der von Auguste Comte begründete Posi-

tivismus in seinen verschiedenen Färbungen und Ausbildungen sich von metaphysischen Einflüssen möglichst frei zu halten, indem er zunächst als einzige legitime Erkenntnisquelle nur die Bewußtseinserlebnisse anerkennt. Nach ihm ist die Kausalität nicht in den Dingen selbst begründet, sondern sie ist, kurz gesprochen, eine Erfindung des menschlichen Geistes, die nur deshalb eine so wichtige Rolle spielt, weil sie sich für den Menschen als äußerst brauchbar und zweckmäßig erwiesen hat, und das Kausalgesetz ist die Anwendung dieser Erfindung. Da wir nun etwas, was wir selber erfunden haben, immer auch ganz genau kennen, so schwindet damit jede Unklarheit in der Bedeutung des Kausalbegriffs. Daher bleibt dann aber auch immer die Möglichkeit offen, daß einmal in einem Falle die Erfindung sich als unbrauchbar erweist, daß also das Kausalitätsgesetz versagt. Und wenn Kant in seinem System lehrt, daß Erkenntnis ohne Kausalität von vornherein unmöglich ist, weil die Vernunft sich die Kategorie des Kausalbegriffs vor aller Erfahrung schafft, so ist, im Licht des Positivismus gesehen, diese schaffende Vernunft eben doch nur die menschliche Vernunft, und ihr Werk ist und bleibt Menschenwerk. Der Mensch ist das Maß aller Dinge, sagt schon Protagoras. Mögen wir uns drehen und wenden, wie wir wollen, wir kommen nun einmal aus unserer Haut nicht heraus, und alle noch so kühnen Streifzüge, die wir in das Gebiet des sogenannten Absoluten ausführen mögen, bewegen sich in Wahrheit doch stets nur innerhalb des Bannkreises, der uns von der Gesamtheit unserer Bewußtseinserlebnisse gezogen wird.

So unanfechtbar in gewissem Sinne die Bündigkeit dieser Überlegungen sich darstellt, so läßt sich doch vom Standpunkt der Transzendentalphilosophie mancherlei darauf erwidern, und so folgt auf jede Rede immer wieder die Gegenrede, in stets sich erneuerndem Wechsel, und das Ende vom Lied ist schließlich die Bekräftigung dessen, was wir eigentlich schon vorher wußten, daß nämlich die Frage nach dem Wesen und der allgemeinen Gültigkeit des Kausalgesetzes in endgültiger, allgemein anerkannter Weise durch reines Nachdenken nicht zu entscheiden ist. Die transzendentale und die positivistische Auffassung sind unversöhnlich



und werden es bleiben, solange es selbständig philosophierende Köpfe gibt.

## III.

Unter diesen Umständen erscheint jetzt die Aussicht auf eine befriedigende Lösung unseres Problems ziemlich hoffnungslos geworden. Oder gibt es nicht doch noch einen rettenden Ausweg aus diesem öden Zirkel, läßt sich vielleicht doch noch eine Instanz ausfindig machen, die man um eine zuverlässige Entscheidung angehen kann?

Allerdings ist noch eine Stelle zu nennen, von der eine Auskunft zu erhoffen wäre — eine Stelle, die wir bisher nicht besonders in Betracht gezogen haben. Fragen wir einmal bei der Wissenschaft an. Verhält sich diese in ihren vielfältigen Verzweigungen gegenüber unserer Frage ebenso zwiespältig wie die Philosophie in ihren verschiedenen einander gegenüberstehenden Systemen?

Freilich könnte man hier von vornherein einwerfen, daß ein Problem der Philosophie unmöglich von den Einzelwissenschaften gelöst werden könne; denn die Philosophie behandele ja gerade die Fragen, welche die Grundlagen und die Vorbedingungen für die Einzelwissenschaften betreffen, die Tätigkeit der Philosophie habe also jedenfalls der Fachwissenschaft vorauszugehen, und es hieße der philosophischen Behandlung unbefugterweise vorgreifen, wenn die Einzelwissenschaften es unternehmen wollten, in allgemeinen philosophischen Fragen mitzureden.

Wer so urteilt, der verkennt nach meiner Meinung die Bedeutung der Zusammenarbeit von Philosophie und Fachwissenschaft. Zunächst ist zu bedenken, daß der Ausgangspunkt und die Hilfsmittel der Forschung auf beiden Gebieten im Grunde ganz die nämlichen sind. Denn der Philosoph arbeitet ja nicht etwa mit einer besonderen Art von Verstand, und er schöpft aus keiner anderen Quelle als aus seinen durch die tägliche Erfahrung und durch seine wissenschaftliche Bildung gewonnenen Anschauungen, die je nach seiner individuellen Naturanlage und seinem persönlichen Entwicklungsgang andere sein werden. In gewisser Beziehung ist ihm sogar der Fachgelehrte weit überlegen, da dieser in seinem

Spezialgebiete über ein sehr viel reicheres, durch Beobachtung oder Versuche gesammeltes, systematisch gesichtetes Tatsachenmaterial verfügt. Dafür besitzt der Philosoph einen besseren Blick für die allgemeinen Zusammenhänge, die den Fachgelehrten nicht unmittelbar interessieren, und die er daher leichter unbeachtet läßt.

Vielleicht läßt sich die Verschiedenheit in den Arbeitsweisen der beiden einigermaßen vergleichen mit der Beschäftigung zweier Reisegefährten, die nebeneinander stehend ein vor ihnen weit ausgebreitet liegendes fremdes, kompliziertes Gelände musternd überschauen, der eine mit frei umherschweifendem Auge, der andere mit einem nach einer bestimmten Richtung hin fest eingestellten Fernrohr. Der erstere sieht im einzelnen undeutlicher, aber er vermag mit einem einzigen Blick die ganze Mannigfaltigkeit in ihrem Zusammenhang zu überblicken und dadurch manches besser zu verstehen, während der andere viel mehr Einzelheiten erkennt, aber dafür auf einen verhältnismäßig engen Gesichtskreis beschränkt ist und keinen umfassenden Überblick über das Ganze besitzt. Beide können sich durch gegenseitige Ergänzung wertvolle Dienste leisten.

Wenn auch natürlich dieser Vergleich hinkt, wie jeder andere, so mag er doch verdeutlichen, daß die Philosophie für ein bestimmtes, von ihr als fundamental erkanntes Problem, zu dessen Formulierung sie allein berufen und befähigt ist, das aber von ihr allein nicht ganz unzweideutig entschieden werden kann, sich sehr wohl durch eine Umfrage bei den Einzelwissenschaften wird Auskunft holen dürfen. Und sollte die Antwort auf die Umfrage in einem ganz bestimmten Sinne ausfallen, so wird man sie unbedenklich als eine endgültige betrachten dürfen. Denn es ist das charakteristische Merkmal wahrer Wissenschaft, daß ihre Erkenntnisse allgemein, objektiv, für alle Zeiten und alle Völker verbindlich sind, daß ihre Resultate daher unbeschränkte Anerkennung beanspruchen und schließlich auch immer durchsetzen. Fortschritte der Wissenschaft sind eben endgültig und lassen sich unmöglich auf die Dauer ignorieren.

Besonders deutlich zeigt sich dies in der Entwicklung, welche die Naturwissenschaft genommen hat. Daß der Mensch



heute mit drahtloser Telegraphie innerhalb eines winzigen Bruchteils einer Sekunde beliebige Nachrichten nach den entferntesten Orten der Erde sendet, daß er im Flugzeug sich in die Luft erhebt und hoch über Berggipfel und Meere dahinfährt, daß er mittels der Röntgenstrahlen das Innere eines jeden Lebewesens durchmustert und selbst die Lagerung der einzelnen Atome in den Kristallen feststellt, das sind objektive Leistungen der Wissenschaft und der durch sie befruchteten Technik, welche den alten Ben Akiba hundertmal Lügen strafen, vor denen die hochgepriesenen Kenntnisse aller Weltweisen und die jahrhundertelang geübten Künste aller Magier und Zauberer dahinsinken. Wer noch angesichts solcher handgreiflicher Erfolge die Augen verschließen und von einem Zusammenbruch der Wissenschaft faseln will, der verdient keine besondere Widerlegung, sondern macht sich einfach lächerlich. Denn auf welche andere Art sollte man den Beweis dafür führen, daß es sich hier um einen wirklich erkenntnismäßigen Fortschritt handelt, als durch die Prüfung der tatsächlich vorliegenden Leistungen? Das untrügliche Kennzeichen für den Wert einer jeden Arbeitsrichtung sind und bleiben nun einmal die von ihr erzielten Früchte.

Wenn somit die Kompetenz und die Zuverlässigkeit der wissenschaftlichen Methode für die Behandlung des vorliegenden Problems einmal anerkannt ist, dürfen wir nunmehr die folgende Frage stellen: Wie verfährt die Wissenschaft auf allen ihren Einzelgebieten tatsächlich? — und zwar wohlgemerkt die Fachwissenschaft selber, nicht etwa ihre philosophische oder erkenntnistheoretische Begründung. Beschäftigt sie sich mit den im Selbstbewußtsein unmittelbar gegebenen bezüglichen Sinneseindrücken und ihrer systematischen Verarbeitung durch die Denkgesetze, oder geht sie gleich von vornherein über diese erste Quelle unserer Erkenntnis hinaus und macht zunächst einmal sozusagen einen Sprung auf metaphysisches Gebiet?

Über die Antwort auf diese Frage kann meines Erachtens kein Unbefangener zweifelhaft sein, sie lautet in jeder einzelnen Wissenschaft zugunsten der zweiten Alternative. Ja man wird geradezu sagen dürfen, daß erst mit der bewußten Abwendung von der egozentrischen oder anthropozentrischen

Betrachtung jede eigentliche Wissenschaft beginnt. Denn ursprünglich bezog der denkende Mensch alle Sinneseindrücke und alles, was damit im Zusammenhang steht, auf sich und seine eigenen Interessen. Die Naturgewalten, die er sich gleich sich selbst beseelt dachte, schied er in freundlich und feindlich gesinnte, die Pflanzen teilte er ein in giftige und unschädliche, die Tiere in gefährliche und harmlose. Solange er bei dieser Betrachtungsweise verharrte, konnte er nicht zu einer wirklichen Wissenschaft kommen. Erst als er anfing, der reinen Erkenntnis zuliebe seine unmittelbaren Interessen aus dem Spiele zu lassen, als er sich selbst und später auch den von ihm bewohnten Planeten aus dem Mittelpunkt des Weltgeschehens entfernt dachte und sich auf den bescheideneren Posten eines aufmerksam lauschenden Beobachters zurückzog, der sich möglichst still im Hintergrund halten muß, um die Eigenschaften der von ihm untersuchten Objekte und den Ablauf der zu beobachtenden Vorgänge möglichst wenig zu beeinflussen, da begann die Außenwelt ihm ihre Geheimnisse zu entschleiern und verriet ihm dadurch zugleich auch die Mittel, mit welchen er schließlich sie sich zu Diensten zwingen konnte, die auf direktem Wege durchzusetzen ihm niemals gelungen wäre; einige Beispiele dafür sind uns schon oben entgegengetreten.

Und was im Bereich der Natur gilt, muß erst recht für das Geistesleben zutreffen. Die Grundlage und die Vorbedingung jeder echten fruchtbringenden Wissenschaft ist die durch reine Logik freilich nicht zu begründende, aber auch durch Logik niemals zu widerlegende metaphysische Hypothese der Existenz einer selbständigen, von uns völlig unabhängigen Außenwelt, von der wir allerdings nur durch unsere besonderen Sinne direkt Kenntnis erhalten können, wie wenn wir einen fremden Gegenstand nur durch eine Brille gewahren können, die bei jedem einzelnen Menschen eine etwas verschiedene Färbung aufweist. So wenig es uns aber dann einfällt, für alle Eigentümlichkeiten des wahrgenommenen Bildes unsere Brille verantwortlich zu machen, so sorgsam vielmehr wir darauf achten, bei der Bildung unseres Urteils über den Gegenstand die durch die Brille bedingten Färbungen, so gut es eben gehen will, in Rücksicht zu ziehen, ebenso ist es das



allererste Erfordernis wissenschaftlicher Denkweise, die Trennung der Außenwelt von der Innenwelt anzuerkennen und durchzuführen.

Um eine besondere Begründung dieses Sprunges ins Transzendentale haben sich die Einzelwissenschaften nie gekümmert, und sie haben wohl daran getan. Denn erstens wären sie sonst sicher nicht so schnell vorwärtsgekommen, und zweitens, was grundsätzlich noch wichtiger ist, haben sie niemals eine Widerlegung zu befürchten, da ja diese Fragen durch Vernunftschlüsse gar nicht entschieden werden können.

Gewiß ist der positivistische Satz, daß der Mensch das Maß aller Dinge ist, insofern unanfechtbar, als man niemand durch logische Gründe daran hindern kann, alle Dinge nach menschlichem Maß zu messen und das ganze Weltgeschehen letzten Endes in einen Komplex von Empfindungen aufzulösen, aber es gibt noch ein anderes, für gewisse Fragen viel wichtigeres Maß, welches, unabhängig von der Art und Beschaffenheit des messenden Intellekts, den Dingen selbst eigentümlich ist. Dieses Maß ist uns zwar nicht unmittelbar gegeben, aber wir suchen es zu gewinnen, und wenn wir auch das ideale Ziel niemals vollständig erreichen werden, so nähern wir uns doch ihm fortwährend in unablässiger Arbeit, und jeder Schritt auf diesem Wege belohnt sich, wie die Geschichte einer jeden Wissenschaft lehrt, durch hundertfältige Erfolge. —

Mit der Annahme der Existenz einer selbständigen Außenwelt verknüpft die Wissenschaft nun sogleich auch die Frage nach der Kausalität, das heißt nach der Gesetzlichkeit im Weltgeschehen, als eines von unseren Sinnesempfindungen ganz unabhängigen Begriffs, und betrachtet es als ihre Aufgabe, zu untersuchen, ob und inwiefern das Kausalgesetz auf die verschiedenen Vorgänge in der Natur und in der Geisteswelt anwendbar ist.

Wir sehen, die Wissenschaft befindet sich hier gerade an dem nämlichen Punkte, welchen Kant zum Ausgang seiner Erkenntnislehre gemacht hat. Wie in der Kantschen Philosophie, so gehört auch in jeder Einzelwissenschaft der Kausalbegriff von vornherein zu den Kategorien, ohne die Erkenntnis

überhaupt nicht gewonnen werden kann. Dagegen ist insofern ein gewisser Unterschied vorhanden, als Kant nicht nur den Begriff der Kausalität, sondern bis zu einem gewissen Grade auch den Inhalt des Kausalgesetzes als durch Anschauung unmittelbar gegeben und daher als allgemeingültig hinstellt. Diesen Schritt können die Einzelwissenschaften nicht mitmachen. Sie müssen es sich vielmehr vorbehalten, die Frage nach der Bedeutung des Kausalgesetzes in jedem einzelnen Falle besonders zu prüfen und die an sich leere Form des Kausalbegriffs durch induktive Forschung allmählich mit fruchtbarem Inhalt zu füllen.

## IV.

Damit sind wir nun, um der Lösung unseres Problems näherzukommen, vor die Aufgabe gestellt, die einzelnen Wissenschaften der Reihe nach durchzumustern und ihre Stellung zur Frage nach der allgemeinen und ausnahmslosen Gültigkeit des Kausalgesetzes zu ergründen. Selbstverständlich kann es sich hier nur um einen ganz kurzen Gang mit Siebenmeilenstiefelschritten handeln. Wir beginnen mit der exaktesten der Naturwissenschaften: der Physik.

In der klassischen Dynamik, zu der wir sowohl die Mechanik, einschließlich der Gravitationstheorie, als auch die Maxwell-Lorentzsche Elektrodynamik rechnen können, hat das Kausalgesetz eine Formulierung gefunden, die an Genauigkeit und Strenge dem idealen Ziel, von dem ich oben gesprochen habe, jedenfalls schon einigermaßen nahekommt. Sie stellt sich dar als ein gewisses System von mathematischen Gleichungen, durch welche alle Vorgänge in irgendeinem gegebenen physikalischen Gebilde vollkommen bestimmt werden, sobald die zeitlichen und räumlichen Grenzbedingungen, das heißt der Anfangszustand und die von außen her auf das Gebilde stattfindenden Einwirkungen, gegeben sind. Dadurch ist es möglich gemacht, alle in dem Gebilde sich abspielenden Vorgänge in allen Einzelheiten im voraus zu berechnen und so aus der Ursache die Wirkung abzuleiten.

Ihren letzten bedeutenden Fortschritt hat die Dynamik erst in jüngster Zeit erfahren durch die Einsteinsche allgemeine Relativitätstheorie, durch welche die Newtonsche Gravitation auf das innigste mit dem Galileischen Trägheitsgesetz verschmolzen worden ist. Man pflegt manchmal die Relativitätstheorie zugunsten einer positivistischen Auffassung zu deuten und in einen gewissen Gegensatz zur Transzendentalphilosophie zu bringen. Ganz mit Unrecht. Denn das Fundament der Relativitätstheorie liegt nicht darin, daß alle Raum- und Zeitangaben nur eine relative, durch das Bezugssystem des Beobachters bedingte Bedeutung besitzen, sondern es liegt darin, daß es in der vierdimensionalen raumzeitlichen Mannigfaltigkeit eine Größe gibt, nämlich die Entfernung zweier unendlich benachbarter Punkte, die sogenannte „Maßbestimmung", welche für alle messenden Beobachter und für alle benutzten Bezugssysteme den nämlichen Wert besitzt und der daher ein von jeder menschlichen Willkür unabhängiger transzendentaler Charakter zukommt.



In dieses harmonische System der Physik hat allerdings neuerdings die Quantenhypothese einige Verwirrung gebracht, und es ist heute noch nicht bestimmt abzusehen, welchen Einfluß die Durchführung dieser Hypothese auf die Fassung der physikalischen Grundgesetze haben wird; einige wesentliche Modifikationen scheinen unvermeidlich zu werden. Indessen zweifelt wohl kein Physiker daran, daß schließlich auch die Quantenhypothese ihren exakten Ausdruck in gewissen Gleichungen finden wird, welche dann als eine genauere Formulierung des Kausalgesetzes gelten können. —

Aber die Physik kennt außer den dynamischen Gesetzen, welche streng und in allen Einzelfällen gelten, auch andere, sogenannte statistische Gesetze, welche nur Wahrscheinlichkeitscharakter haben und in Einzelfällen Ausnahmen zulassen. Ein klassisches Beispiel dafür ist die Wärmeleitung. Wenn sich zwei Körper von verschiedener Temperatur berühren, so geht nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie die Wärmeenergie immer von dem wärmeren zu dem kälteren Körper über. Wir wissen heute genau, daß dieser Satz nur ein Wahrscheinlichkeitssatz ist. Es kann nämlich, besonders wenn die Temperaturdifferenz der beiden sich berührenden Körper äußerst klein ist, sehr wohl vorkommen, daß an einer einzelnen Berührungsstelle in einem einzelnen

Zeitpunkt einmal ein entgegengesetzter Wärmeübergang, vom kälteren zum wärmeren Körper, erfolgt. Der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie hat eben, wie alle statistischen Gesetze, nur für Mittelwerte aus einer sehr großen Anzahl von gleichartigen Vorgängen, nicht für jeden einzelnen Vorgang exakte Bedeutung. Will man ihn auf Einzelfälle anwenden, so darf man nur von einer gewissen Wahrscheinlichkeit sprechen.

Es liegt hier ganz ähnlich wie in dem Falle des Spiels mit einem unsymmetrischen Würfel. Wenn man einen Würfel rollen läßt, dessen Schwerpunkt nicht in seiner Mitte liegt, sondern stark nach einer der sechs Seitenflächen verschoben ist, so ist es sehr wahrscheinlich, aber doch nicht ganz sicher, daß die bevorzugte Seitenfläche unten zu liegen kommt. Je geringer die Abweichung des Schwerpunktes von seiner symmetrischen Lage ist, um so schwankender wird das Resultat. Einen exakten Ausdruck für das hier obwaltende statistische Gesetz kann man gewinnen, wenn man den Wurf sehr oft wiederholt. Dann steht die Anzahl derjenigen Würfe, welche das bevorzugte Resultat ergeben, zu der Gesamtzahl aller Würfe in einem ganz bestimmten, durch die Lagerung des Schwerpunktes gegebenen Verhältnis.

Findet nun, um wieder auf die Wärmeleitung zurückzukommen, die strenge, bis in alle Einzelheiten sich erstreckende Gültigkeit des Kausalgesetzes bei ihr eine Grenze? Keineswegs. Denn die eingehendere Forschung hat gezeigt, daß das, was wir Wärmeübergang von einem Körper zum anderen nennen, ein äußerst verwickelter Vorgang ist, der sich in eine Unzahl einzelner, voneinander unabhängiger feiner Vorgänge, der Molekularbewegungen, auflösen läßt, und sie hat ferner gezeigt, daß, wenn wir für jeden einzelnen dieser feinen Vorgänge die Gültigkeit dynamischer Gesetze, also strenge Kausalität, voraussetzen, dann gerade die durch Beobachtung festgestellten Wahrscheinlichkeitsgesetze sich ergeben. Die Abweichung von der statistischen Regel in Einzelfällen hat also nicht darin ihren Grund, daß das Kausalgesetz nicht erfüllt ist, sondern darin, daß unsere Beobachtungen viel zuwenig fein sind, um zu einer direkten Prüfung des Kausalgesetzes verwendet werden zu können. Wären wir imstande, die Bewegung jedes einzelnen Moleküls zu verfolgen, so würden



wir an ihr die genaue Gültigkeit der dynamischen Gesetze bestätigt finden.

Man unterscheidet daher auch in der Physik zwei verschiedene Arten von Betrachtungsweisen: die makroskopische, gröbere, summarische, und die mikroskopische, feinere, detailliertere. Nur für den makroskopischen Beobachter gibt es einen Zufall und eine Wahrscheinlichkeit, deren Größe und Bedeutung wesentlich durch das Maß von Kenntnissen bedingt ist, über die er verfügt, während der mikroskopische Beobachter überall nur Gewißheit und strenge Kausalität sieht. Der makroskopische Beobachter rechnet nur mit zusammengesetzten Werten, er kennt nur statistische Gesetze; der mikroskopische Beobachter rechnet mit Einzelwerten und wendet auf sie die völlig eindeutigen dynamischen Gesetze an. Würden wir das oben geschilderte Würfelspiel mikroskopisch betrachten, das heißt, würden wir außer der Beschaffenheit des Würfels auch seine Anfangslage und seine Anfangsgeschwindigkeit sowie die äußeren Einwirkungen der Tischplatte und des Luftwiderstandes in jedem Einzelfalle genau kennen, so wäre von Zufall nicht mehr die Rede, sondern wir würden jedesmal imstande sein, genau den Ort und die Lage zu berechnen, in der der Würfel schließlich liegenbleibt.

Es braucht hier nicht näher ausgeführt zu werden, daß die physikalische Wissenschaft bei allen Vorgängen in der Molekül- und Atomwelt die makroskopische Betrachtungsweise, welche dort natürlich stets vorausgeht, nach Möglichkeit auf die mikroskopische Betrachtung, also die statistischen Gesetze auf eine dynamische, streng kausale Gesetzmäßigkeit zurückzuführen sucht, und insofern darf man sagen, daß die Physik, wozu wir hier auch die Astronomie, die Chemie und die Mineralogie rechnen dürfen, auf allen ihren Gebieten die strenge Gültigkeit des Kausalgesetzes zugrunde legt. —

Wir kommen nun zu den biologischen Wissenschaften. Hier liegen die Verhältnisse schon sehr viel verwickelter, besonders deshalb, weil mit dem Begriff des Lebens auch der Entwicklungsgedanke auftritt, welcher der wissenschaftlichen Forschung schon von jeher die größten Schwierigkeiten bereitet hat. Indessen darf ich, wenn ich auch auf diesem

Gebiet nicht mehr als Fachmann reden kann, doch unbedenklich die Behauptung aufstellen, daß auch die biologische Forschung gerade auf ihren dunkelsten Gebieten, wie zum Beispiel in der Vererbungslehre, mit der Zeit immer mehr dahin gekommen ist, die allgemeine Gültigkeit streng kausaler Beziehungen anzunehmen. Einen Zufall in absolutem Sinne oder, was hier auf dasselbe herauskommt, ein Wunder, kennt die Physiologie ebensowenig wie die Physik, obwohl freilich eine mikroskopische Betrachtungsweise hier noch weit schwieriger durchzuführen ist. Daher sind die meisten physiologischen Gesetze von statistischer Art, sogenannte Regeln. Wenn von einer solchen empirisch festgestellten Regel Ausnahmen beobachtet werden, so werden dieselben nicht einem Versagen des Kausalgesetzes zugeschrieben, sondern einem Mangel unserer Kenntnisse von den Bedingungen, welche der Anwendung der Regel zugrunde liegen, und die Wissenschaft ruht und rastet nicht, bis hierüber in irgendeiner Weise Aufklärung geschaffen ist. Durch eine solche wird dann auch nicht selten zugleich auf andere damit zusammenhängende Fragen unvermutet Licht geworfen und so das Walten des allgemeinen Kausalzusammenhanges von einer neuen Seite bestätigt. Das ist der Weg, auf welchem schon manche bedeutende Entdeckung gemacht wurde.

Wie unterscheidet man aber die Kausalität eines Zusammenhanges von einer bloßen äußerlichen Regelmäßigkeit der Aufeinanderfolge? Ein absolut ausschlaggebendes Merkmal hierfür gibt es überhaupt nicht. Was man feststellen kann, ist letzten Endes immer nur die allgemeine und ausnahmslose Gültigkeit eines Gesetzes, welche uns gestattet, die aus einer gegebenen Ursache folgenden Wirkungen mit Bestimmtheit vorauszusagen.

Eine hübsche Illustration hierzu gibt eine kleine Geschichte, die, wenn ich nicht irre, von Benjamin Franklin erzählt wird. Dieser, der bekanntlich nicht nur ein großer Staatsmann, sondern auch ein genialer Naturforscher und Erfinder war, beschäftigte sich zeitweise einmal angelegentlich mit dem Problem der künstlichen Bodendüngung, deren Bedeutung für die Landwirtschaft er klar voraussah, und hatte auch schon mit Gipsdünger einige praktische Erfolge erzielt.



Doch wollte es ihm lange Zeit hindurch nicht gelingen, seine allen Neuerungen abgeneigten Nachbarn davon zu überzeugen, daß das üppige Gedeihen seines Kleefeldes ursächlich durch die künstliche Düngung bedingt war. Schließlich verfiel er auf die folgende drastische Beweismethode. Zur Zeit der Aussaat grub er auf seinem Kleeacker mit dem Spaten lange, schmale Furchenlinien in den Boden, die er zu großen Buchstaben formte und mit reichlichem Dünger versah, während der ganze übrige Teil des Feldes ungedüngt blieb. Als nun später der Klee aufging, da schoß er auf den gedüngten Linien besonders üppig ins Kraut, und man konnte schon von weitem auf dem Felde in dicker Kleeschrift deutlich die Worte lesen: „Diese Stelle ist mit Gips gedüngt."

Ob die dickköpfigen Bauern sich durch diese Beweisführung bekehren ließen, verrät unsere Erzählung nicht. Selbstverständlich ist das keineswegs. Denn niemand kann durch Gründe rein logischer Art gezwungen werden, auch da, wo absolute Regelmäßigkeit vorliegt, einen Kausalzusammenhang anzuerkennen. Denken wir nur an das Kantsche Beispiel von Tag und Nacht. Das steht ganz im Einklang mit dem, was wir schon wiederholt zu betonen Gelegenheit hatten, daß das kausale Band nicht logischer, sondern transzendentaler Art ist.

Mag man immerhin das Kausalgesetz eine Hypothese nennen — auf die Bezeichnung kommt es ja weniger an. Jedenfalls ist es aber dann nicht eine Hypothese wie viele andere, sondern es ist die Haupt- und Grundhypothese, nämlich die Vorbedingung dafür, daß es überhaupt einen Sinn hat, Hypothesen zu bilden. Denn eine jegliche Hypothese, die irgendeine bestimmte Regel ausspricht, fußt schon auf der Gültigkeit des Kausalgesetzes. —

Es bleibt uns noch zu betrachten übrig diejenige Klasse von Wissenschaften, welche die feinsten und die verwickeltsten, uns am unmittelbarsten berührenden Vorgänge, die geistigen, zum Gegenstande hat. Die ungeheuren Schwierigkeiten, mit denen bei den Geisteswissenschaften, speziell bei der allen vorangehenden Geschichtswissenschaft, die Anwendung der objektiven Beobachtungsmethode schon wegen der Beschränktheit des Quellenmaterials zu kämpfen hat,

werden einigermaßen dadurch gemildert, daß diesen Wissenschaften noch eine besondere Methode subjektiver Art zur Verfügung steht, die den Naturwissenschaften fremd ist: die Methode der Selbstbeobachtung, die es dem Forscher ermöglicht, sich in den Seelenzustand der Persönlichkeiten oder der Gruppen von Persönlichkeiten, mit denen er sich beschäftigt, einigermaßen einzufühlen und dadurch einen gewissen Einblick in die Eigentümlichkeiten ihrer Empfindungen und Gedankengänge zu gewinnen.

Fragen wir nun also wiederum: Welche Stellung nehmen die Geisteswissenschaften zu unserm Problem ein? Gibt es nach ihnen auch in der Welt des Geistes, im Fühlen, Wollen, Denken und Handeln des Menschen überall einen strengen Kausalzusammenhang, so daß jedes Erlebnis, jeder Gedanke, jeder Willensakt durch einen oder mehrere vorhergehende Umstände oder Ereignisse notwendig und vollständig bedingt ist, oder herrscht hier im Gegensatz zur Natur bis zu einem gewissen Grad Freiheit oder Willkür oder Zufall, wie man es nun eben nennen will?

Von jeher bestanden über diesen Punkt sehr verschiedene Ansichten. So finden sich zum Beispiel bis in die neueste Zeit hinein Auffassungen verbreitet wie etwa die folgende: „Je höher man in der Stufenleiter der Naturwesen aufsteigt, desto belangloser wird das Moment der Notwendigkeit, desto größer der Spielraum und der Geltungsbereich der schöpferischen Freiheit, die sich beim Menschen zur vollen Willensfreiheit erhebt."

Ob und inwieweit eine solche Ansicht zutreffend ist, kann nur die historische und die psychologische Forschung entscheiden. Dabei lautet die Fragestellung ganz ähnlich wie bei den Naturwissenschaften, nur daß, den besonderen Umständen entsprechend, hier eine etwas andere Terminologie benutzt wird. Als Objekt der Untersuchung dient wie in der Naturwissenschaft ein bestimmtes Gebilde mit gegebenen Eigenschaften, so hier eine bestimmte individuelle Persönlichkeit mit gegebener ererbter Veranlagung, wie Körperbeschaffenheit, Intelligenz, Einbildungskraft, Charakter, Temperament, Gemütsverfassung. Als äußere Bedingungen fungieren hier die physischen und die psychischen Einflüsse der



Umwelt, wie sie durch Klima, Ernährung, Erziehung, Umgang, Lektüre usw. wirksam werden. Gefragt wird, ob durch alle diese Daten das zukünftige Verhalten des Menschen in allen Einzelheiten nach bestimmten Gesetzen determiniert wird.

Von einer vollständigen, logisch unanfechtbaren Beantwortung dieser Frage kann selbstverständlich hier noch viel weniger die Rede sein wie bei der Naturwissenschaft. Aber so viel wird man doch schon heute mit aller Bestimmtheit behaupten dürfen, daß die Richtung, welche sowohl die Geschichtswissenschaft als auch die Psychologie im Laufe ihrer Entwicklung genommen haben, mit Entschiedenheit darauf hinweist, die Frage in vollem Umfange zu bejahen. Die Rolle, welche in der Natur die Kraft als Ursache der Bewegungen spielt, übernimmt hier in der Welt des Geistes das Motiv als Ursache der Handlungen, und wie in jedem Augenblick die Bewegungen eines materiellen Körpers mit Notwendigkeit aus dem Zusammenwirken verschieden gerichteter Kräfte hervorgehen, so entspringen die Handlungen des Menschen mit gleicher Notwendigkeit dem Wechselspiel der einander verstärkenden oder widerstreitenden Motive, die teilweise mehr oder weniger bewußt, teilweise auch ihm unbewußt zur Wirksamkeit gelangen.

Mag auch bei dem ersten Anblick manche Handlung eines Menschen unerklärlich, rätselhaft, launisch erscheinen, beim näheren Zusehen gelingt es doch in vielen Fällen, sie als bedingt zu erkennen durch Ursachen, die in der besonderen Charakteranlage, der augenblicklichen Gemütsverfassung oder auch in besonderen äußeren Umständen liegen mögen, und in den übrigen Fällen haben wir allen Grund, anzunehmen, daß an der Schwierigkeit der Erklärung nicht das Fehlen eines Motivs, sondern nur die Mangelhaftigkeit unserer Kenntnisse von den Einzelheiten der Sachlage Schuld trägt, genau ebenso wie beim Würfelspiel trotz der anscheinenden Regellosigkeit der Würfe niemand an der strengen Gültigkeit des Kausalgesetzes für jeden einzelnen Wurf zweifelt. Mögen auch manchmal die Motive einer Handlung ganz im Dunkeln liegen, ein Handeln ganz ohne Motiv ist wissenschaftlich ebensowenig annehmbar wie ein absoluter Zufall in der unbelebten Natur.

Die schwierige Frage nach der Wechselwirkung zwischen physischen und psychischen Erscheinungen können wir dabei ganz aus dem Spiel lassen. Es genügt die Anerkennung des Satzes, daß jeder psychische Vorgang mit einem entsprechenden physischen Vorgang nach bestimmten Gesetzen zusammenhängt.

Da jede Handlung nicht nur durch vorangehende Motive kausal bedingt ist, sondern auch ursächlich auf das spätere Handeln einwirkt, so bildet sich aus dem Wechselspiel von Motiven und Handlungen eine endlose Kette von aufeinanderfolgenden Geschehnissen im geistigen Leben, in der jedes Glied sowohl mit den vorhergehenden als auch mit den folgenden durch strenge Kausalität verbunden ist.

Es hat zwar nicht an Versuchen gefehlt, den Zusammenhang dieser Glieder zu lockern. So hat noch Hermann Lotze in bewußtem Gegensatz zu Kant mit Nachdruck die Auffassung vertreten, daß eine solche kausale Kette zwar kein Ende wohl aber einen Anfang haben könne, mit anderen Worten, daß es, besonders in den Köpfen schöpferisch veranlagter Geister, unter Umständen zum Auftreten von Motiven komme, die völlig selbständig, ohne durch vorangehende Ursachen bedingt zu sein, zur Wirksamkeit gelangen und so das Anfangsglied einer neuen kausalen Kette darstellen.

Wenn sich in Wirklichkeit so etwas ereignen könnte, müßte es doch der unablässig daran arbeitenden wissenschaftlichen Forschung endlich einmal in irgendeinem Falle gelungen sein, dies wenigstens als glaubhaft hinzustellen. Aber es hat sich bisher nirgends ein Anhaltspunkt für das Vorhandensein solcher sogenannter „freier Anfänge" auffinden lassen. Im Gegenteil: je tiefer die Wissenschaft in die Einzelheiten der Entstehung auch der großen weltgeschichtlichen Geistesbewegungen einzudringen vermochte, desto deutlicher ist immer die kausale Bedingtheit, die Abhängigkeit von vorangehenden und vorbereitenden Faktoren ans Licht getreten, ja man wird schon heute geradezu sagen dürfen, daß umgekehrt die wissenschaftliche Forschung in einer kausalen Betrachtungsweise wurzelt, daß die Annahme einer ausnahmslosen Kausalität, eines vollkommenen Determinismus, die



Voraussetzung und die Vorbedingung für die wissenschaftliche Erkenntnis bildet.

Es versteht sich, daß wir bei diesen Schlußfolgerungen an keiner bestimmten Grenze stehen bleiben können, und daß wir uns nicht scheuen dürfen, sie auch auf die hervorragendsten Leistungen des menschlichen Geistes auszudehnen. So müssen wir unweigerlich zugeben, daß selbst der Geist eines jeden unserer allergrößten Meister, der Geist eines Kant, eines Goethe, eines Beethoven, sogar in den Augenblicken seiner höchsten Gedankenflüge und seiner tiefsten, innerlichsten Seelenregungen, dem Zwang der Kausalität unterworfen war, ein Werkzeug in der Hand des allmächtigen Weltgesetzes.

Eine derartige Behauptung gegenüber dem Erhabensten und Edelsten, was wir an den schöpferischen Leistungen des Menschengeschlechts bewundern und verehren, könnte leicht als eine ebenso unerträgliche wie wohlfeile Blasphemie erscheinen, wenn ihr nicht auf der anderen Seite die Erwägung gegenüberstände, daß wir gewöhnlichen Sterblichen ja gar nicht entfernt imstande sind, die hier in Rede stehenden Kausalzusammenhänge in ihren unendlichen Feinheiten wirklich zu durchschauen, ja daß der Unterschied zwischen der uns zu Gebote stehenden mehr beschreibenden und einer wirklich streng kausalen Betrachtungsweise noch ungeheuer viel größer sein mag als der zwischen der makroskopischen und der mikroskopischen Betrachtung des Physikers, die doch gleichwohl, wie wir gesehen haben, beide die strenge Gültigkeit des Kausalgesetzes zur Voraussetzung haben.

Aber hat es denn — so könnte man nun wohl fragen — überhaupt noch einen Sinn, von einem bestimmten Kausalzusammenhang zu reden, wenn niemand auf der Welt imstande ist, denselben wirklich als solchen zu begreifen?

An dieser Stelle offenbart sich besonders scharf die eigentliche Natur der Kausalität. Jawohl hat es einen Sinn, davon zu reden. Denn die Kausalität ist, wie wir wohl ausführlich genug besprochen haben, transzendental, sie ist ganz unabhängig von der Beschaffenheit des forschenden Geistes, ja sie würde auch beim vollständigen Fehlen eines erkennen-

den Subjekts ihre Bedeutung behalten. Und der deutliche Sinn des Kausalzusammenhangs ist in dem vorliegenden Falle der folgende.

Es läßt sich sehr wohl denken und ist vielleicht nicht einmal unwahrscheinlich, daß unser gegenwärtiger menschlicher Intellekt nicht der höchste ist, sondern daß an irgendeinem anderen Ort oder in irgendeiner anderen Zeitepoche Wesen vorkommen mögen, deren Intelligenz so hoch über der unsrigen steht, wie die unsrige etwa über derjenigen der Infusorien. Dann könnte es sich sehr wohl ereignen, daß vor dem scharfen Auge eines solchen Geistes, der ebensowohl den flüchtigsten Gedankenblitzen wie auch den feinsten Veränderungen in den Ganglien des menschlichen Gehirns im einzelnen zu folgen vermag — Emil du Bois-Reymond hat ihn in einer seiner bekannten Reden einmal nach dem Begründer der Himmelsmechanik einen „Laplaceschen Geist" genannt — auch die schöpferischen Leistungen unserer Geistesheroen sich ebenso festen, unwandelbaren Gesetzen untertan erweisen würden wie vor dem Fernrohr eines Astronomen unserer Tage die vielfältigen Bewegungen am gestirnten Himmel.

Wir müssen eben, wie überall, so auch bei den geistigen Vorgängen, unterscheiden zwischen der Gültigkeit und der Durchführbarkeit des Kausalgesetzes. Gültig bleibt das Kausalgesetz unter allen Umständen, vermöge seines transzendentalen Charakters, aber durchführbar ist es, wie in der Natur nur für einen mikroskopischen Beobachter, so in der Geisteswelt nur für einen Geist, dessen Intelligenz diejenige des zu erforschenden Geistes, des untersuchten Objekts, in einem gewissen, ungemein großen Abstand übertrifft. Je geringer diese Distanz sich erweist, um so unsicherer und lückenhafter wird die kausale und mit ihr die wissenschaftliche Betrachtungsweise. Daher allein rührt für uns die Schwierigkeit, ja die Unmöglichkeit, die Gedanken und Handlungen eines Genies unter dem Gesichtspunkt der Kausalität zu begreifen. Selbst ein kongenialer Geist muß sich bei dieser Aufgabe mit Andeutungen, Vermutungen und Analogieschlüssen behelfen, und dem Banausen gar wird das Genie immer ein verschlossenes Buch mit sieben Siegeln bleiben.



Deshalb ist aber doch auch der geistig höchststehende Mensch in allen seinen Betätigungen dem Kausalgesetz unterworfen, und man muß wenigstens im Prinzip stets mit der Möglichkeit rechnen, daß es eines Tages der unaufhaltsam tiefer dringenden und stetig sich verfeinernden wissenschaftlichen Forschung gelingen werde, auch die genialste menschliche Schöpfung in ihrer kausalen Bedingtheit zu verstehen. Denn das wissenschaftliche Denken verlangt nun einmal nach Kausalität, insofern ist wissenschaftliches Denken gleichbedeutend mit kausalem Denken, und das letzte Ziel einer jeden Wissenschaft besteht in der vollständigen Durchführung der kausalen Betrachtungsweise.

## V.

Wie steht es nun aber mit dem freien Willen? Ist denn für diesen neben der allumfassenden Kausalität überhaupt noch Platz vorhanden? — Indem wir uns jetzt dieser letzten, für uns heute wichtigsten Frage zuwenden, lassen Sie mich zunächst auf einen auffälligen Umstand hinweisen, welcher uns in diesem Zusammenhang jedenfalls allerlei zu denken gibt.

Wenn, wie wir soeben sahen, der blinde Zufall und das Wunder von der Wissenschaft grundsätzlich ausgeschlossen werden muß, so hat sie doch um so mehr Anlaß, sich mit dem Glauben an das Wunder zu beschäftigen. Denn daß dieser innerhalb der gesamten Menschheit von jeher die weiteste Verbreitung genießt, ist eine offenkundige, durch alle Jahrhunderte hindurch in unzähligen Formen sich immer wieder erneut bekundete Tatsache, die als solche der wissenschaftlichen, also kausalen Aufklärung dringend bedarf. Der Wunderglaube stellt bekanntlich in der menschlichen Kulturgeschichte eine reale Macht von ungeheurer Bedeutung vor, er hat eine Fülle von Segen gestiftet, er hat edle Männer zu den größten Heldentaten begeistert, er hat freilich auch, besonders da, wo er in Fanatismus ausartete, unermeßliches Unheil angerichtet, hat ganze Länder verwüstet und unzählige Unschuldige geopfert.

Nach dem Ergebnis unserer bisherigen Betrachtungen sollte man nun eigentlich erwarten, daß die fortschreitende wissen-

schaftliche Erkenntnis und ihre zunehmende Ausbreitung über alle Kulturvölker der Erde dem Wunderglauben allmählich einen mit der Zeit immer stärker anwachsenden Damm entgegensetzen würde. Aber nichts dergleichen ist zu verspüren, im Gegenteil: gerade in unserer Zeit, die sich ja doch auf ihre Fortgeschrittenheit so vieles zugute tut, treibt der Wunderglaube in den verschiedensten Formen als Okkultismus, Spiritismus, Theosophismus und wie die vielerlei Schattierungen alle heißen mögen, in weiten Kreisen Gebildeter und Ungebildeter sein Wesen ärger denn je, und trotzt hartnäckig den von wissenschaftlicher Seite gegen ihn gerichteten Abwehrversuchen, während dagegen die Bestrebungen des vor mehreren Jahren unter helltönenden Fanfarenklängen ins Leben gerufenen Monistenbundes, die darauf hinzielen, einer auf rein wissenschaftlicher Basis ruhenden Weltanschauung zur allgemeinen Anerkennung zu verhelfen, einen im Vergleich dazu nur recht dürftigen Erfolg aufzuweisen haben.

Wie ist diese eigentümliche Tatsache zu erklären? Sollte am Ende dem Wunderglauben, welche bizarren und unhaltbaren Formen er auch häufig annehmen mag, vielleicht doch irgendein berechtigtes Element innewohnen? Sollte etwa die Wissenschaft nicht in allen Fragen das letzte Wort haben? Oder deutlicher gesprochen: sollte der rein kausalen Denkweise an irgendeinem Punkte eine feste Grenze gesetzt sein, die sie nicht überschreiten kann?

Mit dieser Frage sind wir dicht vor dem Kernpunkt unseres heutigen Problems angelangt. Und wir brauchen jetzt nicht mehr weit nach der Antwort zu suchen, sie ist im Grunde schon in dem Vorhergehenden mit enthalten.

In der Tat, es gibt einen Punkt, einen einzigen Punkt in der weiten unermeßlichen Natur- und Geisteswelt, welcher jeder Wissenschaft und daher auch jeder kausalen Betrachtung nicht nur praktisch, sondern auch logisch genommen unzugänglich ist und für immer unzugänglich bleiben wird: dieser Punkt ist das eigene Ich. — Ein winziger Punkt, wie ich sagte, im Weltbereich, und doch wiederum eine ganze Welt, die Welt, die unser gesamtes Fühlen, Wollen und Denken umfaßt, die Welt, die neben dem tiefsten Leid die höchste Glückseligkeit in sich birgt, das einzige Besitztum, das uns keine Schicksalsmacht entreißen kann und das wir nur mit unserm Leben selber dereinst preisgeben.



Nicht als ob die eigene Innenwelt der kausalen Betrachtung überhaupt entzogen wäre. Grundsätzlich steht durchaus nichts im Wege, daß wir auch jedwedes eigene Erlebnis restlos in seiner streng kausalen Notwendigkeit begreifen. Aber dazu ist eine schwerwiegende Bedingung unerläßlich: wir müssen seit jenem Erlebnis ungeheuer viel klüger geworden sein; so klug, daß wir gegenüber unserm damaligen Zustande uns als mikroskopischer Beobachter, als ein Laplacescher Geist fühlen können. Denn nur dann ist jener Abstand, jenes Mindestmaß von Distanz zwischen dem erkennenden Subjekt und dem zu erforschenden Objekt gewahrt, das wir als unumgängliche Voraussetzung für die Durchführbarkeit der kausalen Betrachtung oben ausdrücklich festgestellt haben. Je geringer der Abstand genommen wird, das heißt, je vorzeitiger wir daran gehen, ein hinter uns liegendes Erlebnis kausal zu deuten, um so weniger vollkommen vermögen wir uns selber zu durchschauen, und wenn gar die Tätigkeit des Erkennens schon einen Teil des zu Erforschenden selber bildet, wird die kausale Betrachtung vollständig hinfällig und sogar geradezu sinnlos.

So ist also, möchte nun vielleicht mancher enttäuscht ausrufen, die Befreiung unseres Ich von den Ketten des Kausalgesetzes nur eine scheinbare, durch unsere mangelhafte Intelligenz bedingte? — Nichts wäre verkehrter als eine solche Ausdrucksweise. Sie wäre ebenso ungerechtfertigt, als wenn man etwa sagen wollte, das Unvermögen auch des gewandtesten Athleten, im Wettlauf seinen eigenen Schatten zu überholen, beruhe auf seiner mangelhaften Schnellfüßigkeit.

Nein, die Unmöglichkeit, das eigene gegenwärtige Ich dem Kausalgesetz zu unterstellen, liegt viel tiefer, sie ist logischen Ursprungs, von derselben Art wie der früher von mir erwähnte Satz, daß ein Teil niemals größer sein kann als das Ganze. Ihr unterliegt auch die höchste Intelligenz, ja selbst ein Laplacescher Geist. Denn mag dieser auch die genialsten Leistungen eines menschlichen Gehirns vollkommen kausal zu deuten, seine Kunst würde sofort versagen, wenn er ein-

mal darauf verfallen sollte, das Kausalgesetz auf seine eigene Denktätigkeit anzuwenden.

Freilich: daß ein an Weisheit uns himmelhoch überlegenes Wesen, welches jede Falte in unserm Gehirn und jede Regung unseres Herzens durchschauen kann, unsere Gedanken und Handlungen als kausal bedingt erkennen würde, das müssen wir uns schon gefallen lassen. Darin liegt aber keinerlei Herabwürdigung unseres berechtigten Selbstgefühls. Teilen wir doch diesen Standpunkt auch mit den Bekennern der erhabensten Religionen. Soweit wir dagegen selbst als erkennendes Subjekt auftreten, müssen wir auf eine rein kausale Beurteilung unseres gegenwärtigen Ich Verzicht leisten. Hier ist also die Stelle, wo die Willensfreiheit einsetzt und ihren Platz behauptet, ohne sich durch irgend etwas verdrängen zu lassen. Bei uns selbst dürfen wir an unbegrenzte Möglichkeiten, an die stärksten und seltsamsten schlummernden Kräfte, an jedes Wunder glauben, ohne je fürchten zu müssen, daß wir einmal mit dem Kausalgesetz in Konflikt geraten könnten.

Und was für die eigene Gegenwart gilt, gilt erst recht für die eigene Zukunft sowie für alle anderen zukünftigen Vorgänge, in welche Einflüsse von unserem gegenwärtigen Ich ausstrahlen. Denn da der Weg in die Zukunft stets an die Gegenwart anknüpft, so läßt sich auch die eigne Zukunft niemals rein kausal begreifen, und von dieser Seite her ist jedem unter uns unbenommen, seiner Phantasie den freiesten Spielraum zu gewähren und in seinen Zukunftgedanken gänzlich neue, ungeahnte Höhen zu erklimmen. Insofern wird das Gebiet, in welchem das Kausalgesetz seine Bedeutung verliert, besser als mit einem singulären Punkt mit einem kegelförmigen Gebilde verglichen, dessen Spitze im gegenwärtigen Ich liegt und das sich von da aus nach allen Richtungen in die Zukunft hinein verbreitert.

Es braucht aber kaum betont zu werden, daß die praktische Unbrauchbarkeit des Kausalgesetzes sich noch auf viel weitere Gebiete erstreckt als die hier behandelte prinzipielle. Das zeigt sich vor allem bei der Anwendung auf unsere Mitmenschen. Denn es wird niemand so eingebildet sein, daß er seinem Nebenmenschen gegenüber die Rolle eines



Laplaceschen Geistes zu spielen sich berufen fühlte. Andererseits sind wir aber doch, um überhaupt mit anderen verkehren zu können, darauf angewiesen, ihr Verhalten nach kausalen Gesichtspunkten zu beurteilen, damit wir die Motive ihrer Handlungen verstehen und gegebenenfalls nach unseren Wünschen beeinflussen können, und wir werden es im allgemeinen um so leichter haben, je weniger fein entwickelt deren Intelligenz gegenüber der unsrigen ist. Ebenso kann es leicht umgekehrt einmal vorkommen, wie jeder von seiner eigenen Kinderzeit her weiß, daß wir von einer überragenden Persönlichkeit den Eindruck haben, sie vermöge uns besser als wir sie zu durchschauen. Dann beschleicht uns eine Empfindung der Unsicherheit, wir müssen uns auf Überraschungen gefaßt machen, und es entspringt daraus je nach den Umständen das Gefühl mißtrauischer Angst oder hingebender Ehrfurcht.

## VI.

Bis zu diesem Punkte, meine Damen und Herren, hat uns eine rein wissenschaftliche Betrachtungsweise geleitet, aber hier fängt sie an, uns im Stich zu lassen. Denn wir sehen klar, daß das Kausalgesetz uns auf unserem eigenen Lebenspfad kein Führer sein kann, da es ja logisch genommen ausgeschlossen ist, daß wir jemals allein durch Überlegungen kausaler Art zu einer Einsicht in die Motive unserer zukünftigen Handlungen gelangen können.

Aber der Mensch braucht nun einmal Grundsätze, nach denen er sein Tun und Lassen einrichtet, er bedarf ihrer sogar noch viel dringender als der wissenschaftlichen Erkenntnis. Eine einzige Tat hat manchmal für ihn mehr Bedeutung als alle Wissenschaft der Welt zusammengenommen. Deshalb ist er genötigt, sich an dieser Stelle nach einer anderen Führung umzusehen, und eine solche findet er nur dadurch, daß er statt des Kausalgesetzes das Sittengesetz, die ethische Pflicht, den kategorischen Imperativ einführt. Dann tritt an die Stelle des kausalen „Muß“ das sittliche „Soll“, an die Stelle der Intelligenz der Charakter, an die Stelle der wissenschaftlichen Erkenntnis der religiöse Glaube. Hier wird die Aussicht frei, und es eröffnet sich dem denkenden und streben-

den Menschen eine Fülle von Weitblicken und brennenden Fragen.

Aber es gehört weder zu meiner Aufgabe, noch würde es meinen Kräften entsprechen, wenn ich hier etwa versuchen wollte, in eine nähere Würdigung des Wesens der Religion in ihren verschiedenen Formen einzutreten. Nur das eine liegt mir daran, hier hervorzuheben, daß mit einem streng wissenschaftlichen Standpunkt jedwede Religion vereinbar ist, falls und insofern sie nur weder mit sich selber noch mit dem Gesetz der kausalen Bedingtheit aller Außenvorgänge in Widerspruch tritt.

Wissenschaftlich unberechtigt und abzulehnen ist daher nach meiner Meinung auch eine Religion, die den Wert des Lebens verneint. Denn die Verneinung des Lebens bedeutet zugleich eine Verneinung des Denkens, und die Verneinung des Denkens bedeutet eine Verneinung der Religion. Mithin führt eine solche Religion konsequenterweise dazu, ihren eigenen Wert zu verneinen. Wer diese simple Schlußweise nicht anerkennen will, der muß entweder Denken ohne Leben oder Religion ohne Denken für möglich halten, beides Annahmen, die mir zu absonderlich scheinen, um bei ihnen länger zu verweilen.

Die Einsicht, daß wir auch in unserem sittlichen Handeln bestimmten, uns selber freilich im Augenblick unmöglich erkennbaren Kausalgesetzen unterworfen sind, ist nicht nur für die wissenschaftliche Erkenntnis von Bedeutung, sondern kann uns auch im praktischen Leben wertvolle Dienste leisten, wenn wir uns bemühen, Handlungen, die wir begangen haben, hinterher, so gut es eben geht, vom kausalen Gesichtspunkt zu begreifen, besonders in solchen Fällen, wo uns die Handlung nachträglich leid tut, wegen übler Folgen, die sie unerwarteter- und unbeabsichtigterweise nach sich gezogen hat. Freilich wird durch nachträgliches Analysieren der Ursachen fehlerhafter Handlungen weder der entstandene Schaden ersetzt noch die Unzufriedenheit behoben, ja es ist in gewisser Hinsicht sogar bedenklich, sich allzu lange und allzu tief zu versenken in Betrachtungen von bedauerlichen Ereignissen, die nun einmal geschehen und nicht mehr zu ändern sind. Aber auf der anderen Seite kann es uns doch



häufig eine wesentliche Erleichterung gewähren und zu einer Milderung des Verdrusses beitragen, wenn wir uns hinterher klarmachen können, daß unter den damaligen Umständen, bei unserer damaligen Gemütsverfassung und den vorliegenden äußeren Verhältnissen für uns gar keine anderen Motive entscheidend sein konnten als gerade diejenigen, die unsere Handlung herbeigeführt haben. Wird dadurch auch an den tatsächlich eingetretenen bedauerlichen Folgen nichts geändert, so stehen wir doch dem ganzen Ablauf der Dinge ruhiger gegenüber und ersparen uns namentlich das Bittere und unaufhörlich Nagende der Selbstvorwürfe, mit welchen sich manche Menschen in solchen Fällen durch ihr ganzes Leben lang quälen.

Zu Fatalisten werden wir dadurch noch lange nicht. Freilich liegt hier für oberflächlich Urteilende ein durch seine Bequemlichkeit verlockender, für das praktische Leben aber um so gefährlicherer Trugschluß nahe, ein Gedankengang, der auf den Versuch hinausläuft, unter Berufung auf die unbeschränkte Gültigkeit des Kausalgesetzes den Begriff der sittlichen Verantwortlichkeit abzuschwächen oder gar ganz zu leugnen. Den natürlichsten und zugleich stärksten Schutz gegen solche moralischen Verirrungen bildet für einen jeden immer die Stimme seines eigenen Gewissens. Aber auch derjenige, welchem eine einseitige Naturanlage oder eine allzu reichliche Beschäftigung mit unreifen sozialen Theorien die Unbefangenheit getrübt und die natürlichen Hemmungen beseitigt hat, sollte sich wenigstens verstandesmäßig klarmachen, daß das Kausalgesetz, wenn es nicht ausreicht, um uns als Richtschnur für unser absichtliches Handeln zu dienen, ja wenn es, wie wir gesehen haben, in der Anwendung auf unseren eigenen gegenwärtigen Seelenzustand für uns überhaupt ohne jeden Sinn ist, unmöglich herangezogen werden kann, um uns von der vollen sittlichen Verantwortung für Handlungen, die wir zu begehen im Begriff sind, zu entlasten.

Erst wenn eine Handlung vollzogen und endgültig abgeschlossen hinter uns liegt, sind wir zu dem Versuch berechtigt, sie von rein kausalen Gesichtspunkten aus zu verstehen, und können dann aus der Erkenntnis ihres kausalen Ursprungs häufig die Einsicht schöpfen, die uns nötig ist, um in zu-

künftig eintretenden ähnlich gearteten Fällen etwa gemachte Fehler zu vermeiden und keine neuen zu begehen. „Wer immer strebend sich bemüht, den können wir erlösen." Daß bei dem Glauben an uns selbst und an unsere eigene Zukunft das Kausalgesetz an sich auch dem kühnsten Optimismus keinerlei Schranken setzt, haben wir schon oben ausdrücklich hervorzuheben Gelegenheit gehabt.

Es kommt aber hier noch ein weiteres hinzu. Wenn wir beim Zurückblicken auf ein von uns als unliebsam empfundenes Ereignis uns ehrlich bemühen, über alle späteren Folgen desselben im einzelnen ins klare zu kommen, so können wir wohl einmal zu der Entdeckung geführt werden, daß ein Ereignis, das wir früher als ein Unglück beklagten, durch seine Folgen in Wirklichkeit zu unserem Vorteil ausgeschlagen ist, etwa dadurch, daß es nur ein für einen höheren Gewinn gebrachtes Opfer darstellt oder daß wir dadurch vor einem noch größeren Unglück bewahrt geblieben sind; dann wird vielleicht unser Bedauern über das Ereignis in Befriedigung verkehrt werden. In dieser Hinsicht hat der volkstümliche Spruch: „Wer weiß, wozu es gut ist" seine tiefe Bedeutung. Und wir können niemals wissen, ob nicht solche erfreulichen Folgen vielleicht erst zukünftig noch uns offenbar werden. Ja, grundsätzlich steht gar nichts im Wege anzunehmen, daß dieselben über kurz oder lang in jedem Falle eintreten, wenn wir auch nicht jedesmal Kenntnis von ihnen erhalten. Eine derartige, durch keine Wissenschaft und keine Logik zu widerlegende Auffassung kann nicht schöner ausgedrückt werden als in dem Wort des Paulus: „Denen, die Gott lieben, müssen alle Dinge zum Besten dienen." Wem es gelingt, sich bis zu dieser Lebensanschauung zu erheben, der ist wahrhaft glücklich zu preisen. Denn wie er stets empfänglich bleibt für alles Gute und Schöne, was ihm jeden Tag und jede Stunde begegnen kann, so darf er sich zugleich als von vornherein gefeit betrachten gegen alle Unbill, welche ihm in diesem wechselvollen Leben vielleicht noch beschieden sein mag. —

So hat uns, meine verehrten Damen und Herren, die Wissenschaft, deren Führung wir uns anvertrauten, schließlich bis an die Grenze geführt, wo ihre Leistungsfähigkeit versagt. Aber gerade deshalb, weil sie selber diese Grenze zeigt und



anerkennt, darf sie auch ihrerseits das Recht beanspruchen, Anerkennung und Achtung auf denjenigen Gebieten zu fordern, in denen sie allein zu herrschen befugt ist. Wissenschaft und Religion, sie bilden in Wahrheit keine Gegensätze, sondern sie benötigen einander in jedem ernsthaft nachdenkenden Menschen zu gegenseitiger Ergänzung. Es ist gewiß kein Zufall, daß gerade die größten Denker aller Zeiten zugleich auch tiefreligiös veranlagt waren, wenn sie auch ihr Heiligstes nicht gern öffentlich zur Schau trugen. Erst aus dem Zusammenwirken der Kräfte des Verstandes mit denen des Willens ersprießt der Philosophie ihre reifste, köstlichste Frucht: die Ethik. Denn auch die Wissenschaft fördert ethische Werte zutage, sie lehrt uns vor allem Wahrhaftigkeit und Ehrfurcht. Wahrhaftigkeit in dem unablässigen Vorwärtsdrängen zu immer genauerer Erkenntnis der uns umgebenden Natur- und Geisteswelt, Ehrfurcht bei dem sinnend verweilenden Blick auf das ewig Unergründliche, das göttliche Geheimnis in der eigenen Brust.

# Vom Relativen zum Absoluten.

(Gastvorlesung, gehalten in der Universität München, am 1. Dezember 1924.)

Eure Magnifizenz! Meine hochverehrten Damen und Herren! Es ist mir eine hohe Ehre und eine ganz besondere Freude, daß es mir durch eine freundliche Einladung verstattet ist, hier in diesem Hause, in dem ich vor fünfzig Jahren als akademischer Bürger einziehen durfte, in dem ich später den Doktorgrad und dann die venia legendi erwarb, wieder einmal das Wort ergreifen und über Gegenstände meiner Wissenschaft reden zu dürfen. Unwillkürlich lenkt sich dabei der Blick zurück auf den ehemaligen Stand der wissenschaftlichen Forschung und ermißt den gewaltigen Abstand, der sich bei der Vergleichung der beiderseitigen Bilder, dem von früher und dem von heute, dem inneren Auge offenbart. Wohl kaum in irgendeinem halben Jahrhundert hat die Physik ihr Antlitz so von Grund auf und so vollkommen unerwartet gewandelt. Als ich meine physikalischen Studien begann und bei meinem ehrwürdigen Lehrer Philipp v. Jolly wegen der Bedingungen und Aussichten meines Studiums mir Rat erholte, schilderte mir dieser die Physik als eine hochentwickelte, nahezu voll ausgereifte Wissenschaft, die nunmehr, nachdem ihr durch die Entdeckung des Prinzips der Erhaltung der Energie gewissermaßen die Krone aufgesetzt sei, wohl bald ihre endgültige stabile Form angenommen haben würde. Wohl gäbe es vielleicht in einem oder dem anderen Winkel noch ein Stäubchen oder ein Bläschen zu prüfen und einzuordnen, aber das System als Ganzes stehe ziemlich gesichert da, und die theoretische Physik nähere sich merklich demjenigen Grade der Vollendung, wie ihn etwa die Geometrie schon seit Jahrhunderten besitze.



Das war vor fünfzig Jahren die Anschauung eines auf der Höhe der Zeit stehenden Physikers. Zwar fehlte es schon damals in der physikalischen Wissenschaft nicht an gewissen dunklen, einer näheren Aufklärung bedürftigen Punkten, die in den behaglichen Zustand der Sättigung etwas Beunruhigendes brachten. So trotzte das sonderbare Verhalten des Lichtäthers hartnäckig allen auf seine Erklärung abzielenden Versuchen, und das Phänomen der um jene Zeit von Wilh. Hittorf entdeckten Kathodenstrahlen gab den Experimentatoren und den Theoretikern schwierige Rätsel auf. Noch Heinrich Hertz, das letzte strahlende Gestirn am Firmament der klassischen Physik, brachte die Kathodenstrahlen in Zusammenhang mit longitudinalen Ätherwellen, da es ihm mit den damals zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden nicht gelingen wollte, eine Einwirkung der Kathodenstrahlen auf eine Magnetnadel nachzuweisen, und er sich mit Recht sagte, daß eine solche Einwirkung notwendig vorhanden sein müßte, wenn die Kathodenstrahlen Träger des elektrischen Stromes wären.

Mit der Entdeckung der Elektronen, der Röntgenstrahlen und der Radioaktivität brach dann die neue Ära der Physik an, unter deren Eindruck wir heute stehen, und deren Auswirkungen noch durchaus nicht vollkommen übersehbar sind und sich jedenfalls noch auf lange Zeiträume erstrecken werden. Wenn ich es nun heute unternehme, Sie zu einem gemeinsamen Gange in die höheren Regionen der theoretischen physikalischen Forschung einzuladen, so schulde ich Ihnen vor allem ein Wort der Erklärung über die Bedeutung der wohl etwas abstrakt anmutenden Form, in die ich das Thema meines heutigen Vortrages fassen zu sollen glaubte, sowie über die Absichten, die mich bei der Wahl gerade dieses Themas geleitet haben, und über den Standpunkt, von dem aus ich an seine Behandlung heranzutreten gedenke. Dennoch möchte ich davon absehen, mich hier zu Anfang in eine allgemeine Begriffsbestimmung der Worte „relativ“ und „absolut“ zu vertiefen, und zwar einmal aus dem Grunde, weil ich überzeugt bin, auch bei der sorgfältigsten Auseinandersetzung doch nicht allen Ansprüchen an Vollständigkeit und Korrektheit genügen zu können, dann aber haupt-

sächlich deshalb, weil mir nicht an der Bezeichnung, sondern an der Sache liegt, und weil ich sehr gern bereit sein würde, die erstere jedweder Änderung zu unterwerfen, falls sich für dieselbe Sache ein treffenderer Ausdruck finden sollte. Auch werde ich weder einen besonderen Standpunkt meinen Ausführungen zugrunde legen, noch eine besondere Absicht von vornherein mit ihnen verbinden, sondern ich möchte mich vielmehr lediglich darauf beschränken, Ihnen aus dem uns vorliegenden tatsächlichen Entwicklungsgang der physikalisch-chemischen Forschung im letzten Jahrhundert einige bedeutungsvolle Erscheinungen vorzuführen, an ihnen gewisse gemeinsame Züge aufzusuchen und diesen gemeinsamen Zügen eine charakteristische Fassung zu geben. Wir wollen es daher auch vermeiden, von irgendwelchen vorbereitenden allgemeinen Betrachtungen auszugehen, sondern wollen möglichst unbefangen lediglich die Tatsachen selber auf uns wirken lassen und je nach dem Eindruck, den ihre Gesamtheit auf uns macht, uns unser Urteil bilden.

Ich beginne mit der Besprechung eines der elementarsten Begriffe der Chemie: des Begriffs des Atomgewichts. Bekanntlich ist schon in der griechischen Philosophie von Atomen die Rede, aber die Messung des Atomgewichts datiert erst seit der Entdeckung des Fundamentalsatzes der chemischen Stöchiometrie, des Satzes, daß alle chemischen Verbindungen nach ganz bestimmten Gewichtsverhältnissen erfolgen. So verbindet sich 1 g Wasserstoff stets gerade mit 8 g Sauerstoff zu Wasser, mit 35,5 g Chlor zu Chlorwasserstoff usw. Daher ist 8 g das Äquivalentgewicht des Sauerstoffs, 35,5 g das Äquivalentgewicht des Chlors, und ebenso läßt sich für jedes chemische Element aus einer jeden Verbindung, die es mit einem anderen Element eingehen kann, ein Äquivalentgewicht ableiten. Natürlich gelten diese Zahlen nur dann, wenn man den Wasserstoff als Einheit wählt; insofern steckt in ihnen eine gewisse Willkür. Aber noch mehr. Ihre Bedeutung beschränkt sich zunächst durchaus auf die speziellen Verbindungen, aus denen sie abgeleitet sind. Das Äquivalentgewicht 8 des Sauerstoffs gilt nur in bezug auf Wasser. Nimmt man statt Wasser eine andere Verbindung mit Sauerstoff, etwa Wasserstoffsuperoxyd, so wird das



Äquivalentgewicht des Sauerstoffs 16. Es ist von vornherein kein prinzipieller Grund vorhanden, die eine Zahl vor der anderen zu bevorzugen. Jedes Element besitzt daher im allgemeinen mehrere verschieden große Äquivalentgewichte, ja prinzipiell genommen so viele, als es Arten von Verbindungen eingehen kann. Wenn von einem Element überhaupt keine Verbindung bekannt ist, fehlt es auch an jedem Anhaltspunkt, ihm ein Äquivalentgewicht zuzuschreiben.

Nun hat sich aber die wichtige Tatsache ergeben, daß bei den verschiedenen Verbindungen, welche ein Element mit anderen Elementen eingehen kann, immer die nämlichen Zahlen für das Äquivalentgewicht oder auch ganze Multipla derselben wiederkehren. So gilt das Äquivalentgewicht 35,5 für Chlor nicht nur für die Verbindung mit 1 g Wasserstoff zu Chlorwasserstoff, sondern auch für die Verbindung mit 8 g Sauerstoff zu Chloroxyd. Will man dieses regelmäßige Zusammentreffen nicht als unbegreiflichen Zufall ansehen, so liegt es nahe, dem Begriff des Äquivalentgewichtes eine selbständigere Bedeutung zu geben, ihn abzulösen von der Frage nach den Verbindungen, welche das Element mit anderen Elementen eingehen kann, und ihm damit in gewissem Sinne einen absoluten Charakter zu verleihen. Das ist auch in der Tat sehr bald geschehen, nur blieb dabei noch eine gewisse Schwierigkeit übrig, die in der Chemie längere Zeit hindurch als besonders lästig empfunden wurde und die daher rührt, daß zwei Elemente häufig mehrere verschiedenstufige Verbindungen miteinander eingehen können, wie zum Beispiel Wasserstoff und Sauerstoff, so daß man nicht weiß, ob für das Äquivalentgewicht des Sauerstoffs 8 g oder 16 g zu nehmen ist. Um hier zu einer klaren Entscheidung zu kommen, bedarf es einer neuen, der Stöchiometrie an sich fremden Idee, eines neuen Axioms, und dieses Axiom fand sich in der Hypothese von Avogadro. Dieselbe gründet sich auf die von Gay-Lussac festgestellte Tatsache, daß zwei Elemente im Gaszustand sich nicht nur nach bestimmten Gewichtsverhältnissen, sondern auch, bei gleicher Temperatur und gleichem Druck genommen, nach bestimmten Volumenverhältnissen verbinden, und sie greift aus der Schar der verschiedenen für einen Stoff in Betracht kommenden

Äquivalentgewichte ein ganz bestimmtes heraus, das sie als Molekulargewicht bezeichnet, indem sie das Verhältnis der Molekulargewichte zweier Gase allgemein gleichsetzt dem Verhältnis ihrer Dichten. In dieser Definition ist keine Rede mehr von chemischen Reaktionen, sondern nur von chemischen Stoffen. Daher läßt sie sich auch anwenden auf Elemente, die sich, wie die Edelgase, nur schwer oder überhaupt nicht mit anderen Stoffen verbinden.

Da nach dem Avogadroschen Satze die Moleküle der chemischen Elemente häufig nicht als Ganzes, sondern nur mit einem Bruchteil ihres Gesamtgewichts in die Moleküle ihrer Verbindungen eingehen, wie zum Beispiel das Molekül des Wasserdampfes aus einem ganzen Molekül Wasserstoff und einem halben Molekül Sauerstoff, das Molekül des Chlorwasserstoffs aus je einem halben Molekül Wasserstoff und Chlor sich zusammensetzt, so gelangt man von dem Molekulargewicht zum Atomgewicht eines Elements als dem kleinsten Bruchteil, in den genannten Beispielen der Hälfte, des Molekulargewichts, welcher sich in den Verbindungen des Elements vorfindet.

Wenn somit durch die Avogadrosche Definition der Begriff des Atomgewichts eine gewisse absolute Bedeutung gewonnen hat, so haftet ihm doch in dieser Fassung noch etwas merklich Relatives an. Denn das Avogadrosche Atomgewicht bedeutet nur eine Verhältniszahl, es bedarf zu seiner Bestimmung noch der willkürlichen Festsetzung des Atomgewichts für irgendein spezielles Element, etwa Wasserstoff gleich 1 g, oder Sauerstoff gleich 16 g. Ohne die Bezugnahme auf diese Festsetzung haben die Zahlen für das Atomgewicht keinen Sinn. Daher war von jeher das Interesse zahlreicher Forscher darauf gerichtet, den Begriff des Atomgewichts auch von dieser letzten Beschränkung zu befreien und seine Bedeutung in einem noch weiteren Sinne zu einer absoluten zu machen — ein Problem, das allerdings für die praktischen Bedürfnisse der Chemiker weniger in Betracht kommt, da es sich in der eigentlichen Chemie immer nur um die Verhältnisse von Gewichtsmengen handelt.

Wohl in jeder Wissenschaft kommt es gelegentlich zu einem Konflikt zwischen den Forschern, welche bemüht sind, die



anerkannten Axiome der Wissenschaft zu ordnen, zu analysieren und von allen mehr zufälligen und fremdartigen Bestandteilen zu säubern — ich will sie hier einmal als Puristen bezeichnen —, und solchen Forschern, die darauf ausgehen, die vorliegenden Axiome durch Einführung neuer Ideen zu erweitern, und die daher gern nach verschiedenen Richtungen tastende Fühler ausstrecken, um zu erkunden, nach welcher Seite wohl ein Fortschritt zu erzielen wäre. So hat es auch in der Chemie nicht an Puristen gefehlt, welche alle Versuche scharf verurteilten, in dem Atomgewicht mehr zu sehen als eine bloße Verhältniszahl, während dagegen gerade die führenden Chemiker es zum mindesten nützlich fanden, die Atome im Sinne der mechanischen Naturanschauung als selbständige winzige Gebilde zu betrachten, die im Molekül nach bestimmten räumlichen Abmessungen angeordnet sind und sich bei einer eintretenden chemischen Änderung entsprechend trennen oder umgruppieren. Ich selber entsinne mich von meiner Münchener Zeit her, aus dem Anfang der achtziger Jahre, noch lebhaft des Eindrucks, den hier im chemischen Universitätslaboratorium die Polemik des damaligen Wortführers der puristisch denkenden Chemiker, Hermann Kolbe in Leipzig, hervorrief, der über die bis ins einzelne gehenden mechanisch-atomistischen Vorstellungen, zu welchen die Ausbildung der chemischen Konstitutionsformeln Anlaß gab, sein heiliges Anathema aussprach und sich in demselben Maße, in welchem die erwartete Wirkung ausblieb, in eine immer schärfere Tonart hineinredete. Derartigen heftigen, schließlich sogar persönliches Gebiet berührenden Angriffen gegenüber tat Adolf von Baeyer das, was unter diesen Umständen das beste war: er schwieg und arbeitete weiter, bis der Erfolg ihm recht gab. Ein ähnliches Bild gewahren wir heute in dem Kampfe um das Atommodell von Niels Bohr, das allerdings an den guten Willen des Theoretikers noch weit höhere Ansprüche stellt als früher die Hypothesen der Strukturchemie.

Aber auch vom philosophischen Standpunkt aus setzten die Puristen jahrzehntelang der Ausbildung der atomistischen Theorie hartnäckigen Widerspruch entgegen. Hier ist vor allem Ernst Mach zu nennen, der zeit seines Lebens nicht

müde wurde, mit den scharfen Waffen seiner Begriffsanalyse und gelegentlich auch seiner Ironie die naiven und rohen Anschauungen in Mißkredit zu bringen, welche er den Anhängern der Atomistik zum Vorwurf machte, und die nach seiner Meinung zu der sonstigen philosophischen Entwicklung der modernen Physik in einem eigentümlichen Gegensatz standen.

Gegen solche Angriffe hatten die Vertreter der atomistischen Theorie, zu denen in erster Linie Ludwig Boltzmann zählte, schon deshalb einen schweren Stand, weil sich mit Mitteln der Logik gegen die Puristen überhaupt niemals etwas ausrichten läßt, aus dem einfachen Grunde, weil die Puristen ja gerade ihrerseits alles dasjenige vertreten und verfechten, was aus den anerkannten Axiomen ihrer Wissenschaft auf logischem Wege gefolgert werden kann. Was sie verwerfen, ist nur das Eindringen neuer, fremdartiger Axiome, besonders wenn diese sich noch nicht zu einer endgültigen, allgemein brauchbaren Fassung verdichtet haben. Nun ist aber noch kein einziges Axiom als ein fertiges System, wie Pallas Athene aus dem Haupte des Zeus, entsprungen, sondern es lebt zunächst nur unvollkommen, ja oft mehr oder weniger unklar in der Phantasie seines Erzeugers, und erblickt häufig erst nach schweren Geburtswehen das Licht der Öffentlichkeit, indem es eine wissenschaftlich brauchbare Form annimmt. Und selbst wenn es allgemeinere Anerkennung errungen hat, braucht der Purist sich noch lange nicht für überwunden zu erklären. Denn die Frage des endgültigen Erfolges eines neuen physikalischen Axioms wird gar nicht auf logischem Gebiete entschieden, sondern nur dadurch, daß gewisse empirische Gesetzmäßigkeiten ohne das Axiom nicht zu verstehen sind. Dann bleibt den Puristen nichts anderes übrig, als solche Gesetzmäßigkeiten für Zufall zu erklären. Auf diese Behauptung können sie sich allerdings unter allen Umständen als auf die letzte unangreifbare Position zurückziehen, während die wissenschaftliche Forschung sich dann um solchen Widerstand nicht weiter kümmert und auf ihrem Wege fortschreitet. So ist es oft gegangen, und so wird es wohl noch oft gehen.

Im vorliegenden Falle wurden derartige empirische Gesetzmäßigkeiten allmählich in derartiger Fülle festgestellt, daß



die Frage nach der Existenz einer absoluten Größe des Atomgewichts sehr bald in positivem Sinne entschieden wurde. Ich brauche hier nur auf die Entwicklung der kinetischen Theorie der Gase und Flüssigkeiten, auf die Gesetze der Licht- und Wärmestrahlung, auf die Entdeckung der Kathodenstrahlen und der Radioaktivität, auf die Messung des elektrischen Elementarquantums hinzuweisen, welche alle auf den verschiedensten Wegen zu dem nämlichen Wert des Atomgewichts führen. Heute wird kein Physiker Einspruch erheben gegen die Behauptung, daß das Gewicht eines Atoms Wasserstoff, abgesehen von unvermeidlichen Messungsfehlern, 1,65 Quadrilliontel Gramm beträgt, eine Zahl, deren Bedeutung unabhängig ist von den Atomgewichten anderer chemischer Elemente und die in diesem Sinne als eine absolute Größe bezeichnet werden kann.

Meine Damen und Herren! Ich bitte um Vergebung, wenn ich mir hier erlaubt habe, Sie an allerlei Bekanntes zu erinnern. Es geschah dies wahrlich nicht in der Absicht, Sie zu belehren, sondern nur deshalb, um Ihren Blick zu schärfen für eine charakteristische Erscheinung in der Entwicklung der wissenschaftlichen Forschung, welche sich in verschiedenem Zusammenhang immer wieder beobachten läßt. Denn auf jedem Gebiet der Wissenschaft wird mit Axiomen gearbeitet, und auf jedem Gebiet gibt es Puristen, welche sich jeder über das Formal-Logische hinausgehenden Erweiterung der anerkannten Axiome mit allen Mitteln zu widersetzen geneigt sind.

Indem ich nun daran gehe, Ihnen andere Fälle vorzuführen, werde ich schließlich zur Besprechung von Fragen gelangen, die nicht so klar und abgeschlossen liegen wie die bisher behandelten, und um die daher auch heute noch lebhafte Kämpfe geführt werden.

Ich wende mich zunächst zu dem Begriff der Energie. Das Prinzip der Erhaltung der Energie hat sich entwickelt aus dem mechanischen Prinzip der lebendigen Kraft, welches besagt, daß die bei irgendeinem mechanischen Vorgang eintretende Zunahme der lebendigen Kraft eines bewegten Körpers gleich ist der Abnahme des Potentials der auf den Körper wirkenden Kräfte. Die Änderung der einen Energie-

art, der kinetischen Energie, wird also gerade kompensiert durch eine ebenso große Änderung der anderen Energieart, der potentiellen Energie. Auch hier können die Puristen in gewissem Sinne mit vollem Rechte die Behauptung aufstellen, daß, da in der Formulierung des Energieprinzips nur von Energiedifferenzen die Rede ist, auch der Begriff der Energie sich nicht auf einen Zustand, sondern auf eine Zustandsänderung bezieht, und daß daher in dem Werte der Energie eine additive Konstante unbestimmt bleibt, nach deren Größe zu fragen gar keinen physikalischen Sinn hat, ebenso etwa wie es bei dem Bau eines Hauses für den Architekten keinen praktischen Sinn hat, nach der Höhe der einzelnen Stockwerke über dem Meeresspiegel zu fragen, da es auch hier nur auf die Differenzen ankommt.

Gegen einen solchen Standpunkt ließe sich auch nicht das mindeste einwenden, wenn das Prinzip der Erhaltung der Energie das einzige Axiom der Physik wäre. Da das aber nicht der Fall ist, so kann man die Frage jedenfalls nicht kurzerhand abweisen, ob es sich nicht doch empfiehlt, dem Begriff der Energie durch Einführung eines neuen Axioms insofern eine absolute Bedeutung zuzuschreiben, als man ihre Größe durch den augenblicklichen Zustand als vollkommen bestimmt ansieht. Die große Vereinfachung, die sowohl der Begriff der Energie als auch die Anwendung des Energieprinzips durch eine solche Auffassung erfahren würde, liegt auf der Hand. In der Tat ist dieselbe heute vollständig zur Durchführung gelangt. Wir dürfen bei jedem physikalischen Gebilde in einem gegebenen Zustande in ganz bestimmtem Sinne von der Größe seiner Energie sprechen, ohne irgendeine additive Konstante.

Nehmen wir zuerst die elektromagnetische Energie im reinen Vakuum. Hier besteht das Axiom, welches den Absolutwert der Energie festlegt, darin, daß die Energie des elektromagnetisch neutralen Feldes gleich Null gesetzt wird. Dieser Satz ist weder selbstverständlich, noch aus dem Energieprinzip an sich ableitbar. Noch vor wenig Jahren hat Nernst die Hypothese aufgestellt, daß im sogenannten neutralen Felde eine gewisse stationäre Energiestrahlung von ungeheuer großem Betrage, die sogenannte Nullpunktsstrahlung, vorhanden ist, welche sich zwar bei den gewöhnlich beobachtbaren Vorgängen nicht bemerklich macht, weil sie alle Körper gleichmäßig durchdringt, aber doch unter besonderen Umständen in Erscheinung treten kann, ähnlich wie der Luftdruck, obwohl er eine sehr beträchtliche Kraft darstellt, bei den meisten Bewegungen, die wir beobachten, keine Rolle spielt, da er überall nach allen Richtungen gleichmäßig wirkt. Eine solche Strahlungshypothese ist also von vornherein durchaus berechtigt, über ihre Bedeutung kann nur die Verfolgung ihrer Konsequenzen entscheiden, zu deren bedenklichsten jedenfalls die gehört, daß sie ein spezielles Bezugssystem als ruhend auszeichnen würde, nämlich dasjenige, in welchem die Nullpunktsstrahlung nach allen Richtungen gleich groß ist. Durch die absolute Energie des neutralen Feldes ist natürlich auch die absolute Energie jedes anderen elektromagnetischen Feldes festgelegt.



Gehen wir weiter zur Energie der Materie, so können wir auch für diese zu einem bestimmten Absolutwert gelangen. Aber die Energie eines ruhenden Körpers ist nicht etwa gleich Null, wie man vielleicht nach Analogie des elektromagnetisch neutralen Feldes mutmaßen könnte, sondern sie ist gleich dem Produkt seiner Masse und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Es ist die sogenannte Ruheenergie des Körpers; sie wird bedingt durch seine chemische Beschaffenheit und durch seine Temperatur. Wird der Körper durch eine Kraft in Bewegung gesetzt, so macht sich diese Größe, die im allgemeinen einen ungeheuer großen Zahlenwert besitzt, gar nicht geltend, weil es sich hierbei nur um Energiedifferenzen handelt. Daß solche eigenartigen Anschauungen nicht aus dem Energieprinzip allein gewonnen werden können, habe ich schon oben betont. Tatsächlich wurzeln sie in der speziellen Relativitätstheorie. Es muß ein merkwürdiges Zusammentreffen genannt werden, daß gerade eine Theorie der Relativität zur Bestimmung des Absolutwerts der Energie eines physikalischen Gebildes geführt hat. Das scheinbar Paradoxe dieser Gegenüberstellung erklärt sich einfach daraus, daß es sich in der Relativitätstheorie um die Abhängigkeit von dem gewählten Bezugssystem, hier dagegen

um die Abhängigkeit von dem physikalischen Zustand des betrachteten Gebildes handelt.

Aber hat es denn wirklich, so könnten die Puristen nun wohl fragen, irgendeinen vernünftigen Sinn, zu sagen, daß die Energie eines Sauerstoffatoms 16mal so groß ist als die eines Wasserstoffatoms? Und sie hätten gewiß recht, wenn es schlechthin unsinnig wäre, von einer Umwandlung des Sauerstoffs in Wasserstoff zu reden. Indessen ist es doch immer bedenklich, etwas für sinnlos zu erklären, solange es keinem Gesetze der Logik widerspricht, und wir tun daher besser, wenn wir abwarten, ob vielleicht nicht doch einmal eine Zeit kommt, wo die Frage einer derartigen Umwandlung eine vernünftige Bedeutung gewinnt. Anzeichen dafür sind schon heute vorhanden.

Wie bei der elektromagnetischen und bei der kinetischen Energie, so ist man auf allen Gebieten der Physik, in der Mechanik wie in der Elektrodynamik, von der Betrachtung der Energiedifferenzen, welche unmittelbar durch Messung gewonnen werden, zur Betrachtung der Absolutwerte der Energie geleitet worden. Stets wurde durch dieses Verfahren ein merklicher Fortschritt der Theorie erzielt. Bei den Erscheinungen der strahlenden Wärme zum Beispiel hat man es strenggenommen immer nur mit den Differenzen der absorbierten und der emittierten Strahlung zu tun. Denn ein Körper, der Wärmestrahlen absorbiert, emittiert auch solche. Aber man trennt nach der Theorie von Prévost diese beiden Größen voneinander und legt jeder derselben eine selbständige Bedeutung bei. Beim Galvanismus mißt man nur Potentialdifferenzen, aber man spricht auch vom Absolutwert des Potentials, indem man das Potential in unendlicher Entfernung von allen elektrischen Ladungen gleich Null setzt. Bei der Emission monochromatischer Strahlung in einem Atom erhält man durch die Messung der emittierten Frequenz immer nur die Differenz der Atomenergie vor und nach der Emission, aber erst durch die Trennung der beiden Glieder dieser Differenz, der sogenannten Terme, und ihrer Einzeluntersuchung ist es Niels Bohr für die Gebiete der sichtbaren, Arnold Sommerfeld für die der Röntgenstrahlen gelungen, die Anhaltspunkte zu finden für die Enträtselung der hier verborgenen Fragen. So hat überall der Begriff der Energie eines Gebildes in einem bestimmten Zustande eine absolute, von der Bezugnahme auf andere Zustände unabhängige Bedeutung gewonnen.



Diese Tendenz, von der Differenz auf die einzelnen Terme überzugehen oder, was auf dasselbe herauskommt, von dem Differential auf das Integral, findet sich wie bei der Energie so auch bei vielen anderen physikalischen Größen. So werden in der Elastizitätstheorie die Volumkräfte zurückgeführt auf Flächenkräfte, in der Elektrodynamik die ponderomotorischen elektrischen und magnetischen Kräfte auf die sogenannten Maxwellschen Spannungen, in der Thermodynamik die Druck- und Temperaturgrößen auf die thermodynamischen Potentiale. Immer handelt es sich dabei um einen Aufstieg oder um ein Integrationsverfahren, und die Frage nach dem Absolutwert der so gewonnenen Größen höherer Stufe fällt zusammen mit der Frage nach der Bestimmung der Integrationskonstanten, deren Beantwortung stets eine besondere Untersuchung erheischt.

Bei einem dieser Fälle, der deshalb besonderes Interesse beansprucht, weil er auch gegenwärtig noch nicht als endgültig erledigt betrachtet werden kann, möchte ich hier noch ein wenig verweilen. Es handelt sich um den Absolutwert der Entropie. Nach der ursprünglichen Definition von Rudolf Clausius bedarf es zur Messung der Entropie eines Körpers der Ausführung irgendeines reversiblen Prozesses, aus welchem dann die Differenz der Entropie im Anfangszustand und im Endzustand des Prozesses abgeleitet werden kann. Die Folge war, daß man anfänglich den Begriff der Entropie nicht auf einen Zustand, sondern auf eine Zustandsänderung bezog, genau wie man das früher beim Atomgewicht und bei der Energie getan hatte, und zwar legte man ihm nur für reversible Prozesse eine Bedeutung bei. Indessen dauerte es doch nicht lange, bis sich eine erweiterte Auffassung durchsetzte, und man lernte die Entropie als eine Eigenschaft des augenblicklichen Zustandes betrachten, in der allerdings eine additive Konstante unbestimmt blieb, da man immer nur Entropiedifferenzen messen konnte. Auch wenn man nach dem Vorgange Einsteins den Begriff der

Entropie auf die Statistik der zeitlichen Schwankungen eines physikalischen Gebildes um seinen thermodynamischen Gleichgewichtszustand gründet, gelangt man immer nur zu Entropiedifferenzen, niemals zu einem Absolutwert der Entropie.

Gibt es aber nun nicht doch einen Weg, um ebenso wie für die Energie, so auch für die Entropie einen absoluten Wert zu finden? Es liegt mir fern, lediglich aus Gründen der Analogie diese Frage zu bejahen, und man muß den Puristen darin unbedingt beipflichten, wenn sie betonen, daß es im allgemeinen gar keinen Sinn hat, aus dem Werte einer Differenz auf die Werte der beiden Terme, des Minuend und des Subtrahend einzeln, schließen zu wollen. Im Interesse einer klaren Begriffsbildung ist es sogar durchaus notwendig, in jedem Falle genau festzustellen, was man aus einer Definition herausholen kann und was nicht. In dieser Hinsicht ist die Kritik der Puristen unentbehrlich. Sie erweisen sich dabei als die gewissenhaften Wächter für die Ordnung und Sauberkeit in der Methodik des wissenschaftlichen Arbeitens, die wir unter keinen Umständen missen wollen, heutzutage weniger als je. Aber die Physik ist nun einmal keine deduktive Wissenschaft, und die Anzahl ihrer Axiome ist keine festliegende. Wenn ein neues Axiom sich meldet, soll man ihm nicht lediglich deshalb den Einlaß wehren, weil es fremd ist, sondern man soll erst prüfen, welchen Ideen es entspringt und zu welchen Folgerungen es führt.

Im vorliegenden Falle ist es nicht schwierig, der Idee, welche der Annahme eines Absolutwertes der Entropie zugrunde liegt, eine deutliche und anschauliche Fassung zu geben. Wenn wir mit Boltzmann die Entropie als ein Maß für die thermodynamische Wahrscheinlichkeit ansehen, so bedeutet die Entropie eines im thermodynamischen Gleichgewicht befindlichen physikalischen Gebildes von vielen Freiheitsgraden, welches mit einer bestimmten Energie ausgestattet ist, nichts anderes als die Anzahl der verschiedenartigen Zustände, die ein solches Gebilde unter den gegebenen Bedingungen annehmen kann. Und wenn die betrachtete Entropie einen absoluten Wert besitzt, so heißt dies, daß die Anzahl der unter den gegebenen Bedingungen möglichen Zustände eine ganz bestimmte, endliche ist.



Zu den Zeiten von Clausius, Helmholtz und Boltzmann wäre freilich eine solche Behauptung unzweifelhaft auf der Stelle als völlig unannehmbar abgewiesen worden. Denn solange man in den Differentialgleichungen der klassischen Dynamik die einzige Grundlage der Physik erblickte, mußte man notgedrungen die Zustände als stetig veränderlich und daher die Anzahl der bei gegebenen äußeren Bedingungen möglichen Zustände als unendlich groß betrachten. Seit der Einführung der Quantenhypothese ist das aber anders geworden, und nach meiner Meinung kann es nicht mehr lange dauern, bis die Behauptung, daß man in einem ganz bestimmten Sinne von einer diskreten Anzahl möglicher Zustände und dementsprechend von der absoluten Größe der Entropie reden kann, den Widerspruch überwunden haben wird, der ihr gegenwärtig von seiten angesehener Physiker noch entgegengesetzt wird.

In der Tat hat das neue Axiom bereits Leistungen aufzuweisen, welche mit denen der bestbewährten Theorien wetteifern können. Auf dem Gebiet der strahlenden Wärme hat es zur Aufstellung des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum geführt, im Gebiet der Thermodynamik findet es seinen Ausdruck in dem vielfach erprobten und bewährten Nernstschen Wärmetheorem, das es insofern noch weiter ergänzt, als sich nicht nur die Existenz, sondern auch die numerische Größe der sogenannten chemischen Konstanten daraus ableiten läßt, bei den Problemen des Atombaues hat es den Ideen von Niels Bohr den Ausgangspunkt für die Festlegung der sogenannten stationären Elektronenbahnen und damit die Vorbedingung für die Entwirrung der spektroskopischen Phänomene geliefert, ja wenn nicht alle Anzeichen trügen, so bereitet sich mit seiner weiteren Durchführung ein Prozeß vor, den man in gewissem Sinne geradezu als eine Arithmetisierung der Physik bezeichnen kann, da hierbei eine Reihe von physikalischen Größen, die man bisher ohne weiteres als stetig veränderlich betrachtet hat, sich unter der Lupe einer schärferen Analyse als diskret und abzählbar herausstellen. Ganz in dieser Richtung liegt das merkwürdige Ergebnis der unlängst im Utrechter physikalischen Institut auf Anregung seines Leiters L. S. Ornstein

ausgeführten Messungen, daß die Intensitätsverhältnisse der Komponenten von Spektralmultipletts durch einfache ganze Zahlen wiedergegeben werden, sowie der neuerdings von Max Born ausgearbeitete interessante Versuch, die Differentialgleichungen der klassischen Mechanik durch Differenzengleichungen zu ersetzen.

Meine Damen und Herren! Unsere bisherigen Betrachtungen haben uns an einigen der Geschichte der Physik entnommenen Fällen einen übereinstimmenden Zug erkennen lassen, der sich etwa dahin formulieren läßt, daß gewisse physikalische Größen, denen man nach ihrer ursprünglichen Begriffsbestimmung nur einen relativen Wert beimessen konnte, im Laufe der fortschreitenden Entwicklung der Wissenschaft eine selbständige absolute Bedeutung angenommen haben. Darf man diesen Zug als charakteristisch für den Fortschritt der physikalischen Forschung überhaupt ansehen? Es wäre voreilig, diese Frage ohne weiteres zu bejahen. Ja, ich könnte mir sehr wohl denken, daß ein Gegner dieser Ansicht sich vielleicht veranlaßt fühlte, seinerseits das Wort zu ergreifen und sozusagen einen Gegenvortrag gegen den meinigen zu halten mit dem umgekehrten Titel: Vom Absoluten zum Relativen. Und er würde es durchaus nicht schwer finden, geeignetes Material für die Verfechtung seines Standpunktes herbeizuschaffen. Er würde vielleicht ebenso wie ich mit dem Begriff des Atomgewichts beginnen, indem er etwa folgendes ausführte: Die Zahl, die wir vorhin als das absolute Gewicht eines Atoms bezeichnet haben, ist bei den meisten Elementen tatsächlich mitnichten eine absolute Größe. Denn da ein Element in der Regel mehrere Isotope mit verschiedenem Atomgewicht besitzt, so stellt das gemessene Atomgewicht einen mehr oder minder zufällig zustande gekommenen Mittelwert vor, der ganz davon abhängt, in welchem Mischungsverhältnis die verschiedenen Isotope in dem untersuchten Präparat vertreten sind. Und selbst wenn wir ein einzelnes Isotop ins Auge fassen, so wäre es vom Standpunkt unserer heutigen Kenntnisse ganz unwissenschaftlich, dasselbe als etwas Absolutes zu betrachten. Vielmehr entspricht es den neuesten, durch die zuerst von Ernest Rutherford ausgeführte Zertrümmerung von Atomkernen aufs beste gestützten Anschauungen, die alte Proutsche Hypothese wieder aufzunehmen und sämtliche chemischen Elemente als aus einem einzigen, dem Wasserstoff, aufgebaut anzusehen. Damit wird aber dem Begriff des Atomgewichts grundsätzlich der absolute Charakter entzogen und derselbe zu einer reinen Verhältniszahl gestempelt.



Nach diesem augenscheinlichen Erfolg würde dann mein Gegner vielleicht dazu übergehen, seinen Haupttrumpf auszuspielen: die Einsteinsche allgemeine Relativitätstheorie. Hier würde wohl allein schon die Nennung des Stichwortes genügen, um jeden Versuch, bei den Begriffen „Raum" und „Zeit" noch von etwas Absolutem zu reden, als antiquiert und rückständig erscheinen zu lassen.

Aber man soll sich wohl hüten, aus Worten und aus Bezeichnungen, die vielleicht nicht immer in jeder Hinsicht glücklich gewählt sind, sachliche Folgerungen abzuleiten. Daß die Relativitätstheorie tatsächlich zur Auffindung eines Absolutwertes der Energie geführt hat, ist schon früher zur Sprache gekommen, und es würde von recht oberflächlicher Denkweise zeugen, wenn man bei der Erkenntnis der Notwendigkeit einer Relativierung von Raum und Zeit stehenbliebe und nicht noch weiter fragen würde, wohin denn diese Relativierung führt. Sicherlich ist es häufig in der Geschichte der Wissenschaft vorgekommen und bezeichnete dann in der Regel einen grundsätzlichen Fortschritt, daß gewisse Begriffe, denen man eine Zeitlang eine absolute Bedeutung beigelegt hatte, sich als nur relativ gültig erwiesen. Aber damit war das Absolute nicht eliminiert, sondern nur zurückgeschoben. Eine Leugnung des Absoluten schlechthin käme nach meiner Meinung auf dasselbe hinaus, als wenn jemand, der nach der Ursache eines eingetretenen Ereignisses forscht, falls er einmal die Entdeckung macht, daß ein gewisser Umstand, den er eine Zeitlang für die gesuchte Ursache hielt, nicht dafür in Betracht kommen kann, nun daraus den Schluß ziehen wollte, daß das Ereignis überhaupt keine Ursache gehabt hat. Nein, man kann ebensowenig alles relativieren, wie man alles definieren oder alles beweisen kann. Denn wie bei jeder Begriffsbildung von mindestens einem Begriff ausgegangen werden muß, der keiner besonderen Definition bedarf, und

wie jede Beweisführung von einem Obersatz Gebrauch machen muß, der ohne Beweis als zutreffend anerkannt wird, so knüpft jedes Relative im letzten Grunde an etwas selbständiges Absolutes an. Sonst schwebt der Begriff oder der Beweis oder das Relative in der Luft, ähnlich wie ein Rock, für den kein Nagel zum Aufhängen da ist. Das Absolute stellt den notwendigen festen Ausgangspunkt dar; derselbe muß nur an der richtigen Stelle gesucht werden.

Nach diesen Überlegungen ist es in der Tat nicht schwer, auf die Behauptungen des geschilderten Gegenvortrags eine geeignete Erwiderung zu finden.

Die Zurückführung der Atomgewichte aller Elemente auf dasjenige des Wasserstoffs wird, wenn sie sich einmal wirklich durchführen läßt, eine der fundamentalsten Errungenschaften vorstellen, welche die wissenschaftliche Erforschung der Materie gezeitigt hat. Ihre Bedeutung besteht darin, daß im Lichte dieser Erkenntnis alle Materie einen einheitlichen Ursprung aufweist. Dann werden die beiden Bestandteile des Wasserstoffatoms: der positiv geladene Wasserstoffkern, das sogenannte Proton, und das negative Elektron, zusammen mit dem elementaren Wirkungsquantum die Bausteine bilden, aus denen sich das physikalische Weltgebäude zusammensetzt, und diesen Größen wird, solange sie sich nicht aufeinander oder auf andere zurückführen lassen, gewiß ein absoluter Charakter zugeschrieben werden müssen. Da haben wir also wieder das Absolute, nur auf höherer Stufe und in vereinfachter Form. Und um den Vergleichsfaden noch etwas fortzuspinnen, fragen wir jetzt weiter nach dem Baugrunde, auf welchem sich das gewaltige Werk erhebt. Die von Albert Einstein erarbeitete Erkenntnis, daß unsere Begriffe des Raumes und der Zeit, wie sie Newton und ebenso Kant als die absolut gegebenen Formen unserer Anschauung ihren Gedankengängen zugrunde legten, wegen der Willkür, die in der Wahl des Bezugssystems und des Messungsverfahrens liegt, in gewissem Sinne nur eine relative Bedeutung besitzen, greift vielleicht am allertiefsten an die Wurzeln unseres physikalischen Denkens. Aber wenn dem Raum und der Zeit der Charakter des Absoluten abgesprochen worden ist, so ist das Absolute nicht aus der Welt geschafft,



sondern es ist nur weiter rückwärts verlegt worden, und zwar in die Metrik der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit, welche daraus entsteht, daß Raum und Zeit mittels der Lichtgeschwindigkeit zu einem einheitlichen Kontinuum zusammengeschweißt werden. Diese Metrik stellt etwas von jeglicher Willkür abgelöstes Selbständiges und daher Absolutes dar.

So ist auch in der vielfach mißverstandenen Relativitätstheorie das Absolute nicht aufgehoben, sondern es ist im Gegenteil durch sie nur noch schärfer zum Ausdruck gekommen, daß und inwiefern die Physik sich allenthalben auf ein in der Außenwelt liegendes Absolutes gründet. Denn wenn das Absolute, wie manche Erkenntnistheoretiker annehmen, nur im eigenen Erleben zu finden wäre, so müßte es grundsätzlich ebenso viele Arten von Physik geben, wie es Physiker gibt, und wir würden der Tatsache völlig verständnislos gegenüberstehen, daß es wenigstens bis zum heutigen Tage möglich ist, eine physikalische Wissenschaft aufzubauen und zu pflegen, deren Inhalt für alle forschenden Intelligenzen, bei aller Verschiedenartigkeit ihrer Einzelerlebnisse, sich als der nämliche erweist. Daß nicht wir uns aus Zweckmäßigkeitsgründen die Außenwelt schaffen, sondern daß umgekehrt sich uns die Außenwelt mit elementarer Gewalt aufzwingt, ist ein Punkt, welcher in unserer stark von positivistischen Strömungen durchsetzten Zeit nicht als selbstverständlich unausgesprochen bleiben darf. Indem wir bei jeglichem Naturgeschehen von dem Einzelnen, Konventionellen und Zufälligen dem Allgemeinen, Sachlichen und Notwendigen zustreben, suchen wir hinter dem Abhängigen das Unabhängige, hinter dem Relativen das Absolute, hinter dem Vergänglichen das Unvergängliche. Und so weit ich sehe, zeigt sich diese Tendenz nicht nur in der Physik, sondern in jeglicher Wissenschaft, ja nicht nur auf dem Gebiet des Wissens, sondern auch auf dem des Guten und dem des Schönen.

Doch ich laufe hier Gefahr, von meinem Thema abzuschweifen. Denn ich hatte mir nicht vorgenommen, Behauptungen aufzustellen und sie dann zu beweisen, sondern ich wollte umgekehrt erst einige Tatsachen aus der Physik

reden lassen und an sie einige zusammenfassende Betrachtungen anreihen.

Darum zum Schluß nur noch eine naheliegende, aber sehr verfängliche Frage. Wer bürgt uns dafür, daß ein Begriff, welchem wir heute einen absoluten Charakter zuschreiben, vielleicht schon morgen sich in einem gewissen neuen Sinne als relativ erweisen und einem höheren absoluten Begriffe weichen wird? Hier kann es nur eine einzige Antwort geben: Nach allem, was wir erlebt und gelernt haben, kann eine derartige Bürgschaft niemand in der Welt übernehmen. Ja wir dürfen wohl sogar mit aller Sicherheit behaupten, daß das Absolute schlechthin uns niemals faßbar sein wird. Das Absolute bildet vielmehr ein ideales Ziel, das wir stets vor uns haben, ohne es doch jemals erreichen zu können — ein allerdings vielleicht betrüblicher Gedanke, mit dem wir uns eben abfinden müssen. Es geht uns darin ähnlich wie einem in unbekanntem Gelände wandernden Bergsteiger, der niemals weiß, ob hinter dem Gipfel, den er vor sich sieht und dem er mühsam zustrebt, sich nicht ein noch höherer auftürmt. Wohl aber mag es wie ihm so auch uns zum Trost dienen, daß es dabei doch immer aufwärts und vorwärts geht, und daß uns nichts hindert, dem ersehnten Ziel in unbeschränktem Grade näher zu kommen. Diese Annäherung immer weiter zu treiben und immer enger zu gestalten, ist das eigentliche unausgesetzte Streben einer jeglichen Wissenschaft, und wir können hier mit Gotthold Ephraim Lessing sagen: Nicht der Besitz der Wahrheit, sondern das erfolgreiche Ringen um sie macht das Glück des Forschers aus; denn alles Verweilen ermüdet und erschlafft auf die Dauer. Ein starkes, gesundes Leben gedeiht nur durch Arbeit und Fortschritt. Vom Relativen zum Absoluten.

## Physikalische Gesetzlichkeit.

(Vortrag, gehalten am 14. Februar 1926 in den akademischen Kursen von Düsseldorf.)

Meine hochverehrten Damen und Herren! In der Zeit ernster Not und tiefer Demütigung, welche unser hartgeprüftes Vaterland gegenwärtig zu erdulden hat, muß jeder Deutsche es als Ehrenpflicht empfinden, sich freudig zu seinem Volke zu bekennen und in dem ihm gewiesenen Wirkungskreise nach seinen besten Kräften an dem Wiederaufbau des Zerstörten mitzuarbeiten. Auch auf dem Gebiete der Kulturgüter haben wir schwere Einbußen erlitten, und es gilt die Anstrengungen zu verdoppeln, damit Deutschland allmählich seinen früher mit Ehren und mit wachsendem Erfolge behaupteten Platz unter den Völkern zurückgewinnt. Wenn wir gewahren, daß es gegenwärtig immer noch große, sich als international bezeichnende wissenschaftliche Organisationen gibt, welche in ihren Satzungen die Beteiligung deutscher Gelehrter ausdrücklich ablehnen, so muß es diesen ein verstärkter Ansporn sein, durch den Umfang und durch die Gediegenheit ihrer Arbeit den Nachweis zu liefern, daß die deutsche Wissenschaft noch lebendig ist und nicht ohne Schaden für den allgemeinen wissenschaftlichen Fortschritt ignoriert werden darf. Und wenn der einzelne auch nur einen kleinen bescheidenen Teil zu dem Gesamtwerk zu liefern vermag, so trifft ihn doch das volle, seinen Kräften entsprechende Maß der Verantwortung für den Wert dessen, was er zu dem großen Schatz der internationalen Wissenschaft beisteuert.

Um von solcher Gesinnung Zeugnis abzulegen, habe ich der ehrenvollen Einladung gerne Folge geleistet, hier in Düsseldorf, an dieser echt deutschen Kulturstätte, welche die schweren Folgeerscheinungen des Krieges auch an sich

selber in vollem Maße erleben mußte, über ein meinem speziellen wissenschaftlichen Gebiet entnommenes Thema zu berichten, und bitte Sie heute, einige Betrachtungen über physikalische Gesetzlichkeit im Lichte neuerer Forschung vor Ihnen entwickeln zu dürfen.

## I.

Was verstehen wir unter physikalischer Gesetzlichkeit? Ein physikalisches Gesetz ist ein jeder Satz, welcher einen festen, unverbrüchlich gültigen Zusammenhang zwischen meßbaren physikalischen Größen ausspricht, einen Zusammenhang, welcher es gestattet, eine dieser Größen zu berechnen, wenn die übrigen durch Messung bekannt sind. Eine möglichst vollständige Erkenntnis der physikalischen Gesetzlichkeit ist das höchste, heiß ersehnte Ziel eines jeden Physikers, mag er sie nun lediglich vom Nützlichkeitsstandpunkt aus bewerten, indem er ihren eigentlichen Wert darin erblickt, daß uns durch sie die Ausführung kostspieliger Messungen erspart wird, oder mag er, weitergehend, in ihr die Befriedigung eines tiefen inneren Wissensdranges und die feste Basis für seine Naturanschauung suchen.

Wie gelangen wir nun zur Feststellung der einzelnen physikalischen Gesetze, und wie sehen dieselben aus? Zuvörderst dürfen wir es durchaus nicht als von vornherein selbstverständlich betrachten, daß eine physikalische Gesetzlichkeit überhaupt existiert, oder daß sie, wenn sie auch bisher existiert hat, auch in Zukunft stets in gleicher Weise existieren wird. Es wäre durchaus denkbar, und wir könnten nicht das mindeste dagegen machen, wenn die Natur uns eines schönen Tages durch den Eintritt eines völlig unerwarteten Ereignisses ein Schnippchen schlüge, und wenn es uns trotz aller Anstrengung niemals gelingen sollte, in den entstandenen Wirrwarr irgendeine gesetzliche Ordnung hineinzubringen. Dann bliebe der Wissenschaft nichts anderes übrig, als ihren Bankerott zu erklären. Aus diesem Grunde ist sie genötigt, die Existenz einer allgemeinen Naturgesetzlichkeit als Vorbedingung, als Postulat an die Spitze ihrer ganzen Entwicklung zu stellen oder, um mit Immanuel Kant zu reden, den Kausalbegriff mit zu den von vornherein gegebenen Kategorien zu



rechnen, ohne die Erkenntnis überhaupt nicht gewonnen werden kann.

Daraus folgt weiter mit Notwendigkeit, daß das Wesen der physikalischen Gesetzlichkeit und der Inhalt der physikalischen Gesetze sich nicht durch reines Nachdenken erschließen läßt, sondern daß es hierfür keinen anderen Weg gibt als den, sich vor allem an die Natur zu wenden, in ihr möglichst zahlreiche und vielseitige Erfahrungen zu sammeln, dieselben miteinander in Vergleich zu bringen und zu möglichst einfachen und weittragenden Sätzen zu verallgemeinern, mit einem Wort: die Methode der Induktion.

Da der Inhalt einer Erfahrung um so reicher ist, je genauer die Messungen sind, die ihr zugrunde liegen, so versteht sich von selbst, daß der Fortschritt aller physikalischen Erkenntnis auf das engste verknüpft ist mit der Verfeinerung der physikalischen Instrumente und mit der Technik des Messens. Davon liefert gerade die neueste Geschichte der Physik schlagende Belege. Aber mit dem Messen allein ist es nicht getan. Jede Messung ist ein einzelnes, zunächst für sich stehendes Ereignis und als solches an ganz spezielle Umstände, vor allem an einen bestimmten Ort und eine bestimmte Zeit, sowie an ein bestimmtes Meßinstrument und einen bestimmten Beobachter gebunden, und wenn auch die erstrebte Verallgemeinerung in vielen Fällen auf der Hand liegt und sich sozusagen von selbst anbietet, so gibt es doch auch andere Fälle, wo es außerordentlich schwierig ist, für verschiedenartige vorliegende Messungen das gemeinsame Gesetz zu finden, — sei es, daß sich dafür überhaupt keine Möglichkeit zu eröffnen scheint, oder auch, was auch sehr unbefriedigend wirken kann, daß zu vielerlei Möglichkeiten der Verallgemeinerung vorliegen.

In solchen Fällen gibt es kein anderes Mittel, um vorwärts zu kommen, als einmal probeweise eine gewisse Annahme einzuführen, eine sog. Arbeitshypothese, und zuzusehen, wieweit man mit ihr kommt. Für die Brauchbarkeit einer solchen Hypothese ist es immer ein besonders gutes Zeichen, wenn sie sich auch auf Gebieten bewährt, auf die sie nicht von vornherein zugeschnitten war. Denn dann darf man schließen, daß der gesetzliche Zusammenhang, den sie ausspricht, eine

tiefer gehende Bedeutung besitzt und eine wesentlich neue Erkenntnis eröffnet.

Wenn somit eine zweckmäßige Arbeitshypothese als ein unentbehrliches Hilfsmittel jeder induktiven Forschung erscheint, so drängt sich die gewichtige Frage auf, wie man es denn anfängt, um eine möglichst brauchbare Hypothese ausfindig zu machen. Darüber gibt es aber keine allgemeine Vorschrift. Denn hier genügt keineswegs allein das logische Denken, auch dann nicht, wenn die reichsten und vielseitigsten Erfahrungen vorliegen. Hier hilft vielmehr allein ein unvermitteltes Zufassen, ein glücklicher Einfall, oft ein anfangs sehr kühn erscheinender Gedankensprung, wie ihn nur eine lebendige und selbständige, durch eine genaue Kenntnis der vorhandenen Tatsachen in die richtige Bahn gelenkte Phantasie und eine starke schöpferische Gestaltungskraft auszuführen vermag.

In den meisten Fällen handelt es sich dabei um die Einführung gewisser Gedankenbilder, Analogien, welche auf bekannte gesetzliche Zusammenhänge in einem anderen Gebiete hinlenken und dadurch einen weiteren Schritt nahelegen in der Richtung zu der Vereinheitlichung des physikalischen Weltbildes.

Aber gerade an einem solchen Punkte vielversprechenden Erfolges lauert häufig auch eine ernste Gefahr. Denn wenn der gewagte Schritt wirklich geglückt ist, wenn die eingeführte Hypothese ihre Leistungsfähigkeit bewiesen hat, handelt es sich weiter darum, sie weiter auszubilden, ihren eigentlichen Kern herauszuschälen und durch eine sachgemäße Formulierung ihren berechtigten Inhalt klarzustellen, indem man sie von allen unwesentlichen Zutaten reinlich säubert. Das ist nun aber keine so einfache Sache, als es vielleicht zunächst den Anschein haben könnte. Denn die in glücklichem Gedankenflug errichtete Brücke, welche den Zugang zu einer neuen Erkenntnis vermittelt hat, erweist sich bei näherer Besichtigung sehr häufig als nur provisorischer Art, und muß dann nachträglich durch eine haltbarere, auch für das schwere Geschütz kritischer Logik tragfähige, ersetzt werden. Wir müssen eben bedenken, daß eine jede Hypothese ein Produkt der tastenden Phantasie ist, und daß die Phantasie mit der



Anschauung arbeitet. Die Anschauung ist aber in der Physik, so wenig man sie bei der Hypothesenbildung entbehren kann, für die Ausarbeitung einer rationellen Theorie, namentlich bei einer logischen Beweisführung, ein Hilfsmittel von äußerst zweifelhafter Natur; denn das wohlbegreifliche Vertrauen auf gewisse anschauliche Vorstellungen und Gedankengänge, die sich in bestimmter Richtung als fruchtbar erwiesen haben, führt leicht zur Überschätzung ihrer Bedeutung und zu unhaltbaren Verallgemeinerungen. Nimmt man hinzu, daß gerade der Schöpfer einer neuen leistungsfähigen Theorie in der Regel wenig geneigt ist, sei es aus Bequemlichkeit oder auch aus einem gewissen Pietätsgefühl, an den speziellen Ideenverbindungen, die ihn zum Erfolge geführt haben, wesentliche Änderungen vorzunehmen, und daß er häufig seine ganze wohlerworbene Autorität einsetzt, um seinen ursprünglich eingenommenen Standpunkt aufrecht halten zu können, so ist es wohl verständlich, daß die gesunde Weiterentwicklung der Theorie oft erheblichen Schwierigkeiten begegnet. Beispiele für diese Verhältnisse treffen wir auf Schritt und Tritt in der Geschichte der physikalischen Wissenschaft an, bis hinein in die Gegenwart. Lassen Sie mich einige der wichtigsten hier zur Sprache bringen.

Die frühesten Erkenntnisse physikalischer Gesetzlichkeit liegen naturgemäß auf dem Gebiete, in dem die ersten genauen Messungen möglich waren: dem von Raum und Zeit, also auf dem Gebiet der Mechanik. Auch läßt sich leicht verstehen, daß die Aufstellung gesetzmäßiger Zusammenhänge zuerst gerade bei denjenigen Bewegungen gelang, deren gesetzlicher Ablauf unabhängig von zufälligen äußeren Begleitumständen und Eingriffen erfolgt: den Bewegungen der Himmelskörper. Schon vor Jahrtausenden verstanden es bekanntlich die Kulturvölker des Orients, aus ihren Beobachtungen Formeln abzuleiten, welche es gestatten, die Bewegungen der Sonne und der Planeten auf Jahre hinaus mit großer Sicherheit zu berechnen. Mit jeder Steigerung der Meßgenauigkeit war eine Verbesserung der Formeln verbunden. Ihre Zusammenstellung und Vergleichung führte in der späteren Entwicklung zu den Theorien von Ptolemäus, Copernicus, Kepler, von denen jede der vorhergehenden an Einfachheit und Genauig-

keit überlegen war. Allen diesen Theorien ist gemeinsam eine Beantwortung der Frage nach dem gesetzlichen Zusammenhang zwischen der Position eines Himmelskörpers, etwa eines Planeten, und dem Zeitpunkt, in welchem diese Position eingenommen wird. Selbstverständlich ist die Art des gesetzlichen Zusammenhanges für jeden Planeten eine andere, wenn sich auch in den Planetenbewegungen viele gemeinsame Züge aufweisen lassen.

Den entscheidenden Schritt über diese Art der Fragestellung hinaus tat Newton, indem er die auf die verschiedenen Planeten bezüglichen Formeln in ein einziges, für alle Planeten und überhaupt für sämtliche Himmelskörper in gleicher Weise gültiges Bewegungsgesetz zusammenfaßte. Ein solcher Erfolg konnte ihm dadurch gelingen, daß er das Bewegungsgesetz unabhängig machte von dem speziellen Zeitpunkt, auf den es angewendet wird, daß er nämlich den Zeitpunkt durch das Zeitdifferential ersetzte. Die Newtonsche Theorie der Planetenbewegung spricht einen bestimmten gesetzlichen Zusammenhang aus nicht zwischen der Position eines Planeten und der Zeit, sondern zwischen der Beschleunigung des Planeten und seiner Entfernung von der Sonne, und dieses Gesetz, eine gewisse vektorielle Differentialgleichung, lautet für alle Planeten genau gleich. Ist also die Lage und die Geschwindigkeit des Planeten in irgendeinem einzelnen Zeitpunkt bekannt, so berechnet sich daraus eindeutig seine Bewegung für alle Zeiten.

Daß die Newtonsche Fassung der Bewegungsgesetze nicht nur eine neue Form der Naturbeschreibung, sondern einen wirklichen Fortschritt in der Erkenntnis der sachlichen Zusammenhänge bedeutet, erhellt aus den Resultaten, welche ihre weitere Durchführung geliefert hat. Sie übertrifft nämlich die Keplerschen Formeln nicht nur an Genauigkeit, indem sie zum Beispiel die Störungen, welche die elliptische Bewegung der Erde um die Sonne durch ihre gelegentliche Annäherung an den Jupiter erleidet, in voller Übereinstimmung mit den Messungen wiedergibt, sondern sie erteilt auch Aufschluß über die Bewegungen anderer Himmelskörper, wie der Kometen, der Doppelsterne usw., welche von den Keplerschen Gesetzen gar nicht erfaßt werden. Was aber der Newtonschen Theorie zu ihrem unmittelbarsten, völlig durchschlagenden Erfolge verhalf, war der Umstand, daß ihre Anwendung auf irdische Bewegungen unmittelbar zu denselben numerischen Gesetzen des freien Falls und der Pendelschwingungen führte, welche Galilei durch seine Messungen festgestellt hatte, und des weiteren auch zur Erklärung gewisser auffallender, sonst ganz unverständlicher Phänomene, wie Ebbe und Flut, Drehung der Pendelebene, Präzession der Kreiselbewegung und dergleichen.



Wie gelangte nun aber Newton zu seiner Differentialgleichung für die Bewegung eines Planeten? Das ist die Frage, die uns jetzt hauptsächlich interessiert. Er gelangte zu ihr nicht etwa dadurch, daß er die Beschleunigung eines Planeten ohne weiteres mit seiner Entfernung von der Sonne in Beziehung brachte und nach einem bestimmten numerischen Zusammenhang zwischen ihnen suchte, sondern dadurch, daß er sich zunächst in Gedanken eine Brücke baute, die von dem Begriff der Lage des Planeten hinüberführte zu dem Begriff der Beschleunigung, und diese Brücke heißt die Kraft. Er stellte sich nämlich vor, daß einerseits durch die Lage eines Planeten gegenüber der Sonne eine gegen die Sonne hin gerichtete Anziehungskraft bedingt wird, und daß andererseits diese selbe Anziehungskraft in der Bewegungsgröße des Planeten eine bestimmte Änderung verursacht. So entstand einerseits das Gravitationsgesetz, andererseits das Trägheitsgesetz. Der Begriff der Kraft selber entsprang ohne Zweifel, wie schon das Wort Kraft besagt, der Vorstellung der Muskelempfindung beim Heben eines Gewichtes oder beim Fortschleudern eines Balles, und diese Vorstellung wurde in weiterer Verallgemeinerung angewendet auf jede Art von Bewegungsänderung, auch wenn dieselbe so groß ist, daß menschliche Muskelkräfte nicht entfernt hinreichen, um sie zu bewirken.

Kein Wunder, daß Newton diesem Begriff der Kraft, welcher ihm zu so fundamentalen Erfolgen verholfen hatte, eine entscheidende Bedeutung beilegte, obwohl derselbe, was wohl zu beachten ist, in dem eigentlichen Bewegungsgesetz gar nicht vorkommt, und daß er in ihm die primäre Ursache einer jeden Bewegungsänderung suchte. So ist es gekommen, daß

die Newtonsche Kraft als der Haupt- und Grundbegriff der Mechanik, und nicht nur der Mechanik, sondern der ganzen Physik hingestellt wurde, und daß man sich mit der Zeit gewöhnte, bei allen physikalischen Vorgängen immer in erster Linie nach der Kraft zu fragen, welche sie verursacht.

In gewissem Gegensatz hierzu steht das Bild, welches uns die neuere Entwicklung der Physik darbietet. Man darf ruhig sagen, daß heute die Newtonsche Kraft ihre grundlegende Bedeutung für die theoretische Physik verloren hat. In dem modernen Aufbau der Mechanik erscheint sie nur mehr als sekundäre Größe, man hat sie ersetzt durch einen anderen höheren und umfassenderen Begriff, den der Arbeit oder des Potentials, indem man die Kraft allgemein definiert als das Potentialgefälle oder als den negativen Potentialgradienten.

Aber — so könnte man versucht sein einzuwenden — wie ist es möglich, die Arbeit als das Primäre anzusehen, da doch, wenn Arbeit entstehen soll, immer zuerst eine Kraft da sein muß, welche die Arbeit leistet? Wer so spricht, der denkt nicht physikalisch, sondern physiologisch. Gewiß ist bei der Arbeit, die man bei der Emporhebung eines Gewichtes leistet, die Muskelkontraktion mit den sie begleitenden Empfindungen das Primäre und bildet die Ursache der eintretenden Bewegung. Aber dieser physiologische Vorgang ist begrifflich scharf zu trennen von der hier in Rede stehenden physikalischen Kraft der Anziehung, welche die Erde auf das Gewicht ausübt und welche ihrerseits allein bedingt wird durch das primär vorhandene Gravitationspotential.

Das Potential behauptet den Vorrang vor der Kraft nicht allein deshalb, weil die physikalische Gesetzlichkeit durch seine Einführung eine einfachere Form annimmt, sondern auch weil die Bedeutung des Potentialbegriffes viel weiter reicht als die des Kraftbegriffes, namentlich auch über das Gebiet der Mechanik hinaus bis in das Gebiet der chemischen Verwandtschaftslehre, wo von Newtonscher Kraft überhaupt nicht mehr die Rede sein kann. Freilich muß zugegeben werden, daß der Begriff des Potentials nicht den einleuchtenden Vorteil der unmittelbaren Anschaulichkeit besitzt, welcher dem der Kraft vermöge seiner Beziehung zum Muskelsinn innewohnt, und daß daher durch die Elimination des Kraftbegriffes auch die Anschaulichkeit der physikalischen Gesetze eine wesentliche Einbuße erleidet. Aber diese Entwicklung liegt in der Natur der Sache. Die physikalische Gesetzlichkeit richtet sich eben nicht nach den menschlichen Sinnesorganen und dem ihnen entsprechenden Anschauungsvermögen, sondern nach den Dingen selber.



Immerhin wird es nach meiner Meinung bei der Einführung in die Mechanik für den Unterricht stets notwendig bleiben, zunächst von der Newtonschen Kraft auszugehen, ebenso wie man in der Optik zunächst vom Farbensinn und in der Thermodynamik zunächst vom Wärmesinn ausgeht, obwohl diese Grundlage später durch eine präzisere ersetzt wird. Wir dürfen auch nicht vergessen, daß die Bedeutung aller physikalischen Begriffe und Sätze für uns in letzter Linie doch wieder auf ihren Beziehungen zu den menschlichen Sinnesorganen beruht. Das ist ja gerade charakteristisch für das eigentümliche Verfahren der physikalischen Forschung. Um überhaupt brauchbare physikalische Begriffe und Hypothesen bilden zu können, müssen wir zunächst auf unser den spezifischen Sinnesempfindungen unmittelbar angepaßtes Anschauungsvermögen zurückgreifen. Aus ihm allein schöpfen wir alle unsere Ideen. Wenn wir aber dann zu physikalischen Gesetzen gelangen wollen, müssen wir von den eingeführten Anschauungsbildern wieder möglichst abstrahieren und die aufgestellten Definitionen von allen Zutaten und Vorstellungen, die nicht in logisch notwendigem Zusammenhang mit den Messungen stehen, befreien. Sind dann die physikalischen Gesetze formuliert und haben sie uns auf mathematischem Wege zu bestimmten Folgerungen geführt, so müssen wir schließlich die erhaltenen Resultate, um sie für uns wertvoll zu machen, wieder zurückübersetzen in die Sprache unserer Sinnenwelt. Das ist in gewissem Sinne ein zirkelförmiger Weg. Er ist aber durchaus notwendig. Denn die Einfachheit und Allgemeinheit der physikalischen Gesetze offenbart sich stets erst nach der Abstraktion von allen anthropomorphen Beimengungen.

Derartiger Gedankenbrücken und anschaulicher Hilfsbegriffe, wie ich einen in der Newtonschen Kraft zu schildern versuchte, gibt es in der theoretischen Physik eine große Anzahl. Ich will hier in diesem Zusammenhang nur noch den

für die physikalische Chemie so fruchtbar gewordenen Begriff des osmotischen Druckes nennen, den van't Hoff seinerzeit eingeführt hat, um die physikalischen Gesetze der Lösungen, namentlich die des Gefrierpunktes und der Dampfspannung, anschaulich formulieren zu können. Realisieren und messen läßt sich der osmotische Druck nur verhältnismäßig unvollkommen, weil dazu sehr komplizierte Vorrichtungen, sogenannte semipermeable Wände, notwendig sind. Um so mehr muß man den intuitiven Scharfblick bewundern, welcher den großen Forscher auf Grund eines recht dürftigen Beobachtungsmaterials zu der Formulierung der nach ihm benannten Gesetze geleitet hat. In der heutigen Fassung dieser Gesetze bedarf man des osmotischen Druckes so wenig, wie für die der Bewegungsgesetze der Newtonschen Kraft.

Es gibt aber auch noch ganz andere Arten von Gedankenbrücken hoher Anschaulichkeit, welche sich für die Bildung fruchtbarer Arbeitshypothesen als sehr wertvoll, aber doch im weiteren Verlauf der Entwicklung dem Fortschritt als direkt hinderlich erwiesen haben. Eine derselben verdient es noch ganz besonders, hier hervorgehoben zu werden. Wie man sich gewöhnt hatte, hinter allen Veränderungen in der Natur eine ursächlich wirkende Kraft zu vermuten, so war man entsprechend leicht geneigt, eine jede unveränderliche, konstante Größe sich als eine Substanz vorzustellen. Der Substanzbegriff hat von jeher in der Physik eine bedeutende, aber, wie eine nähere Betrachtung ergibt, nicht immer unbedingt förderliche Rolle gespielt. Zunächst ist ja leicht einzusehen, daß sich jeder sogenannte Erhaltungssatz substantiell deuten läßt, und diese Vorstellung ist gewiß vorzüglich geeignet, den Inhalt des Satzes zu veranschaulichen und dadurch seine Benutzung zu erleichtern. Können wir uns doch kaum ein anschaulicheres Bild machen von einer Größe, welche durch alle ihre Veränderungen hindurch stets ihre Quantität behält, als indem wir an einen bewegten materiellen Körper denken. Damit hängt gewiß auch das Bestreben zusammen, überhaupt alle Vorgänge in der Natur auf Bewegungen von Substanzmengen, also auf Mechanik, zurückzuführen. So wurde die Erzeugung und Ausbreitung des Lichtes anschaulich gemacht durch die Wellenbewegung eines substantiellen Lichtäthers, und in der



Tat gelang es auf diesem Wege, die wichtigsten Gesetze der Optik in Übereinstimmung mit der Erfahrung abzuleiten, bis dann einmal doch der Zeitpunkt kam, wo die substantiell-mechanische Theorie ihren Dienst versagte und sich in unfruchtbare Spekulationen verlor.

Auch auf dem Gebiet der Wärme hat der Substanzbegriff eine Zeitlang Treffliches geleistet. Die sorgfältige Ausbildung, welche die Kalorimetrie in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts erfuhr, erfolgte wesentlich unter dem Gesichtspunkt der Annahme eines Hinüberströmens der unveränderlich bleibenden Wärmesubstanz aus dem wärmeren in den kälteren Körper. Als dann der Nachweis geführt wurde, daß die Quantität der Wärme auch vermehrt werden kann, zum Beispiel durch Reibungsvorgänge, stellte sich die Substanztheorie zur Wehr und suchte ihr Heil in Zusatzhypothesen, was ihr zwar eine geraume Zeit hindurch, aber schließlich doch nicht auf die Dauer gelingen konnte.

In der Elektrizitätslehre zeigen sich schon bei oberflächlicher Betrachtung die bedenklichen Folgen, welche eine Überspannung substantieller Vorstellungen mit sich bringen kann. Zwar wird auch hier der Satz von der Unveränderlichkeit der Elektrizitätsmenge und daran anschließend der Begriff der elektrischen Strömung und das Gesetz der Wechselwirkungen geladener und stromdurchflossener Leiter vorzüglich veranschaulicht durch die Vorstellung einer feinen, leicht beweglichen, mit gewissen Kraftäußerungen begabten elektrischen Substanz. Aber hier versagt die Analogie schon bei der Berücksichtigung des Umstandes, daß man dann zwei entgegengesetzte, eine positive und eine negative Substanz, annehmen muß, welche sich bei der Vereinigung gegenseitig vollkommen neutralisieren, — ein Vorgang, der bei gewöhnlichen Substanzen jedenfalls undenkbar ist, ebenso wie die Erzeugung zweier entgegengesetzter Substanzen aus dem Nichts.

So sehen wir, wie die Vorstellungsbilder und die ihnen entspringenden Anschauungen zwar für die physikalische Forschung unentbehrlich sind und schon ungezählte Male den Schlüssel zur Eröffnung neuer Bahnen der Erkenntnis geliefert haben, aber doch mit großer Vorsicht behandelt werden müssen, selbst wenn sie sich eine Zeitlang bewährt haben.

Der einzige sichere Führer auf dem Weg der weiteren Entwicklung bleibt stets die Messung und was aus den an sie unmittelbar anschließenden Begriffen auf logischem Wege gefolgert werden kann. Alle anderweitigen Schlüsse, und gerade solche, welche sich durch eine gewisse unmittelbare sogenannte Evidenz auszeichnen, sind immer mit einem gewissen Mißtrauen zu betrachten. Denn über die Bündigkeit eines Beweises, der von wohldefinierten Begriffen handelt, entscheidet nicht die Anschauung, sondern der Verstand.

## II.

Meine Damen und Herren! Wir haben bisher unser Augenmerk hauptsächlich der Frage zugewendet, auf welchem Wege man zur Erkenntnis physikalischer Gesetze gelangt; jetzt wollen wir einmal weiter dazu übergehen, den Inhalt und das eigentliche Wesen der physikalischen Gesetzlichkeit etwas näher ins Auge zu fassen.

Ein physikalisches Gesetz findet seinen Ausdruck gewöhnlich in einer mathematischen Formel, welche es gestattet, für irgendein vorliegendes, bestimmten gegebenen Bedingungen unterworfenes physikalisches Gebilde den zeitlichen Ablauf der darin stattfindenden Vorgänge zu berechnen. Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet lassen sich alle physikalischen Gesetze ihrem Inhalt nach ohne weiteres in zwei große Gruppen teilen.

Die Gesetze der ersten Gruppe sind dadurch gekennzeichnet, daß sie ihre Gültigkeit unverändert behalten, wenn man in ihnen das Vorzeichen der Zeit umkehrt, oder anders ausgedrückt: wenn jeder Vorgang, der ihre Forderungen erfüllt, auch rückwärts verlaufen kann, ohne mit ihnen in Widerspruch zu kommen. Beispiele hierfür sind die Gesetze der Mechanik und die Gesetze der Elektrodynamik, wofern von thermischen und chemischen Wirkungen abgesehen wird. Jeder rein mechanische oder elektrodynamische Vorgang kann auch in umgekehrter Richtung verlaufen. Ein reibungslos fallender Körper wird nach dem nämlichen Gesetze beschleunigt, wie ein reibungslos emporfliegender Körper verzögert wird, ein Pendel schwingt unter denselben Bedingungen nach links wie nach rechts, eine Welle kann sich ebenso nach der



einen Seite wie nach der anderen fortpflanzen, ebenso nach außen wie nach innen, ein Planet kann sich ebenso in dem einen Sinne, wie in dem anderen Sinne um die Sonne bewegen. Ob und wie die Umkehrung der Bewegung wirklich realisiert werden kann, ist eine ganz andere Frage, auf die wir hier nicht einzugehen brauchen. Hier handelt es sich nur um das Gesetz selber, nicht um die besonderen Daten, auf welche es Anwendung findet.

Die Gesetze der zweiten Gruppe werden dadurch charakterisiert, daß in ihnen das Vorzeichen der Zeit eine wesentliche Rolle spielt. Daher sind die ihnen gehorchenden Vorgänge einseitig gerichtet, irreversibel. Zu diesen Vorgängen gehören alle diejenigen, bei welchen die Wärme und die chemische Verwandtschaft eine Rolle spielt. Bei der Reibung wird die relative Geschwindigkeit stets vermindert, niemals erhöht, bei der Wärmeleitung wird der kältere Körper stets erwärmt, der wärmere stets abgekühlt, bei der Diffusion schreitet die Vermischung der beiden sich mischenden Substanzen immer im Sinne fortschreitender Vermengung, niemals in dem einer Entmischung fort. Daher führen die irreversiblen Vorgänge stets zu einem bestimmten Endziel: die Reibung zum relativen Ruhezustand, die Wärmeleitung zum Ausgleich der Temperaturen, die Diffusion zur vollkommenen Gleichmäßigkeit der Mischung, während dagegen die reversibeln Vorgänge, sofern keine Eingriffe von außen erfolgen, keinen Anfang und kein Ende kennen, sondern im einen ewigen Hin und Her bestehen.

Wie gelingt es nun, diese beiden ganz entgegengesetzten Arten von Gesetzen unter einen Hut zu bringen, wie es doch im Interesse der Vereinheitlichung des physikalischen Weltbildes unbedingt gefordert werden muß? Vor einem Menschenalter gab es eine stark in den Vordergrund tretende Richtung in der theoretischen Physik, die sogenannte Energetik, welche darauf hinarbeitete, den Gegensatz dadurch aufzuheben, daß sie beispielsweise den Übergang der Wärme von höherer zu tieferer Temperatur in vollständige Analogie stellte zu dem Herabsinken eines Gewichtes oder eines Pendels aus einer höheren in eine tiefere Lage. Dabei blieb aber der wesentliche Punkt unberücksichtigt, daß ein Gewicht auch emporfliegen kann, und daß ein Pendel, wenn es seinen tiefsten

Punkt erreicht hat, auch seine größte Geschwindigkeit besitzt und infolge seiner Trägkeit die Gleichgewichtslage nach der entgegengesetzten Seite hin überschreitet, während im Gegensatz dazu die Wärmeströmung von einem wärmeren zu einem kälteren Körper um so mehr nachläßt, je geringer die Temperaturdifferenz wird, und von einem Überschreiten des Zustandes der Temperaturgleichheit vermöge einer Art von Trägheit keine Rede ist.

Wie man es auch wenden möge, der Gegensatz zwischen reversibeln und irreversibeln Prozessen bleibt bestehen, und es kann sich nur darum handeln, einen völlig neuen Gesichtspunkt ausfindig zu machen, von dem aus ein gewisser Zusammenhang der verschiedenartigen Gesetze miteinander erkennbar wird, womöglich in der Weise, daß die Gesetze der einen Gruppe irgendwie auf die der anderen zurückgeführt werden. Welche von den beiden soll man aber als die einfachere, elementarere ansehen, die der reversiblen oder die der irreversibeln Prozesse?

Darüber gibt schon eine äußerliche formale Betrachtung einigen Aufschluß. Eine jede physikalische Formel enthält außer veränderlichen Größen, welche in jedem Einzelfalle der besonderen Messung unterliegen, gewisse konstante Größen, welche ein für allemal bestimmt zu denken sind und welche dem in der Formel ausgedrückten funktionellen Zusammenhang zwischen den veränderlichen Größen das charakteristische Gepräge geben. Wenn man diese Konstanten näher ins Auge faßt, so findet man leicht, daß dieselben bei den reversibeln Vorgängen wirklich stets die nämlichen sind, da sie unter den verschiedensten äußeren Bedingungen immer wiederkehren, wie zum Beispiel die Masse, die Gravitationskonstante, die elektrische Ladung, die Lichtgeschwindigkeit, während dagegen die Konstanten der irreversibeln Vorgänge, wie das Wärmeleitungsvermögen, der Reibungskoeffizient, die Diffusionskonstante, sich mehr oder weniger von den äußeren Umständen, zum Beispiel von der Temperatur, vom Druck usw. abhängig zeigen.

Dieses tatsächliche Verhalten führt naturgemäß dazu, die Konstanten der ersten Gruppe als die einfacheren und die an sie anknüpfenden Gesetze als die elementaren, nicht weiter



auflösbaren anzusehen, dagegen den Konstanten der zweiten Gruppe und den ihnen entsprechenden Gesetzen einen verwickelteren Charakter zuzuschreiben. Um diese Vermutung auf ihre Berechtigung hin zu prüfen, muß man die Betrachtungsweise um einen Grad verfeinern, man muß die Vorgänge sozusagen schärfer unter die Lupe nehmen. Sind die irreversibeln Vorgänge wirklich von zusammengesetzter Art, so können die sie beherrschenden Gesetze nur sozusagen im groben gelten, sie müssen statistischen Charakter besitzen, da sie nur für eine makroskopische summarische Betrachtung, also für die Mittelwerte aus einer großen Anzahl von verschiedenen Einzelvorgängen Bedeutung haben. Je mehr man die Zahl der zur Mittelwertbildung herangezogenen Einzelvorgänge einschränkt, um so deutlicher müssen sich zufällige Abweichungen von den makroskopischen Gesetzen bemerklich machen. Mit anderen Worten: wenn die geschilderte Anschauung wirklich zutrifft, so müssen die Gesetze der irreversibeln Vorgänge, die der Reibung, der Wärmeleitung, der Diffusion, mikroskopisch betrachtet, sämtlich ungenau sein, sie müssen in Einzelfällen Ausnahmen zulassen, Ausnahmen, die um so stärker hervortreten, je mehr man die Betrachtung verfeinert.

Gerade diese Schlußfolgerung ist es nun, die mit einer im Lauf der Zeit sich stets steigernden Sicherheit nach allen Richtungen durch die Erfahrung bestätigt wurde, was natürlich nur mit Hilfe einer außerordentlichen Verbesserung der Messungsmethoden gelingen konnte. Die große Annäherung, mit welcher die Gesetze der irreversibeln Vorgänge gelten, rührt lediglich her von der ungeheuren Anzahl der Einzelvorgänge, aus denen sie sich gewöhnlich zusammensetzen. Nehmen wir zum Beispiel eine Flüssigkeit von überall gleichmäßiger Temperatur, so folgt aus dem makroskopischen Gesetz der Wärmeleitung, daß keinerlei Strömung von Wärme innerhalb der Flüssigkeit stattfindet. Dem ist aber, genau genommen, durchaus nicht so. Denn die Wärme wird bedingt durch die feinen schnellen Bewegungen der Flüssigkeitsmoleküle, und die Wärmeleitung infolgedessen durch den Austausch dieser Geschwindigkeiten beim Zusammenstoß. Gleichmäßigkeit der Temperatur bedeutet also nicht Gleichheit aller Geschwindig-

keiten, sondern nur Gleichheit des Mittelwertes der Geschwindigkeiten für jedes Flüssigkeitsquantum, das eine sehr große Zahl von Molekülen umfaßt. Nehmen wir aber ein Quantum, das nur verhältnismäßig wenig Moleküle enthält, so wird der Mittelwert ihrer Geschwindigkeiten im Laufe der Zeit Schwankungen aufweisen, um so stärkere, je kleiner das Quantum gewählt ist. Diesen Satz können wir heute als eine experimentell vollkommen gesicherte Tatsache ansehen. Eine der augenfälligsten Illustrationen derselben bildet die sogenannte Brownsche Molekularbewegung, welche man durch das Mikroskop an kleinen, in einer Flüssigkeit suspendierten Staubteilchen beobachten kann, die durch die Stöße der an sie prallenden unsichtbaren Flüssigkeitsmoleküle hin und her getrieben werden, um so lebhafter, je höher die Temperatur gewählt ist. Wenn wir nun weiter die Annahme machen, welcher grundsätzlich nichts im Wege steht, daß ein jeder einzelne Stoß ein reversibler Vorgang ist, für den die elementar strenge dynamische Gesetzlichkeit gilt, so können wir sagen, daß durch die eingeführte mikroskopische Betrachtungsweise die Gesetze der irreversiblen Vorgänge, oder daß die statistische, grobe und angenäherte Gesetzlichkeit auf die dynamische, feine und absolute Gesetzlichkeit zurückgeführt worden ist.

Die großen Erfolge, welche durch die Einführung der statistischen Gesetzlichkeit auf zahlreichen Gebieten der physikalischen Forschung in der jüngsten Zeit erzielt worden sind, haben eine merkwürdige Wandlung in den Anschauungen der Physiker gezeitigt. Anstatt, wie früher, in der Energetik, das Auftreten irreversibler Prozesse zu leugnen oder wenigstens als zweifelhaft hinzustellen, wird jetzt vielfach der Versuch gemacht, die statistische Gesetzlichkeit in den Vordergrund zu rücken, alle bisher als dynamisch betrachteten Gesetze, sogar die Gravitation, auf statistische zurückzuführen, mit anderen Worten: eine absolute Gesetzlichkeit in der Natur ganz auszuschließen. In der Tat muß folgendes einleuchten: was wir in der Natur prüfen und messen können, läßt sich niemals durch ganz bestimmte Zahlen ausdrücken, sondern enthält immer eine gewisse, durch die unvermeidlichen Fehlerquellen der Messungen bedingte Unbestimmtheit. Daraus



folgt, daß es uns niemals wird gelingen können, durch Messungen zu entscheiden, ob ein Gesetz in der Natur absolut genau gilt oder nicht. Und vom Standpunkt der allgemeinen Erkenntnistheorie aus kommen wir mit der Prüfung dieser Frage auch zu keinem anderen Ergebnis. Wenn wir, wie es uns gleich im Anfang entgegentrat, nicht einmal imstande sind, den Nachweis zu führen, daß in der Natur überhaupt eine Gesetzlichkeit besteht, so wird es uns um so weniger gelingen, von vornherein zu beweisen, daß diese Gesetzlichkeit eine absolute ist.

Man muß also vom logischen Standpunkt aus der Hypothese, daß es in der Natur nur statistische Gesetzlichkeit gibt, von vornherein volle Berechtigung zugestehen. Eine andere Frage ist, ob diese Annahme sich für die Forschung empfiehlt, und diese Frage möchte ich mit Entschiedenheit verneinen. Zunächst ist zu bedenken, daß nur die streng dynamische Gesetzlichkeit den Anforderungen unseres Erkenntnistriebes voll genügt, während dagegen jedes statistische Gesetz im Grunde unbefriedigend ist, einfach deshalb, weil es nicht genau gilt, sondern in Einzelfällen Ausnahmen zuläßt, und man stets vor der Frage steht, welches denn die Fälle sind, in welchen solche Ausnahmen eintreten.

Gerade derartige Fragen bilden nun aber den stärksten Antrieb zur Erweiterung und Verfeinerung der Forschungsmethoden. Wenn man die statistische Gesetzmäßigkeit als die letzte, tiefste annimmt, so liegt prinzipiell gar kein Grund vor, bei irgendeinem vorliegenden statistischen Gesetz nach den Ursachen der Schwankungserscheinungen zu fragen, während doch in Wirklichkeit gerade das Bestreben, hinter jeder statistischen Gesetzlichkeit eine dynamische, streng kausale zu suchen, uns die allerwichtigsten Fortschritte in der Erforschung der atomistischen Vorgänge gebracht hat.

Liegt aber andererseits ein Gesetz vor, welches sich bisher innerhalb der Messungsfehler stets als genau gültig erwiesen hat, so ist gewiß zuzugeben, daß man durch Messungen niemals endgültig wird feststellen können, ob es nicht vielleicht doch statistischer Natur ist. Aber es macht doch einen wesentlichen Unterschied, ob man durch theoretische Überlegungen veranlaßt wird, es als statistisch oder als dynamisch anzusehen.

Denn im ersten Falle wird man unablässig durch stetige Verfeinerung der Messungsmethoden nach den Grenzen seiner Gültigkeit suchen, im zweiten wird man aber derartige Bemühungen für fruchtlos halten und sich dadurch manche unnütze Arbeit ersparen. Es sind in der Physik schon allzu viele Anstrengungen auf Lösung von Scheinproblemen verwendet worden, als daß man solche Überlegungen für bedeutungslos halten dürfte.

Daher liegt es nach meiner Meinung durchaus im Interesse einer gesunden Fortentwicklung, nicht nur das Bestehen einer Gesetzlichkeit überhaupt, sondern auch den streng kausalen Charakter dieser Gesetzlichkeit mit zu den Postulaten der physikalischen Wissenschaften zu rechnen, wie das im Grunde bisher stets geschehen ist, und das Ziel der Forschung nicht eher als erreicht zu betrachten, als bis eine jede Beobachtung statistischer Gesetzlichkeit in eine oder mehrere dynamische aufgelöst ist. Dadurch soll die hohe praktische Bedeutung der Beschäftigung mit der statistischen Gesetzlichkeit durchaus nicht herabgesetzt werden. Wie die Meteorologie, die Geographie, die Sozialwissenschaft, so hat auch die Physik vielfach mit statistischen Gesetzen zu arbeiten. Aber ebenso wie niemand daran zweifelt, daß die sogenannten zufälligen Schwankungen in den klimatologischen Kurven, in der Bevölkerungsstatistik, in den Mortalitätstabellen in jedem einzelnen Fall streng kausal bedingt sind, so wird für den Physiker die Frage stets einen wohlberechtigten Sinn haben, warum von zwei benachbarten Uranatomen das eine um viele Millionen Jahre früher explodiert als das andere.

Die Voraussetzung einer strengen Kausalität wird auch die Wissenschaft vom geistigen Leben niemals entbehren können. Von Gegnern dieser Ansicht ist häufig die Tatsache der Willensfreiheit des Menschen ins Treffen geführt worden. Daß hier durchaus kein Widerspruch vorliegt, daß vielmehr die Willensfreiheit des Menschen vollkommen verträglich ist mit dem universellen Walten eines strengen Kausalgesetzes, habe ich bereits früher einmal ausführlich zu begründen Gelegenheit gehabt. Da meine Ausführungen hierüber stellenweise arg mißverstanden worden sind, und da der Gegenstand doch



gewiß bedeutendes Interesse besitzt, so bitte ich um die Erlaubnis, auch noch auf diesen Punkt hier mit einem kurzen Wort eingehen zu dürfen.

Das Kausalgesetz verlangt, daß sowohl die Handlungen als auch die seelischen Vorgänge, insbesondere auch die Willensmotive eines jeden Menschen, in irgendeinem Augenblick vollständig bestimmt sind durch den Zustand seiner gesamten Innenwelt im vorhergehenden Augenblick und die hinzutretenden Einflüsse der Umwelt. Wir haben keinerlei Grund, an der Richtigkeit dieses Satzes zu zweifeln. Denn bei der Frage der Willensfreiheit handelt es sich gar nicht darum, ob es einen derartigen bestimmten Zusammenhang gibt, sondern es handelt sich darum, ob dieser Zusammenhang dem Betreffenden selber erkennbar ist. Einzig und allein dieser Punkt ist es, an welchem die Entscheidung darüber haftet, ob der Mensch sich frei fühlen kann oder nicht. Nur wenn jemand imstande wäre, allein auf Grund des Kausalgesetzes seine eigene Zukunft vorauszusehen, müßte man ihm das Bewußtsein der Willensfreiheit absprechen. Ein solcher Fall ist aber deshalb unmöglich, weil er einen logischen Widerspruch enthält. Denn jedes vollständige Erkennen setzt voraus, daß das zu erkennende Objekt durch innere Vorgänge im erkennenden Subjekt nicht verändert wird, und diese Voraussetzung ist hinfällig, wenn Objekt und Subjekt identisch werden. Oder konkreter gesprochen: da die Erkenntnis irgendeines Willensmotives im eigenen Innern ein Erlebnis ist, aus welchem ein neues Willensmotiv entspringen kann, so vermehrt sich durch sie die Zahl der möglichen Willensmotive. Diese Feststellung bringt eine neue Erkenntnis, die abermals ein neues Willensmotiv zeitigen kann, und so geht die Kette der Schlußfolgerung weiter, ohne daß man jemals zur Feststellung des für eine zukünftige eigene Handlung endgültig ausschlaggebenden Motivs gelangen kann, das heißt zu einer Erkenntnis, die nicht abermals ihrerseits ein neues Willensmotiv auslöst. Ganz anders, wenn man auf eine vollzogene, fertig vorliegende Handlung zurückschaut. Hier wird der Wille durch die Erkenntnis nicht mehr beeinflußt und daher die streng kausale Betrachtung der Willensmotive wenigstens prinzipiell durchführbar.

Wer den Sinn dieser Überlegung bezweifelt und nicht einzusehen vermag, warum ein hinreichend intelligenter Geist nicht imstande sein sollte, die kausalen Bedingungen seines gegenwärtigen Ich vollständig zu begreifen, der dürfte eigentlich auch nicht einsehen können, warum ein Riese, der so groß ist, daß er auf jedermann herabschaut, nicht auch imstande sein sollte, auf sich selber herabzuschauen. Nein, aus dem Kausalgesetz allein wird auch der klügste Mann niemals die entscheidenden Motive für seine eigenen bewußten Handlungen ableiten können; dazu bedarf er einer anderen Richtschnur, nämlich eines Sittengesetzes, für welches auch die höchste Intelligenz und die feinste Selbstanalyse keinen Ersatz zu bieten vermag.

## III.

Doch zurück zur Physik, wo derartige Verwicklungen, wie die soeben besprochenen, in der Regel keine Rolle spielen. Es liegt mir daran, Ihnen, meine verehrten Damen und Herren, hier noch die wichtigsten charakteristischen Merkmale zu schildern, welche das Bestreben, alle physikalischen Vorgänge auf dem beschriebenen Wege in einen streng kausalen Zusammenhang zu bringen, dem gegenwärtigen physikalischen Weltbild eingeprägt hat. Schon ein flüchtiger Blick zeigt die enorme Veränderung des Bildes gegenüber dem Zustand zu Beginn des Jahrhunderts. Man darf wohl sagen, daß eine derartige stürmische Entwicklung seit den Tagen Galileis und Newtons nicht vorgekommen ist, und wir sind stolz darauf, daß diesmal die deutsche Wissenschaft einen wesentlichen Anteil an ihr genommen hat. Den Anstoß gab naturgemäß die mit den Fortschritten der Technik auf das engste zusammenhängende außerordentliche Verfeinerung der Messungsmethoden, welche dann ihrerseits zur Feststellung von neuen Tatsachen und dadurch auch zur Revision und Erweiterung der Theorie führte. Besonders zwei neue Ideen sind es, die der heutigen Physik ihr charakteristisches Gepräge geben. Sie sind niedergelegt einerseits in der Relativitätstheorie, andererseits in der Quantenhypothese; jede in ihrer Art zugleich umwälzend und fruchttragend, aber doch einander gänzlich fremd und in gewissem Sinne sogar gegensätz-



lich. Von ihnen lassen Sie mich einiges berichten, soweit es die mir noch zur Verfügung stehende Zeit gestattet.

Die Relativitätslehre war eine Zeitlang, man kann sagen, in aller Munde. Die Auseinandersetzungen für und gegen sie wirkten sich in die weitesten Kreise aus, bis hinein in die Tagespresse, wo von Berufenen und noch mehr von Unberufenen um sie gestritten wurde. Heute ist darin eine gewisse Beruhigung eingetreten, worüber wohl niemand eine aufrichtigere Befriedigung empfinden dürfte als der Urheber der Theorie selber. Das öffentliche Interesse scheint einigermaßen gesättigt und hat sich zur Zeit anderen Modethemen zugewendet. Mancher dürfte nun vielleicht geneigt sein, daraus den Schluß zu ziehen, daß die Relativitätstheorie ihre Rolle in der Wissenschaft jetzt ziemlich ausgespielt habe. Soweit ich beurteilen kann, ist gerade das Gegenteil der Fall. Die Relativitätstheorie ist heute zu einem so festen Bestandteil des physikalischen Weltbildes geworden, daß man von ihr, wie von allem Selbstverständlichen, kein besonderes Aufhebens mehr macht. Und in der Tat: so neuartig und revolutionierend die Idee der speziellen und der allgemeinen Relativität im ersten Augenblick ihres Auftretens auf die ganze physikalische Welt gewirkt hat: ihre Behauptungen und ihre Angriffe richteten sich im Grunde gar nicht gegen die großen anerkannten und bewährten Gesetze der Physik, sondern nur gegen gewisse, allerdings tief eingewurzelte, aber doch lediglich gewohnheitsmäßige Anschauungen, von der Art derer, die, wie ich schon oben zu schildern versuchte, für das erste Verständnis physikalischer Zusammenhänge sehr nützlich sind, die aber abgestoßen werden müssen, wenn es sich als notwendig herausstellt, die Zusammenhänge zu verallgemeinern und zu vertiefen.

Als ein besonders lehrreiches Beispiel will ich hier nur herausgreifen den Begriff der Gleichzeitigkeit. Nichts scheint dem unbefangenen Beobachter selbstverständlicher, als daß es einen bestimmten Sinn hat zu sagen, zwei Ereignisse, die an zwei voneinander entfernten Orten stattfinden, etwa das eine auf der Erde, das andere auf dem Mars, seien gleichzeitig. Denn es ist einem jeden unbenommen, in Gedanken beliebig große Entfernungen vollkommen zeitlos zu überfliegen und

die beiden Ereignisse in der inneren Anschauung direkt nebeneinanderzustellen. Auch muß immer wieder betont werden, daß die Relativitätstheorie an dieser Wahrheit nichts geändert hat. Im Vertrauen auf sie kann ein jeder, wofern er nur über hinreichend genaue Messungsinstrumente verfügt, vollkommen zweifelsfrei feststellen, ob die Ereignisse gleichzeitig sind, und er wird, wenn er die Zeitmessung auf verschiedene Weise, mit verschiedenen Instrumenten, die sich gegenseitig kontrollieren, korrekt ausführt, immer auf das nämliche Resultat kommen. Insofern bleibt also alles beim alten.

Aber nach der Relativitätstheorie darf er es nicht als selbstverständlich voraussetzen, daß ein anderer, relativ zu ihm bewegter Beobachter sich die beiden Ereignisse auch als gleichzeitig denken muß. Denn die Gedanken und die Anschauungen eines Menschen sind nicht immer die Gedanken und die Anschauungen eines anderen Menschen. Wenn nun die beiden Beobachter sich über den Inhalt ihrer Gedanken und Anschauungen auseinandersetzen, so wird ein jeder sich auf seine Messungen berufen, und da wird es sich herausstellen, daß die beiden bei der Deutung ihrer Messungen von ganz verschiedenen Voraussetzungen ausgegangen sind. Welche Voraussetzung aber die richtige ist, wird sich ebensowenig entscheiden lassen wie die Meinungsverschiedenheit darüber, welcher von den beiden Beobachtern sich in Ruhe und welcher sich in Bewegung befindet. Auf diesen Punkt kommt es aber wesentlich an; denn der Gang einer Uhr erleidet, wie jedenfalls nicht verwunderlich ist, eine Veränderung, wenn die Uhr von der Stelle bewegt wird, und daraus folgt, daß die Uhren der beiden Beobachter verschieden gehen. Das Schlußergebnis ist also, daß ein jeder der beiden mit gleichem Recht von sich behaupten kann, daß er selber sich in Ruhe befindet und daß seine Zeitmessung die richtige ist, während doch der eine Beobachter zwei Ereignisse für gleichzeitig hält, die es nach dem anderen nicht sind. Derartige Gedankengänge sind gewiß eine harte Zumutung für unser Vorstellungsvermögen, aber das geforderte Opfer an Anschaulichkeit erweist sich als verschwindend geringfügig gegen die unschätzbaren Vorteile einer großartigen Verallgemeinerung und Vereinfachung des physikalischen Weltbildes.



Wer aber trotzdem von der Meinung nicht loskommen kann, daß die Relativitätstheorie schließlich doch an irgendeinem inneren Widerspruch leidet, der möge bedenken, daß eine Theorie, deren vollständiger Inhalt sich in eine mathematische Formel fassen läßt, sich selber so wenig widersprechen kann, wie es zwei verschiedene Folgerungen tun können, die beide aus der nämlichen Formel fließen. Unsere Anschauungen müssen sich eben nach den Ergebnissen der Formel richten, nicht umgekehrt.

Die letzte Entscheidung über die Zulässigkeit und über die Bedeutung der Relativitätstheorie liegt freilich, wie selbstverständlich, bei der Erfahrung, und gerade der Umstand, daß überhaupt eine Prüfung an der Erfahrung möglich ist, muß als das wichtigste Zeugnis für die Fruchtbarkeit der Theorie angesehen werden. Bisher hat sich keinerlei Widerspruch mit der Erfahrung feststellen lassen, was ich hier gegenüber gewissen neuerdings auch in die breite Öffentlichkeit gelangten Nachrichten besonders betonen möchte. Aber auch derjenige, welcher aus irgendeinem Grunde das Auftreten eines Widerspruches mit der Erfahrung für möglich oder für wahrscheinlich hält, kann von seinem Standpunkt aus nichts Besseres tun, als an dem Ausbau der Relativitätstheorie mitzuarbeiten und ihre Konsequenzen immer weiter zu treiben. Denn dies wird das einzige Mittel sein, um sie an der Hand der Erfahrung zu widerlegen. Eine solche Arbeit wird dadurch erleichtert, daß die Aussagen der Relativitätstheorie eindeutig und verhältnismäßig durchsichtig sind, und daß sie sich vortrefflich der klassischen Physik einfügen lassen.

Ja, wenn nicht Bedenken historischer Art im Wege ständen, würde ich für meinen Teil keinen Augenblick zögern, die Relativitätstheorie noch mit zur klassischen Physik zu rechnen. Denn sie hat dieser Physik erst gewissermaßen die Krone aufgesetzt, indem sie mit der Verschmelzung von Raum und Zeit auch die Begriffe der Masse und der Energie sowie die der Gravitation und der Trägheit unter einem höheren Gesichtspunkt vereinigt hat. Die Frucht dieser neuen Auffassung ist die tadellos symmetrische Form, welche nunmehr die Erhaltungssätze für Energie und Impuls annehmen, als gleichwertige Folgerungen aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung,

diesem umfassendsten aller physikalischen Gesetze, welches die Mechanik in gleichem Maße beherrscht wie die Elektrodynamik.

Diesem imposanten Aufbau von wunderbarer Harmonie und Schönheit steht nun gegenüber die Quantenhypothese, als ein fremdartiger bedrohlicher Sprengkörper, welcher schon heute einen klaffenden Riß, von unten bis oben, durch das ganze Gebäude gezogen hat. Die Quantenhypothese ist nicht, gleich der Relativitätstheorie, wie aus einem Guß, als ein einfacher in sich geschlossener Gedanke durchsichtigen Inhalts auf den Plan getreten, um durch einen prinzipiell hochbedeutsamen, aber praktisch in den meisten Fällen kaum merklichen Eingriff die bis dahin bekannten Begriffe und Zusammenhänge der Physik zu modifizieren, sondern sie hat sich anfangs auf einem ganz speziellen Gebiete, bei der Aufklärung der Gesetze der Wärmestrahlung, wo die klassische Theorie in eine schwere Verlegenheit geraten war, als einziger rettender Ausweg dargeboten. Als es sich dann aber zeigte, daß sie auch noch ganz andere Probleme, wie die der lichtelektrischen Wirkungen, der spezifischen Wärme, der Ionisierung, der chemischen Reaktionen, welche der klassischen Theorie gewisse Schwierigkeiten bereiteten, ihrerseits entweder sofort spielend löste oder wenigstens auffallend förderte, war es bald entschieden, daß sie nicht nur als Arbeitshypothese, sondern als ein neues grundlegendes physikalisches Prinzip zu bewerten ist, dessen Bedeutung überall da sichtbar wird, wo es sich um feine schnelle Vorgänge handelt.

Das Bedenkliche dabei ist nun aber, daß die Quantenhypothese nicht nur den bisherigen Anschauungen widerspricht — das wäre nach dem oben Gesagten noch verhältnismäßig leicht zu ertragen —, sondern daß sie, wie sich mit der Zeit immer deutlicher herausgestellt hat, einige der für den Aufbau der klassischen Theorie durchaus notwendigen Grundvoraussetzungen geradezu leugnet. Die Einführung der Quantenhypothese bedeutet daher nicht, wie die der Relativitätstheorie, eine Modfiikation, sondern eine Durchbrechung der klassischen Theorie.

Selbstverständlich würde nun an sich nichts im Wege stehen, ja man würde sich notwendig dazu entschließen müssen, die klassische Theorie ganz zu opfern, wenn die Quantenhypothese ihr wirklich in allen Punkten entweder überlegen oder wenigstens gleichwertig wäre. Das ist aber auch wiederum durchaus nicht der Fall. Denn es gibt Gebiete der Physik, so besonders das weite Gebiet der Interferenzerscheinungen, in denen sich die klassische Theorie auch den feinsten Messungen gegenüber bis in alle Einzelheiten bewährt hat, während die Quantenhypothese, wenigstens in ihrer heutigen Form, dort überhaupt versagt, und zwar nicht nur in dem Sinne, daß sie nicht anwendbar wäre, sondern so, daß sie bestimmte Resultate liefert, die mit der Erfahrung nicht übereinstimmen.



So ist es denn gekommen, daß heute jede der beiden Theorien sozusagen ihre besondere Domäne hat, wo sie sich unangreifbar fühlen kann, und daß auf zwischenliegenden Gebieten, wie zum Beispiel bei den Erscheinungen der Dispersion und der Zerstreuung des Lichtes, ein gewisser hin und her wogender Konkurrenzkampf sich abspielt, bei dem beide Theorien annähernd dasselbe leisten, so daß die Physiker je nach ihrer persönlichen Einstellung bald mit der einen, bald mit der anderen Theorie arbeiten — gewiß für jeden, der sich ernsthaft bemüht, nach realen Zusammenhängen zu suchen, ein höchst unbehaglicher, ja auf die Dauer ganz unerträglicher Zustand.

Zur näheren Illustration dieser eigentümlichen Verhältnisse lassen Sie mich aus dem überaus reichen hier vorliegenden Material an experimenteller und theoretischer Forschungsarbeit hier nur ein einziges ganz spezielles Stück herausgreifen, indem ich an zwei einfache Tatsachen anknüpfe. Denken wir uns zwei dünne Strahlenbündel violetten Lichtes, welche dadurch erzeugt sind, daß man einer punktförmigen Lichtquelle einen undurchsichtigen Schirm mit zwei kleinen Löchern gegenüberstellt. Wenn die aus beiden Löchern austretenden Strahlenbündel mittels geeigneter Spiegelung so gelenkt werden, daß sie auf einer entfernten weißen Wand zusammentreffen, so erscheint der von ihnen gemeinsam auf der Wand erzeugte Lichtfleck nicht gleichmäßig hell, sondern von dunklen Streifen durchzogen. Das ist die eine Tatsache. Die andere ist die, daß irgendein lichtempfindliches Metall, welches

einem dieser Strahlenbündel in den Weg gestellt wird, fortwährend Elektronen mit einer ganz bestimmten von der Lichtstärke unabhängigen Geschwindigkeit von sich schleudert.

Läßt man nun die Intensität der Lichtquelle immer schwächer werden, so bleibt nach allen bisherigen Erfahrungen in dem ersten Falle das Streifenbild völlig ungeändert, nur die Beleuchtungsstärke nimmt entsprechend ab. In dem anderen Fall bleibt aber auch die Geschwindigkeit der ausgeschleuderten Elektronen völlig ungeändert, nur findet das Ausschleudern weniger häufig statt.

Wie trägt nun die Theorie diesen beiden Tatsachen Rechnung? Die erste wird von der klassischen Theorie vortrefflich dadurch erklärt, daß in jedem Punkt der weißen Wand, welcher von beiden Strahlenbündeln gleichzeitig beleuchtet wird, die beiden dort zusammentreffenden Strahlen sich je nach dem Gangunterschied der entsprechenden Lichtwellen entweder schwächen oder verstärken. Die zweite Tatsache wird ebenso vortrefflich von der Quantentheorie dadurch erklärt, daß die Strahlungsenergie nicht in kontinuierlichem Flusse, sondern stoßweise in bestimmten, mehr oder weniger zahlreichen gleichen unteilbaren Quanten auf das lichtempfindliche Metall trifft, und daß je ein auffallendes Quant ein Elektron aus dem Metallverband reißt. Dagegen sind bis jetzt alle Versuche gescheitert, entweder die Interferenzstreifen durch die Quantentheorie oder den photoelektrischen Effekt durch die klassische Theorie zu erklären. Denn wenn die Strahlungsenergie wirklich nur in unteilbaren Quanten fliegt, so kann ein von der Lichtquelle emittiertes Quant nur entweder durch das eine oder durch das andere Loch des undurchsichtigen Schirmes fliegen, es können also, bei hinreichend geringer Lichtstärke, unmöglich zwei verschiedene Strahlen gleichzeitig auf einem Punkt der weißen Wand zusammentreffen, und dann ist eine Interferenz ausgeschlossen. In der Tat verschwinden die Streifen stets vollständig, wenn man einen der beiden Strahlen ganz abblendet.

Wenn aber andererseits die von einer punktförmigen Lichtquelle emittierte Strahlungsenergie sich nach allen Richtungen kontinuierlich über immer größere Räume ausbreitet, so muß sie eine entsprechende Verdünnung erleiden, und es



ist nicht einzusehen, wie eine sehr schwache Bestrahlung einem Elektron eine ebenso große Austrittsgeschwindigkeit erteilen kann wie eine sehr starke. Natürlich sind die verschiedensten Versuche gemacht worden, um diese Schwierigkeit zu heben. Der nächstliegende ist wohl der, anzunehmen, daß die Energie der ausgeschleuderten Elektronen gar nicht der auffallenden Strahlung entnommen wird, sondern dem Innern des Metalls entstammt, so daß die Strahlung nur gewissermaßen eine auslösende Wirkung auf das Metall ausübt, wie ein Funke auf ein Pulverfaß. Es ist aber nicht gelungen, die wirksame Energiequelle nachzuweisen oder auch nur plausibel zu machen. Nach einer anderen Annahme soll die Bewegungsenergie der Elektronen zwar der auffallenden Strahlung entstammen, aber die Wirkung soll immer erst dann eintreten, wenn die Bestrahlung so lange gedauert hat, bis die zur Erzeugung einer bestimmten Geschwindigkeit erforderliche Energie vollständig beisammen ist. Das würde aber unter Umständen Minuten und Stunden in Anspruch nehmen, während tatsächlich die Wirkung häufig sehr viel früher eintritt.

Auf den tiefen Ernst der hier vorliegenden Schwierigkeiten wirft ein bezeichnendes Licht der Umstand, daß neuerdings von berufenster Seite sogar der Vorschlag gemacht worden ist, die Annahme der genauen Gültigkeit des Prinzips der Erhaltung der Energie zu opfern — ein Ausweg, der wohl mit gewissem Recht ein verzweifelter genannt werden darf, und der allerdings bald durch besondere Versuche als unzugänglich erwiesen werden konnte.

Während so bisher alle Versuche fehlschlugen, die Gesetze der Elektronenemission vom Standpunkt der klassischen Theorie aus zu begreifen, werden die nämlichen und noch manche andere Gesetzmäßigkeiten, die sich auf die Wechselwirkung von Strahlung und Materie beziehen, sofort verständlich und erscheinen sogar als notwendig, wenn man annimmt, daß die Lichtquanten als einzelne winzige Gebilde selbständig im Raum herumfliegen und beim Anprall auf Materie sich ähnlich verhalten wie wirkliche substantielle Atome.

Da wir uns aber doch notwendig für eine einzige Auffassung entscheiden müssen, so spitzt sich das ganze Problem im Grunde offenbar auf die Frage zu, ob die von der Lichtquelle

emittierte Strahlungsenergie sich beim Verlassen der Lichtquelle spaltet, so daß ein Teil durch das eine, ein anderer durch das andere Loch des undurchsichtigen Schirmes geht, oder ob die Energie in unteilbaren Quanten abwechselnd durch eins der beiden Löcher fliegt. Diese Frage richtet sich an jede Theorie der Quanten, und jede Theorie ist genötigt, zu ihr irgendwie Stellung zu nehmen; doch hat bisher noch kein Physiker vermocht, sie befriedigend zu beantworten.

Darf man denn aber überhaupt von der Energie der freien Strahlung als von etwas Reellem reden, da doch alle Messungen sich immer nur auf Vorgänge in materiellen Körpern beziehen? — Wenn wir wirklich an der genauen Gültigkeit des Energieprinzips festhalten wollen, was doch gerade durch die neueren Erfahrungen nahegelegt wird, so kann kein Zweifel darüber bestehen, daß dann einem jeden Strahlungsfeld ein ganz bestimmter, mehr oder weniger genau berechenbarer Betrag von Energie zugeschrieben werden muß, der durch Absorption von Strahlung vermindert, durch Emission vermehrt wird. Die Frage ist nur, wie sich diese Energie verhält. Und da kann es ebensowenig zweifelhaft sein, daß wir, um einen Ausweg aus dem schwierigen Dilemma zu finden, uns dazu werden entschließen müssen, an den allerersten Voraussetzungen, von denen wir in der theoretischen Physik auszugehen gewöhnt sind, und die sich bisher allenthalben bewährt haben, gewisse Erweiterungen und Verallgemeinerungen vorzunehmen, — ein Ergebnis, das allerdings für unseren Erkenntnistrieb zunächst gewiß etwas Unbefriedigendes hat. Da es immerhin einige Beruhigung zu gewähren pflegt, wenn man wenigstens die Möglichkeit einer Lösung des Rätsels irgendwo offen sieht, so möchte auch ich der Versuchung nicht widerstehen, mit einigen Worten auf die Frage einzugehen, in welcher Richtung vielleicht der Ausweg gefunden werden könnte.

Das Radikalmittel, allen Schwierigkeiten zu entgehen, wäre ohne Zweifel die Preisgebung der üblichen Annahme, daß die Strahlungsenergie irgendwie lokalisiert ist, das heißt daß in jedem Raumteil eines bestimmten elektromagnetischen Feldes sich zu einer bestimmten Zeit ein bestimmter Energiebetrag vorfindet. Denn wenn man diese Voraussetzung fallen läßt, erledigt sich das ganze Problem einfach dadurch, daß die



Frage, ob ein Lichtquant durch das eine oder durch das andere Loch des undurchsichtigen Schirmes fliegt, gar keinen bestimmten physikalischen Sinn hat. Indessen dürfte dieser letzte Ausweg aus dem Dilemma nach meiner Meinung wenigstens vorläufig doch noch einen etwas zu weitgehenden Verzicht darstellen. Denn da die Strahlungsenergie insgesamt einen ganz bestimmten angebbaren Wert besitzt, da ferner das elektromagnetische Vektorfeld, welches durch einen Strahl gebildet wird, mit seinem gesamten raumzeitlichen Verhalten durch die klassische Elektrodynamik bis in alle optische Einzelheiten in genauer Übereinstimmung mit der Wirklichkeit dargestellt wird, und da endlich die Energie zugleich mit dem Felde entsteht und verschwindet, so wird sich die Frage nach der Art, wie die Energie im einzelnen durch das Feld im einzelnen bestimmt wird, nicht leicht von der Hand weisen lassen.

Wenn wir uns nun dazu entschließen, dieser Frage soweit als möglich nachzugehen, so scheint, um dem Zwang der gestellten Alternative zu entgehen, wohl der Gedanke naheliegend, daß man den gesetzlichen Zusammenhang, der zwischen einem Strahl, oder deutlicher gesprochen, zwischen einer elektromagnetischen Welle einerseits und zwischen der von ihr mitgeführten Energie anderseits besteht, zwar beibehält, aber nicht so einfach und so eng annimmt, als es die klassische Theorie tut. Nach der klassischen Theorie enthält nämlich jeder Teil einer elektromagnetischen Welle, auch der allerkleinste, einen entsprechenden, seiner Größe proportionalen Betrag an Energie, der sich mit ihr zusammen ausbreitet. Wenn man diesen festen Zusammenhang lockert, das heißt wenn man es zuläßt, daß die Energie der Welle nicht in so direkter Weise bis in die feinsten Teile mit ihr verknüpft ist, so wird eine Möglichkeit dafür geschaffen, daß die von der Lichtquelle ausgesandte Welle sich in beliebig viele Teile spaltet, im Sinne der klassischen Theorie, und daß dennoch die Energie der Welle an bestimmten Stellen konzentriert ist, im Sinne der Quantentheorie. Der erste Umstand ermöglicht die Erklärung der Interferenzerscheinungen, dadurch, daß auch die schwächste Welle teilweise durch das eine, teilweise durch das andere Loch des undurchsichtigen Schirmes geht, der andere Umstand ermöglicht die Erklärung des lichtelek-

trischen Effektes, dadurch, daß die Welle ihre Energie immer nur in ganzen Quanten auf die Elektronen prallen läßt. Aber wie soll man sich einen Teil einer Lichtwelle ohne die seiner Größe entsprechende Energie denken? Das ist gewiß eine harte Zumutung, aber nach meiner Meinung ist das im Grunde nicht schwerer, als sich einen Teil eines Körpers ohne die seiner Dichte entsprechende Materie zu denken. Zu der letzteren Annahme sind wir aber bekanntlich durch die Tatsache genötigt, daß die Materie bei fortgesetzter räumlicher Teilung ihre einfachen Eigenschaften verliert, da ihre Masse nicht mehr dem von ihr eingenommenen Raume proportional bleibt, sondern sich in eine Anzahl diskreter Moleküle von bestimmter Größe auflöst. Ganz ähnlich könnte es bei der elektromagnetischen Energie und dem ihr zugeordneten Impuls sein.

Bisher war man gewohnt, die elementaren Gesetze der elektrodynamischen Vorgänge ausschließlich im unendlich Kleinen zu suchen. Man teilte alle elektromagnetischen Felder nach Raum und Zeit in unendlich kleine Teile und stellte ihr gesamtes gesetzliches Verhalten durch raumzeitliche Differentialgleichungen dar. In dieser Beziehung müssen wir offenbar von Grund aus umlernen. Denn es hat sich gezeigt, daß diese einfache Gesetzlichkeit bei einer gewissen Grenze der Teilung ein Ende hat, und daß für noch feinere Vorgänge eine gewisse Komplizierung eintritt, von einer Form, die zu einer Atomisierung der raumzeitlichen Wirkungsgröße, also zu der Annahme von Wirkungselementen oder Wirkungsatomen drängt.

Einen vielversprechenden Fortschritt in der angedeuteten Richtung bezeichnet die Begründung der sogenannten Quantenmechanik, wie sie neuerdings in den Händen der Göttinger Physiker Heisenberg, Born und Jordan bereits schöne Erfolge gezeitigt hat. Aber erst die weitere Entwicklung muß zeigen, inwieweit wir auf dem durch die Quantenmechanik eröffneten Wege der Lösung unseres Problems näherkommen können. Denn auch die schönsten mathematischen Spekulationen schweben so lange in der Luft, als ihnen nicht durch bestimmte Erfahrungstatsachen ein fester Halt gegeben wird, und wir müssen hoffen und vertrauen, daß die Kunst der experimentierenden Physiker, welche schon in so manchen



verfänglichen Fragen die zweifelsfreie Entscheidung gebracht hat, auch in dem vorliegenden schwierigen Falle das Dunkel aufhellen wird. Dann kann kein Zweifel darüber bestehen, daß der durch den Ansturm der Quantenhypothese von dem Gebäude der klassischen Physik abgesprengte Teil als wertloser Schutt zu Boden sinken und durch einen passenderen und festeren Anbau ersetzt werden wird.

Meine verehrten Damen und Herren! Wir haben gesehen, wie die Physik, die noch vor einem Menschenalter zu den ältesten und ausgereiftesten Wissenschaften von der Natur gezählt werden konnte, gegenwärtig in eine Sturm- und Drangperiode eingetreten ist, die wohl die interessanteste von allen bisherigen zu werden verspricht. Ihre Überwindung wird uns nicht nur zur weiteren Entdeckung neuer Naturvorgänge, sondern sicherlich auch zu ganz neuen Einsichten in die Geheimnisse der Erkenntnistheorie führen. Vielleicht erwarten uns auf dem letzteren Gebiet noch manche Überraschungen, und es könnte sich wohl ereignen, daß dabei gewisse ältere, jetzt in Vergessenheit geratene Anschauungen wieder aufleben und eine neue Bedeutung zu gewinnen anfangen. Deshalb dürfte ein aufmerksames Studium der Anschauungen und Ideen unserer großen Philosophen auch in dieser Richtung sehr förderlich wirken können.

Es hat Zeiten gegeben, in denen sich Philosophie und Naturwissenschaft fremd und unfreundlich gegenüberstanden. Diese Zeiten sind längst vorüber. Die Philosophen haben eingesehen, daß es nicht angängig ist, den Naturforschern Vorschriften zu machen, nach welchen Methoden und zu welchen Zielen hin sie arbeiten sollen, und die Naturforscher sind sich klar darüber geworden, daß der Ausgangspunkt ihrer Forschungen nicht in den Sinneswahrnehmungen allein gelegen ist, und daß auch die Naturwissenschaft ohne eine gewisse Dosis Metaphysik nicht auskommen kann. Gerade die neuere Physik prägt uns die alte Wahrheit wiederum mit aller Schärfe ein: es gibt Realitäten, die unabhängig sind von unseren Sinnesempfindungen, und es gibt Probleme und Konflikte, in denen diese Realitäten für uns einen höheren Wert besitzen als die reichsten Schätze unserer gesamten Sinnenwelt.

# Das Weltbild der neuen Physik.

(Vortrag, gehalten am 18. Februar 1929 im Physikalischen Institut der Universität Leiden.)

## I.

Meine hochverehrten Damen und Herren! Es sind in diesem Winter zwanzig Jahre geworden, daß ich die Ehre und die Freude hatte, hier in Leiden über die Einheit des physikalischen Weltbildes zu sprechen. Ich war damals einer Einladung gefolgt, welche mir die Naturwissenschaftliche Fakultät des Studentenkorps der Universität übermittelt hatte; sie wurde wirksam unterstützt durch ein Schreiben meines Kollegen Hendrik Antoon Lorentz, der mir in seinem gastfreien Hause eine freundliche Aufnahme bereitete und mich dabei zum ersten Male den Zauber seiner Persönlichkeit empfinden ließ. Das machte mir meinen damaligen Besuch in Leiden zu einem der großen Ereignisse meines Lebens und stimmte mich zu einem Dankesgefühl, das ich seitdem als einen unverlierbaren Schatz treulich bewahre.

Wenn es mir nun heute durch die besondere Liebenswürdigkeit meiner Kollegen wiederum vergönnt ist, über das nämliche Thema vor Ihnen zu reden, so kann ich mich einer tiefen Empfindung der Wehmut nicht erwehren, die mich bei der Erinnerung an jene Zeit befällt. Es fehlt in diesem Kreise der allverehrte Meister, es fehlt Kamerlingh Onnes, es fehlen noch manche andere, die damals hier zugegen waren. Aber die Wissenschaft macht nicht halt bei einzelnen Persönlichkeiten; auch der tätigste und erfolgreichste Forscher muß schließlich einmal die von ihm begonnene Arbeit den Jüngeren zur Weiterführung übergeben, und jeder unter diesen hat die Pflicht, im Rahmen der ihm verliehenen Kräfte an diesem Werk mitzuarbeiten.



So möchte auch ich heute den Versuch wagen, die Entwickelung des physikalischen Weltbildes seit jener Zeit zu schildern, wenn ich mir auch deutlich bewußt bin, daß meine Darstellung noch weit weniger Anspruch auf Vollständigkeit und Abrundung erheben kann als damals vor zwanzig Jahren. Aber ich darf mich wohl einigermaßen mit dem Gedanken trösten, daß die Aufgabe seitdem ungleich schwieriger geworden ist. Denn es sind inzwischen Probleme aufgetaucht, die tiefer in unser ganzes physikalisches Denken eingreifen, als man es vielleicht jemals für möglich hielt. Deshalb scheint es mir geboten, zu Beginn meiner Darlegungen im Interesse der Deutlichkeit etwas weiter auszuholen, selbst auf die Gefahr hin, daß ich längst Bekanntes unnötigerweise vorbringe, um dafür freilich später auf manche Einzelheiten zu verzichten, welche an sich einer Schilderung wohl wert wären, da ich sonst besorgen müßte, Ihre Zeit und Aufmerksamkeit gar zu lange in Anspruch zu nehmen.

In jedem Falle werde ich Ihnen für eine kritische Beurteilung meiner Ausführungen dankbar sein. Daß man die schärfste sachliche Kritik mit echt persönlichem Wohlwollen verbinden kann, dafür hat uns ja Lorentz selber ein leuchtendes Beispiel gegeben.

## II.

Der Aufbau der physikalischen Wissenschaft vollzieht sich auf der Grundlage von Messungen, und da jede Messung mit einer sinnlichen Wahrnehmung verknüpft ist, so sind alle Begriffe der Physik der Sinnenwelt entnommen. Daher bezieht sich auch jedes physikalische Gesetz im Grunde auf Ereignisse der Sinnenwelt. Mit Rücksicht auf diesen Umstand neigen manche Naturforscher und Philosophen zu der Auffassung, daß die Physik es letzten Endes überhaupt nur mit der Sinnenwelt, und zwar natürlich mit der menschlichen Sinnenwelt zu tun habe, daß also zum Beispiel ein sogenannter „Gegenstand“ in physikalischer Hinsicht nichts weiter sei als ein Komplex von verschiedenartigen zusammentreffenden Sinnesempfindungen. Es muß immer wieder betont werden, daß eine solche Auffassung niemals durch logische Gründe widerlegt werden kann. Denn die Logik allein ist nicht im-

stande, irgend jemanden aus seiner eigenen Sinnenwelt herauszuführen; sie kann ihn nicht einmal zwingen, die selbständige Existenz seiner Mitmenschen anzuerkennen.

Aber in der Physik, wie in jeder anderen Wissenschaft, regiert nicht allein der Verstand, sondern auch die Vernunft. Nicht alles, was keinen logischen Widerspruch aufweist, ist auch vernünftig. Und die Vernunft sagt uns, daß, wenn wir einem sogenannten Gegenstand den Rücken kehren und uns von ihm entfernen, doch noch etwas von ihm da ist; sie sagt uns weiter, daß der einzelne Mensch, daß wir Menschenwesen alle mitsamt unserer Sinnenwelt, ja mitsamt unserm ganzen Planeten nur ein winziges Nichts bedeuten in der großen unfaßbar erhabenen Natur, deren Gesetze sich nicht nach dem richten, was in einem kleinen Menschenhirn vorgeht, sondern bestanden haben, bevor es überhaupt Leben auf der Erde gab, und fortbestehen werden, wenn einmal der letzte Physiker von ihr verschwunden sein wird.

Durch solche Erwägungen, nicht durch logische Schlußfolgerungen, werden wir genötigt, hinter der Sinnenwelt noch eine zweite, die reale Welt, anzunehmen, welche ein selbständiges, vom Menschen unabhängiges Dasein führt, eine Welt, die wir allerdings niemals direkt, sondern stets nur durch das Medium der Sinnenwelt hindurch wahrnehmen können, mittels gewisser Zeichen, die sie uns übermittelt; ebenso wie wenn wir einen Gegenstand, der uns interessiert, nur durch eine Brille betrachten können, deren optische Eigenschaften uns gänzlich unbekannt sind.

Wer diesem Gedankengang nicht zu folgen vermag und in der Einführung einer grundsätzlich unerkennbaren realen Welt eine unübersteigliche Schwierigkeit sieht, der mag daran erinnert werden, daß es etwas ganz anderes ist, ob man es mit einer fertig vorliegenden physikalischen Theorie zu tun hat, deren Inhalt man genau analysieren und dabei immer wieder feststellen kann, daß zu ihrer Formulierung die Begriffe der Sinnenwelt vollkommen ausreichen, oder ob man vor der Aufgabe steht, aus einer Anzahl von einzelnen vorliegenden Messungen eine physikalische Theorie erst zu bilden. Die Geschichte der Physik zeigt uns auf jeder Seite, daß diese ungleich schwierigere Aufgabe immer nur auf Grund der



Annahme einer realen, von den menschlichen Sinnen unabhängigen Welt gelöst wurde, und es ist wohl nicht daran zu zweifeln, daß das auch in Zukunft der Fall sein wird. —

Zu diesen beiden Welten, der Sinnenwelt und der realen Welt, kommt nun noch eine dritte Welt hinzu, die wohl von ihnen zu unterscheiden ist: die Welt der physikalischen Wissenschaft oder das physikalische Weltbild. Diese Welt ist, im Gegensatz zu jeder der beiden vorigen, eine bewußte, einem bestimmten Zweck dienende Schöpfung des menschlichen Geistes und als solche wandelbar und einer gewissen Entwickelung unterworfen. Die Aufgabe des physikalischen Weltbildes kann man in doppelter Weise formulieren, je nachdem man das Weltbild mit der realen Welt oder mit der Sinnenwelt in Zusammenhang bringt. Im ersten Fall besteht die Aufgabe darin, die reale Welt möglichst vollständig zu erkennen, im zweiten darin, die Sinnenwelt möglichst einfach zu beschreiben. Es wäre müßig, zwischen diesen beiden Fassungen eine Entscheidung treffen zu wollen. Vielmehr ist jede von ihnen für sich allein genommen einseitig und unbefriedigend. Denn auf der einen Seite ist eine direkte Erkenntnis der realen Welt ja überhaupt nicht möglich, und andererseits läßt sich die Frage, welche Beschreibung mehrerer zusammenhängender Sinneswahrnehmungen die einfachste ist, gar nicht grundsätzlich beantworten. Es ist im Laufe der Entwicklung der Physik mehr als einmal vorgekommen, daß von zwei verschiedenen Beschreibungen diejenige, die eine Zeitlang als die kompliziertere galt, später als die einfachere befunden wurde.

Die Hauptsache bleibt, daß die genannten beiden Formulierungen der Aufgabe sich in ihrer praktischen Auswirkung nicht widersprechen, sondern im Gegenteil in glücklicher Weise ergänzen. Die erste verhilft der vorwärts tastenden Phantasie des Forschers zu den für seine Arbeit völlig unentbehrlichen befruchtenden Ideen, die zweite hält ihn auf dem sicheren Boden der Tatsachen fest. Diesem Umstand entspricht es denn auch, daß die einzelnen Physiker, je nachdem sie mehr einer metaphysischen oder einer positivistischen Gedankenrichtung zuneigen, ihre Arbeit am physikalischen Weltbild mehr nach der einen oder nach der anderen Seite hin einstellen.

Es gibt aber außer den Metaphysikern und den Positivisten noch eine dritte Gruppe von Arbeitern am physikalischen Weltbild. Sie sind dadurch charakterisiert, daß ihr Hauptinteresse sich weder auf dessen Beziehungen zu der realen, noch auf diejenigen zu der Sinnenwelt richtet, sondern vielmehr auf die innere Geschlossenheit und den logischen Aufbau des physikalischen Weltbildes. Das sind die Axiomatiker. Auch deren Tätigkeit ist nützlich und notwendig, aber anch hier schlummert eine bedenkliche Gefahr der Einseitigkeit, welche darin liegt, daß das physikalische Weltbild seine Bedeutung einbüßt und in einen inhaltsleeren Formalismus ausartet. Denn wenn der Zusammenhang mit der Wirklichkeit gelöst wird, so erscheint ein physikalisches Gesetz nicht mehr als eine Beziehung zwischen Größen, welche alle unabhängig voneinander gemessen sind, sondern als eine Definition, durch welche eine dieser Größen auf die übrigen zurückgeführt wird. Eine solche Umdeutung ist deshalb besonders verlockend, weil ja eine physikalische Größe viel exakter durch eine Gleichung zu definieren ist als durch eine Messung; aber sie stellt im Grunde einen Verzicht dar auf die eigentliche Bedeutung der Größe, wobei noch erschwerend ins Gewicht fällt, daß durch die Beibehaltung des Namens leicht zu Unklarheiten und Mißverständnissen Anlaß gegeben wird. —

So sehen wir, wie gleichzeitig von verschiedenen Seiten nach verschiedenen Gesichtspunkten an der Ausgestaltung des physikalischen Weltbildes gearbeitet wird, stets nach dem einen Ziel hin, die Vorgänge der Sinnenwelt miteinander und mit denen der realen Welt gesetzlich zu verknüpfen. Es versteht sich, daß in den verschiedenen Epochen der geschichtlichen Entwicklung bald die eine, bald die andere Richtung in den Vordergrund tritt. In Zeiten, wo das physikalische Weltbild einen mehr stabilen Charakter zeigt, wie es in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts der Fall war, kommt die metaphysische Richtung mehr zur Geltung, man glaubt sich der Erfassung der realen Welt schon verhältnismäßig nahe; dagegen in anderen Zeiten der Veränderlichkeit und Unsicherheit, wie wir gegenwärtig eine erleben, tritt der Positivismus mehr in den Vordergrund, da der gewissenhafte



Forscher dann eher dazu neigt, sich auf den einzig festen Ausgangspunkt, die Vorgänge in der Sinnenwelt, zurückzuziehen.

Wenn wir nun die verschiedenen sich im Laufe der Zeit wandelnden und einander ablösenden Formen des physikalischen Weltbildes in ihrer historischen Aufeinanderfolge überschauen und nach charakteristischen Merkmalen der Veränderung suchen, so müssen vor allem zwei Tatsachen ins Auge fallen. Erstens ist festzustellen, daß es sich bei allen Wandlungen des Weltbildes, im ganzen gesehen, nicht um ein rhythmisches Hinundherpendeln handelt, sondern um eine in einer ganz bestimmten Richtung mehr oder weniger stetig aufwärts fortschreitende Entwicklung, die sich dadurch kennzeichnen läßt, daß der Inhalt unserer Sinnenwelt immer mehr bereichert, unsere Kenntnis von ihr immer mehr vertieft, unsere Herrschaft über sie immer mehr befestigt wird. Das zeigt am schlagendsten ein Blick auf die praktische Auswirkung der physikalischen Wissenschaft. Daß wir heute auf weit größere Entfernungen hin zu sehen und zu hören verstehen, daß wir über weit bedeutendere Kräfte und Geschwindigkeiten verfügen als noch vor einem Menschenalter, das kann auch der ärgste Skeptiker nicht in Abrede stellen, und ebensowenig läßt sich bezweifeln, daß dieser Fortschritt eine bleibende Vermehrung unserer Erkenntnis bedeutet, die nicht etwa in einer späteren Zeit als Irrweg bezeichnet und wieder negiert werden wird.

Zweitens ist es aber höchst bemerkenswert, daß, obwohl der Anstoß zu jeder Verbesserung und Vereinfachung des physikalischen Weltbildes immer durch neuartige Beobachtungen, also durch Vorgänge in der Sinnenwelt, geliefert wird, dennoch das physikalische Weltbild sich in seiner Struktur immer weiter von der Sinnenwelt entfernt, daß es seinen anschaulichen, ursprünglich ganz anthropomorph gefärbten Charakter immer mehr einbüßt, daß die Sinnesempfindungen in steigendem Maße aus ihm ausgeschaltet werden — man denke nur an die physikalische Optik, in der vom menschlichen Auge gar nicht mehr die Rede ist —, daß damit sein Wesen sich immer weiter ins Abstrakte verliert, wobei rein formale mathematische Operationen eine stets bedeutendere

Rolle spielen und Qualitätsunterschiede immer mehr auf Quantitätsunterschiede zurückgeführt werden.

Hält man diese zweite Tatsache mit der vorgenannten ersten, der stetigen Vervollkommnung des physikalischen Weltbildes hinsichtlich seiner Bedeutung für die Sinnenwelt, zusammen, so ergibt sich für diese auffallende und auf den ersten Anblick geradezu paradox anmutende Erscheinung nach meiner Meinung nur die eine vernünftige Deutung, daß die mit der fortschreitenden Vervollkommnung zugleich fortschreitende Abkehr des physikalischen Weltbildes von der Sinnenwelt nichts anderes bedeutet als eine fortschreitende Annäherung an die reale Welt. Von einer logischen Begründung dieser Meinung kann allerdings nicht die Rede sein, da ja nicht einmal die Existenz der realen Welt rein verstandesmäßig abgeleitet werden kann. Aber ebensowenig wird es jemals möglich sein, sie durch logische Gründe zu widerlegen. Die Entscheidung darüber ist vielmehr Sache einer vernünftigen Weltauffassung, und es bleibt bei der alten Wahrheit, daß diejenige Weltauffassung die beste ist, welche die reichsten Früchte trägt. Die Physik würde unter allen Wissenschaften eine Ausnahme bilden, wenn sich nicht auch bei ihr das Gesetz bewährte, daß die weittragendsten, wertvollsten Resultate der Forschung stets nur auf dem Wege nach dem prinzipiell unerreichbaren Ziel einer Erkenntnis der realen Wirklichkeit zu gewinnen sind.

## III.

Wie hat sich nun das physikalische Weltbild in den letzten zwanzig Jahren geändert? Jeder von uns weiß, daß die inzwischen eingetretene Wandlung mit zu den tiefgreifendsten gehört, die jemals in der Entwickelungsgeschichte einer Wissenschaft stattgefunden haben, und daß der Umbildungsprozeß auch gegenwärtig noch nicht vollständig zum Abschluß gekommen ist. Aber immerhin scheinen sich doch schon heute aus dem Flusse der Entwickelung gewisse charakteristische Formen der Struktur des neuen Weltbildes herauskristallisieren zu wollen, und es verlohnt sicherlich der Mühe, den Versuch einer Schilderung derselben zu wagen, sei es auch nur, um zu einer Verbesserung des Versuches anzuregen.



Wenn wir das alte und das neue Weltbild nebeneinander halten, so zeigt sich zunächst wieder ein weiterer bedeutender Schritt in der Richtung der Zurückführung aller Qualitätsunterschiede auf Quantitätsunterschiede. So erscheint namentlich die bunte Mannigfaltigkeit der chemischen Erscheinungen restlos zurückgeführt auf numerische und räumliche Beziehungen. Es gibt nach der heutigen Auffassung überhaupt nur zwei Urstoffe: die positive Elektrizität und die negative Elektrizität. Beide bestehen aus lauter gleichartigen winzigen Partikeln mit entgegengesetzt gleicher Ladung: das positive heißt Proton, das negative Elektron. Ein jedes elektrisch neutrale chemische Atom besteht aus einer gewissen Anzahl von Protonen, die fest miteinander zusammenhängen, und ebensoviel Elektronen, von denen ein Teil an die Protonen fest gebunden ist und mit ihnen zusammen den Kern des Atoms bildet, während die übrigen sich um den Kern herumbewegen.

So besteht das kleinste Atom, der Wasserstoff, aus einem einzigen Proton als Kern und einem Elektron, das sich um den Kern bewegt, und das größte Atom, das Uran, aus 238 Protonen und ebensoviel Elektronen, von denen aber nur 92 sich um den Kern bewegen, während die übrigen im Kern festsitzen. Dazwischen liegen alle übrigen Elemente in allen möglichen Kombinationen. Die chemische Natur eines Elements wird nicht durch die Gesamtzahl seiner Protonen bzw. Elektronen, sondern durch die Zahl seiner beweglichen Elektronen bestimmt, welche als Ordnungszahl des Elements bezeichnet wird.

Abgesehen von diesem bedeutenden Fortschritt, der aber im Grunde nur die erfolgreiche Durchführung eines schon Jahrhunderte alten Gedankens darstellt, fallen in dem heutigen Weltbild zwei gänzlich neue Ideen auf, durch welche es sich von dem früheren unterscheidet: das Relativitätsprinzip und das Quantenprinzip. Diese beiden Ideen sind es im wesentlichen, welche dem neuen Bild sein charakteristisches Gepräge gegenüber dem älteren geben. Daß sie fast gleichzeitig in der Wissenschaft auftauchten, muß man in gewissem Sinn als Zufall betrachten. Denn sowohl nach ihrem Inhalt als auch nach ihrer ganzen praktischen Auswirkung auf die

Struktur des physikalischen Weltbildes verhalten sie sich gänzlich verschieden voneinander.

Die Relativitätstheorie, welche anfänglich in den hergebrachten Vorstellungen von Raum und Zeit eine gewisse Verwirrung anrichten zu wollen schien, hat sich schließlich tatsächlich als eine Vollendung und Krönung des Gebäudes der klassischen Physik erwiesen. — Um den positiven Inhalt der speziellen Relativitätstheorie mit einem Wort zu veranschaulichen, kann man ihn vielleicht bezeichnen als die Verschmelzung von Raum und Zeit zu einem einheitlichen Begriff. Nicht als ob Raum und Zeit ganz gleichartig wären, sondern etwa so, wie eine reelle Zahl sich mit einer imaginären Zahl zu dem einheitlichen Begriff einer komplexen Zahl verbindet. Von diesem Gesichtspunkt aus betrachtet bedeutet Einsteins Werk für die Physik das nämliche, was im vorigen Jahrhundert Gauß für die Mathematik geleistet hat. Und wenn wir den Vergleich noch fortspinnen wollen, so können wir sagen, daß der Übergang der speziellen zur allgemeinen Relativitätstheorie in der Physik etwas Ähnliches bedeutet wie in der Mathematik der Übergang von den linearen Funktionen zur allgemeinen Funktionentheorie.

Wenn dieser Vergleich auch, wie jeder andere, etwas hinkt, so gibt er doch eine zutreffende Vorstellung von der Tatsache, daß die Einführung der Relativitätstheorie in das physikalische Weltbild einen der wichtigsten Schritte zu seiner Vereinheitlichung und Vervollkommnung bedeutet. Das zeigt sich in den Folgerungen, die sie nach sich gezogen hat, vor allem in der Verschmelzung von Impuls und Energie, in der Reduktion des Massenbegriffs auf den Energiebegriff, in der Identifizierung von träger und ponderabler Masse, in der Zurückführung der Gesetze der Gravitation auf die Riemannsche Geometrie.

So kurz diese Stichworte lauten, so unabsehbar reich ist ihr Inhalt. Ihre Bedeutung erstreckt sich auf alle Vorgänge der kleinen und der großen Natur, von den radioaktiven, Wellen und Korpuskeln ausstrahlenden Atomen angefangen, bis zu den Bewegungen der Millionen von Lichtjahren entfernten Himmelskörper.



Über den endgültigen Abschluß der Relativitätstheorie dürfte allerdings heute das letzte Wort noch nicht gesprochen sein. Es könnten hier immerhin noch Überraschungen bevorstehen, wenn man bedenkt, daß das Problem der Verschmelzung der Elektrodynamik mit der Mechanik einstweilen noch der endgültigen Erledigung harrt. Auch die kosmologischen Folgerungen aus der Relativitätstheorie scheinen noch nicht vollkommen geklärt, schon deshalb, weil hier alles abhängt von der noch als offen zu betrachtenden Frage, ob die im Weltenraum befindliche Materie eine endliche räumliche Massendichte besitzt oder nicht. Wie sich aber diese Fragen einmal entscheiden werden, keineswegs wird sich an der Tatsache etwas mehr ändern, daß durch das Relativitätsprinzip die klassische Theorie auf die höchste Stufe ihrer Vollendung gebracht worden ist und ihr physikalisches Weltbild eine auch in formaler Hinsicht überaus befriedigende Abrundung erfahren hat.

Dieser Umstand sowie der Hinweis auf die vorliegenden zahlreichen, allen Bildungsgraden der Leser angepaßten Darstellungen der Relativitätstheorie wird, wie ich hoffe, als hinreichende Begründung dafür angesehen werden, daß ich bei ihrer Betrachtung hier nicht länger verweile.

## IV.

In das bis hierher geschilderte harmonische Weltbild, das seiner Aufgabe in nahezu idealer Weise gerecht zu werden schien, ist nun unversehens mit einem neuen grellen Licht die Quantenhypothese hineingefahren. Wenn wir auch hier wieder versuchen, mit einem Wort den Kernpunkt der für diese Hypothese charakteristischen Idee zu bezeichnen, so können wir ihn finden in dem Auftreten einer neuen universellen Konstanten: des elementaren Wirkungsquantums. Diese Konstante ist es, ein neuer geheimnisvoller Bote aus der realen Welt, welcher sich bei den verschiedenartigsten Messungen immer wieder aufdrängte und immer hartnäckiger einen eigenen Platz beanspruchte, anderseits aber doch so wenig in den Rahmen des bisherigen physikalischen Weltbildes hineinpaßte, daß er schließlich die Sprengung des zu eng befundenen Rahmens herbeigeführt hat.

Es gab eine Zeit, wo sogar ein völliger Zusammenbruch der klassischen Physik nicht außer dem Bereich der Möglichkeit zu liegen schien; doch zeigte sich allmählich, was für jeden, der an einen stetigen Fortschritt der Wissenschaft glaubt, selbstverständlich war, daß es sich auch hier letzten Endes nicht um ein Zerstörungswerk, sondern um eine allerdings recht tiefgehende Umbildung handelte, und zwar um eine Verallgemeinerung. Denn wenn man das Wirkungsquantum als unendlich klein voraussetzt, so geht die Quantenphysik über in die klassische Physik. Aber auch für den allgemeinen Fall erwiesen sich die Grundquadern des Baus der klassischen Physik nicht nur als unerschütterlich, sondern sie gewannen durch die Einverleibung der neu hinzugekommenen Ideen sogar noch an Festigkeit und Ansehen. Es wird sich daher empfehlen, daß wir zunächst diese letzteren ins Auge fassen.

Da sind vor allem zu nennen die eigentlichen Bausteine des Werkes: die universellen Konstanten, wie die Gravitationskonstante, die Lichtgeschwindigkeit, die Masse und die Ladung der Elektronen und Protonen, wohl die greifbarsten Zeichen einer realen Welt, welche ihre Bedeutung unverändert in das neue Weltbild hinübernehmen; ferner die großen Prinzipien der Erhaltung der Energie und des Impulses, die, obwohl eine Zeitlang ernsten Anzweiflungen ausgesetzt, sich dennoch bisher in allen Einzelheiten siegreich behauptet haben, wobei wiederum, wie besonders hervorgehoben zu werden verdient, deutlich offenbar wurde, daß sie keineswegs, wie manche Axiomatiker glauben möchten, bloße Definitionen darstellen. Dann die Hauptsätze der Thermodynamik, insbesondere der zweite Hauptsatz, welcher durch die Einführung eines absoluten Wertes der Entropie sogar noch eine schärfere Fassung als in der klassischen Physik erfahren konnte. Endlich das Prinzip der Relativität, welches auch auf dem neuen Gelände der Quantenphysik sich als ein zuverlässiger und beredter Führer erwiesen hat.

Nun wird man zu der Frage versucht sein: Wenn alle diese Grundlagen der klassischen Physik unangetastet geblieben sind, was hat sich dann überhaupt in der neuen Physik geändert? Die Antwort hierauf können wir sehr einfach finden, wenn wir uns etwas näher ansehen, was das elementare Wir-



kungsquantum bedeutet. Es bedeutet die grundsätzliche Äquivalenz einer Energie und einer Schwingungszahl: $E = h\nu$. Diese Äquivalenz ist es, welcher die klassische Theorie vollkommen verständnislos gegenübersteht. Zunächst schon deshalb, weil eine Energie und eine Schwingungszahl verschiedene Dimensionen besitzen. Denn die Energie ist eine dynamische, die Schwingungszahl aber eine kinematische Größe. Jedoch dieser Umstand ist nicht ausschlaggebend; denn wenn durch das Quantenpostulat die Dynamik mit der Kinematik unmittelbar verknüpft erscheint, indem die Einheit der Energie und mit ihr die der Masse auf die der Länge und die der Zeit zurückgeführt ist, so bildet das an sich keinen Widerspruch, sondern eher eine Ergänzung und Bereicherung des Inhaltes der klassischen Theorie. Aber was direkt widerspruchsvoll und infolgedessen durchaus unverträglich ist mit der klassischen Theorie, das zeigt die folgende Überlegung. Die Schwingungszahl ist eine lokale Größe, sie besitzt einen bestimmten Sinn für einen einzelnen Ort, sei es, daß es sich um eine mechanische oder um eine elektrische oder eine magnetische Schwingung handelt; man braucht nur den Ort hinreichend lange Zeit hindurch zu beobachten. Die Energie aber ist eine additive Größe. Von der Energie an einem bestimmten Ort zu reden, hat nach der klassischen Theorie gar keinen Sinn; man muß vielmehr vorher das physikalische Gebilde angeben, dessen Energie man im Auge hat, ganz ebenso, wie wenn man, um von einer Geschwindigkeit in bestimmtem Sinne reden zu können, das Bezugssystem angeben muß. Und da das physikalische Gebilde von vornherein ganz beliebig wählbar ist, kleiner oder größer, so steckt in dem Werte der Energie stets eine gewisse Willkür. Diese bis zu einem gewissen Grade willkürliche Energie soll nun gleich sein einer lokalen Schwingungszahl! Man erkennt die Kluft, die sich zwischen diesen beiden Begriffen auftut. Und um die Kluft zu überbrücken, ist ein fundamentaler Schritt notwendig, ein Schritt, der tatsächlich einen Bruch bedeutet mit Anschauungen, welche die klassische Physik stets als selbstverständlich betrachtet und benützt hat.

Bisher gehörte es zu den Voraussetzungen jeden kausalen physikalischen Denkens, daß alle Vorgänge in der physikali-

schen Welt — worunter ich, wie immer, das physikalische Weltbild, nicht die reale Welt, verstehe — sich darstellen lassen als zusammengesetzt aus lokalen Vorgängen in verschiedenen einzelnen unendlich kleinen Raumelementen und daß jeder einzelne dieser Elementarvorgänge in seinem gesetzmäßigen Ablauf ohne Rücksicht auf alle übrigen eindeutig bestimmt ist durch die lokalen Vorgänge in der unmittelbaren räumlichen und zeitlichen Nachbarschaft. Exemplifizieren wir auf einen konkreten, hinreichend allgemeinen Fall. Das betrachtete physikalische Gebilde bestehe aus einem System von materiellen Punkten, die sich in einem konservativen Kraftfelde mit konstanter Gesamtenergie bewegen. Dann befindet sich nach der klassischen Physik jeder einzelne Punkt zu jeder Zeit in einem bestimmten Zustand, das heißt, er besitzt eine bestimmte Lage und eine bestimmte Geschwindigkeit, und seine Bewegung ist vollkommen genau zu berechnen aus seinem Anfangszustand und den lokalen Eigenschaften des Kraftfeldes an den Stellen des Raumes, die er im Verlauf seiner Bewegung passiert. Sind diese bekannt, so braucht man von den sonstigen Eigenschaften des betrachteten Punktsystems gar nichts zu wissen.

In der neuen Mechanik ist das ganz anders. Nach ihr genügen rein lokale Beziehungen ebensowenig zu einer Formulierung der Bewegungsgesetze, wie etwa zum Verständnis der Bedeutung eines Gemäldes die mikroskopische Untersuchung aller seiner einzelnen Teile genügt. Vielmehr gelangt man nur dann zu einer brauchbaren Darstellung der Gesetzmäßigkeit, wenn man das physikalische Gebilde als Ganzes betrachtet. Demgemäß befindet sich nach der neuen Mechanik jeder einzelne materielle Punkt des Systems zu jeder Zeit in gewissem Sinne an sämtlichen Stellen des ganzen dem System zur Verfügung stehenden Raumes zugleich, und nicht etwa nur mit dem Kraftfeld, das er um sich verbreitet, nein, mit seiner eigenen Masse und mit seiner eigenen Ladung.

Man sieht: es geht hierbei um nichts weniger als um den Begriff des materiellen Punktes, den elementarsten Begriff der klassischen Mechanik. Die bisherige zentrale Bedeutung dieses Begriffes muß grundsätzlich geopfert werden; nur in besonderen Grenzfällen kann sie bestehen bleiben. Was im



allgemeinen Fall an die Stelle zu setzen ist, können wir aus der weiteren Verfolgung des oben bereits eingeschlagenen Gedankenganges ableiten.

Wenn das Quantenpostulat der Äquivalenz einer Energie und einer Schwingungszahl einen eindeutigen, das heißt vom Bezugssystem unabhängigen Sinn haben soll, so muß nach dem Relativitätsprinzip auch ein Impulsvektor äquivalent sein einem Wellenzahlvektor, das heißt der absolute Betrag des Impulses muß äquivalent sein der reziproken Länge einer Welle, deren Normale mit der Impulsrichtung zusammenfällt. Dabei ist aber die Welle nicht im gewöhnlichen dreidimensionalen Raume zu denken, sondern im sogenannten Konfigurationsraum, dessen Dimension durch die Zahl der Freiheitsgrade des Systems gegeben ist und dessen Maßbestimmung durch die doppelte kinetische Energie oder, was auf dasselbe hinauskommt, durch das Quadrat des gesamten Impulses dargestellt wird. Somit erscheint die Wellenlänge zurückgeführt auf die kinetische Energie, das heißt auf die Differenz der konstanten Gesamtenergie und der potentiellen Energie, die als eine von vornherein gegebene Ortsfunktion zu betrachten ist.

Schwingungszahl und Wellenlänge ergeben miteinander multipliziert die Fortpflanzungsgeschwindigkeit oder Phasengeschwindigkeit einer gewissen Welle im Konfigurationsraum, der sogenannten Materiewelle, und die Substitution der betreffenden Werte in die aus der klassischen Mechanik bekannte Wellengleichung führt zu der von Schrödinger aufgestellten linearen homogenen partiellen Differentialgleichung, welche das anschauliche Fundament der heutigen Quantenmechanik geliefert hat und in derselben die nämliche Rolle zu spielen scheint wie in der klassischen Mechanik die Newtonschen oder Lagrangeschen oder Hamiltonschen Gleichungen. Was sie von diesen scharf unterscheidet, ist vor allem der Umstand, daß in ihnen die Koordinaten des Konfigurationspunktes nicht Funktionen der Zeit sind, sondern unabhängige Variable. Dementsprechend gibt es für ein bestimmtes System gegenüber der mehr oder weniger großen, den Freiheitsgraden des Systems entsprechenden Anzahl der klassischen Bewegungsgleichungen nur eine einzige Quanten-

gleichung. Während der Konfigurationspunkt der klassischen Theorie im Laufe der Zeit eine ganz bestimmte Kurve beschreibt, erfüllt der Konfigurationspunkt der Materiewelle zu jeder Zeit den ganzen unendlichen Raum, sogar solche Stellen des Raumes, in denen die potentielle Energie größer ist als die Gesamtenergie, so daß nach der klassischen Theorie die kinetische Energie dortselbst negativ und der Impuls imaginär werden würde. Es ist ganz ähnlich wie im Falle der sogenannten totalen Reflexion des Lichtes, bei welcher nur nach der Strahlenoptik das Licht wirklich vollkommen reflektiert wird, weil der Brechungswinkel imaginär wird, während nach der Wellenoptik sehr wohl Licht auch in das zweite Medium eindringt, wenn auch nicht als ebene Welle.

Immerhin besitzt der Fall, daß es Stellen im Konfigurationsraum gibt, wo die potentielle Energie die Gesamtenergie übersteigt, auch für die Quantenmechanik eine einschneidende Bedeutung. Denn in jedem solchen Falle entspricht, wie die Rechnung zeigt, nicht jedem beliebig gegebenen Wert der Energiekonstanten eine endliche Welle, sondern nur gewissen ganz bestimmten Werten, den sogenannten Eigenwerten der Energie, die aus der Wellengleichung zu berechnen sind und je nach der Beschaffenheit der gegebenen potentiellen Energie verschieden ausfallen.

Aus den diskreten Eigenwerten der Energie ergeben sich nach dem Quantenpostulat bestimmte diskrete Eigenwerte der Schwingungsperiode, ebenso wie bei einer gespannten an den Enden festgeklemmten Saite, nur daß bei der letzteren die Quantisierung durch einen äußerlichen Umstand, nämlich durch die Länge der Saite, hier dagegen durch das in der Differentialgleichung selber enthaltene Wirkungsquantum bedingt wird.

Jeder Eigenschwingung entspricht eine besondere Wellenfunktion $\psi$ als Lösung der Wellengleichung, und alle diese verschiedenen Eigenfunktionen bilden die Elemente zur Beschreibung irgendeines Bewegungsvorganges nach der Wellenmechanik.

Das Resultat ist dieses: Während die klassische Physik eine räumliche Zerlegung des betrachteten physikalischen Gebildes in seine kleinsten Teile vornimmt und dadurch die



Bewegungen beliebiger materieller Körper auf die Bewegungen ihrer einzelnen als unveränderlich vorausgesetzten materiellen Punkte, das heißt auf Korpuskularmechanik zurückführt, zerlegt die Quantenphysik jeden Bewegungsvorgang in die einzelnen periodischen Materiewellen, die den Eigenschwingungen und Eigenfunktionen des betreffenden Gebildes entsprechen, und führt dadurch zur Wellenmechanik. Daher ist nach der klassischen Mechanik die einfachste Bewegung diejenige eines einzelnen materiellen Punktes, nach der Quantenmechanik diejenige einer einfach periodischen Welle, und wie nach der ersteren die allgemeinste Bewegung eines Körpers als die Gesamtheit der Bewegungen seiner einzelnen Punkte aufgefaßt wird, so besteht dieselbe nach der letzteren in dem Zusammenwirken aller möglichen Arten von periodischen Materiewellen. Diese Verschiedenartigkeit der Betrachtungsweisen läßt sich beispielsweise veranschaulichen an den Schwingungen einer gespannten Saite. Einerseits kann man nämlich als Elemente des Vorgangs die Bewegungen der einzelnen Punkte der Saite betrachten. Jedes materielle Teilchen der Saite bewegt sich, unabhängig von allen übrigen, nach Maßgabe der auf dasselbe wirkenden, durch die lokale Krümmung der Saite bedingten Kraft. Man kann aber auch andererseits als Elemente des Bewegungsvorganges die Grundschwingung und die Oberschwingungen der Saite betrachten, deren jede sich auf die ganze Saite bezieht und deren Zusammenwirken ebenfalls die allgemeinste Art der Saitenbewegung darstellt.

Aus der Wellenmechanik ergibt sich auch unmittelbar das Verständnis für einen bis dahin rätselhaft erscheinenden Umstand. Nach der ungemein fruchtbaren Theorie von Niels Bohr bewegen sich die Elektronen eines Atoms um den Kern nach ganz ähnlichen Gesetzen wie die Planeten um die Sonne. Dabei tritt an die Stelle der Gravitationskraft die Anziehung der entgegengesetzten Ladungen des Kerns und der Elektronen. Ein sonderbarer Unterschied aber besteht darin, daß die Elektronen immer nur auf ganz bestimmten, diskret voneinander verschiedenen Bahnen kreisen können, während bei den Planeten keine einzelne Bahn von einer anderen von vornherein bevorzugt erscheint.

Dieser zunächst unbegreifliche Umstand findet nach der

Wellentheorie der Elektronen eine sehr anschauliche Erklärung. Wenn nämlich eine Elektronenbahn in sich zurückläuft, so ist klar, daß sie immer gerade eine ganze Anzahl von Wellenlängen umfassen muß, ebenso wie die Länge einer zu einem vollständigen Ring geschlossenen Kette, die aus lauter gleich langen Gliedern besteht, immer nur einer ganzen Anzahl von Gliederlängen gleich sein kann. Danach gleicht der Kreislauf eines Elektrons um den Atomkern weniger der Bewegung eines Planeten um die Sonne, als vielmehr der Drehung eines allseitig symmetrischen Ringes in sich selbst, so daß der Ring als Ganzes stets die nämliche Lage im Raum einnimmt und es gar keinen physikalischen Sinn hat, von dem augenblicklichen Ort des Elektrons zu reden.

Wenn wir uns nun der Frage nach der wellenmechanischen Beschreibung der Bewegung eines einzelnen bestimmten materiellen Punktes zuwenden, so zeigt sich sogleich, daß eine solche Beschreibung in exaktem Sinne überhaupt nicht möglich ist. Denn schon um die Lage des materiellen Punktes oder, allgemeiner gesprochen, um die Lage eines bestimmten Punktes im Konfigurationsraum zu definieren, gibt es in der Wellenmechanik nur das eine Mittel, eine Schar von Eigenwellen des Gebildes so zu superponieren, daß ihre Wellenfunktionen sich überall im Konfigurationsraum durch Interferenz gegenseitig auslöschen und nur in dem betreffenden Punkt verstärken. Dann wäre nämlich die Wahrscheinlichkeit aller übrigen Konfigurationspunkte gleich Null, und nur für den ausgezeichneten Punkt wäre sie gleich Eins. Um diesen einen Punkt ganz scharf herauszuheben, würden aber unendlich kleine Wellenlängen, also unendlich große Impulse notwendig sein. Man muß also, um wenigstens ein annähernd brauchbares Resultat erzielen zu können, statt eines scharfen Konfigurationspunktes ein endliches, wenn auch kleines Gebiet des Konfigurationsraumes, ein sogenanntes Wellenpaket, zugrunde legen, womit schon ausgedrückt ist, daß die Bestimmung der Lage eines Konfigurationspunktes nach der Wellentheorie immer mit einer gewissen Unsicherheit verbunden ist.

Wenn man aber nun weiter dem betrachteten materiellen Punktsystem außer einer bestimmten Konfiguration auch



noch eine bestimmte Größe des Impulses zuschreiben will, so darf man nach dem Quantenpostulat strenggenommen nur eine einzige Welle von ganz bestimmter Wellenlänge zur Darstellung verwenden, und die Beschreibung ist wiederum unmöglich. Falls aber auch in der Größe des Impulses eine gewisse kleine Unbestimmtheit gelassen wird, so ist das gewünschte Ziel unter Umständen durch Benützung von Wellen innerhalb eines engen Frequenzbereichs wenigstens mit gewisser Annäherung zu erreichen.

Also sowohl die Lage als auch der Impuls eines materiellen Punktsystems läßt sich nach der Wellenmechanik stets nur mit einer gewissen Unsicherheit definieren, und zwar besteht zwischen diesen beiden Arten von Unsicherheit eine bestimmte Beziehung, die sich aus der einfachen Überlegung ergibt, daß die benützten Wellen, wenn sie sich außerhalb des kleinen Konfigurationsgebietes durch Interferenz gegenseitig auslöschen sollen, an den entgegengesetzten Rändern des Gebietes trotz ihrer kleinen Frequenzunterschiede doch schon merkliche Gangunterschiede aufweisen müssen. Ersetzt man den Gangunterschied nach dem Quantenpostulat durch den Impulsunterschied, so folgt der von Heisenberg formulierte Satz, daß das Produkt der Unsicherheit der Lage und der Unsicherheit des Impulses mindestens von der Größenordnung des Wirkungsquantums ist. Je schärfer die Lage des Konfigurationspunktes bestimmt ist, um so unschärfer ist der Betrag des Impulses, und umgekehrt. Die beiden Arten von Unsicherheit zeigen also in gewissem Sinne ein komplementäres Verhalten, dem aber dadurch eine Schranke gesetzt ist, daß ein Impuls sich nach der Wellenmechanik unter Umständen absolut scharf bestimmen läßt, während die Lage eines Konfigurationspunktes stets innerhalb eines endlichen Gebietes unsicher bleibt.

Diese Heisenbergsche Unsicherheitsrelation ist nun etwas für die klassische Mechanik ganz Unerhörtes. Zwar daß einer jeden Messung eine Unsicherheit anhaftet, ist von jeher bekannt; aber man hatte stets angenommen, daß durch gehörige Verfeinerung der Messungsmethoden die Genauigkeit unbeschränkt erhöht werden kann. Nun soll der Messungsgenauigkeit eine prinzipielle Schranke gesetzt sein, und das

Merkwürdigste daran ist, daß diese Schranke sich nicht auf die einzelnen Größen: Lage oder Geschwindigkeit, bezieht, sondern auf ihre Kombination. Jede Größe für sich kann, prinzipiell genommen, beliebig genau gemessen werden, aber stets nur auf Kosten der Genauigkeit der anderen.

So seltsam diese Behauptung klingt, so deutlich wird sie durch verschiedene Tatsachen bestätigt. Dafür nur ein Beispiel. Die direkteste und feinste Messung der Lage eines Massenpunktes geschieht auf optischem Wege, entweder durch direktes Anvisieren mit bloßem oder bewaffnetem Auge oder durch eine photographische Aufnahme. Dazu muß man den Punkt beleuchten. Dann wird die Abbildung um so schärfer, also die Messung um so genauer ausfallen, je kürzere Lichtwellen verwendet werden. Insofern kann man die Genauigkeit beliebig weit steigern. Aber sie hat ihre Kehrseite: die Geschwindigkeitsmessung. Bei größeren Massen darf man die Einwirkung des Lichtes auf das beleuchtete Objekt vernachlässigen. Anders ist es aber, wenn man als Objekt eine sehr kleine Masse, zum Beispiel ein einzelnes Elektron, wählt. Denn jeder Lichtstrahl, der das Elektron trifft und von demselben zurückgeworfen wird, erteilt ihm einen merklichen Stoß, und zwar um so kräftiger, je kürzer die Lichtwelle ist. Daher wächst mit der Kürze der Lichtwelle zwar die Schärfe der Ortsbestimmung, aber auch in entsprechendem Verhältnis die Unschärfe der Geschwindigkeitsbestimmung. Und ebenso ist es in ähnlichen Fällen.

Im Lichte dieser Anschauung bildet die klassische Mechanik, die von unveränderlichen, scharf meßbaren, mit bestimmter Geschwindigkeit bewegten Korpuskeln ausgeht, nur einen idealen Grenzfall. Derselbe ist verwirklicht, wenn das betrachtete Gebilde eine verhältnismäßig große Energie besitzt. Dann werden nämlich die diskreten Eigenwerte der Energie nahe beieinander liegen, ein verhältnismäßig schmales Energiebereich wird schon zahlreiche hohe Wellenfrequenzen bzw. kurze Wellenlängen enthalten, und durch deren Superposition wird sich im Konfigurationsraum ein kleines Wellenpaket mit einem bestimmten Impuls verhältnismäßig scharf abgrenzen lassen. Dann geht die Wellenmechanik über in die Korpuskularmechanik, die Schrödingersche Differentialgleichung



wird zur klassischen Hamilton-Jacobischen Differentialgleichung, und das Wellenpaket pflanzt sich im Konfigurationsraum nach den nämlichen Gesetzen fort, welche die Bewegung eines Systems materieller Punkte nach der klassischen Mechanik regeln. Das dauert aber im allgemeinen nur eine gewisse Zeitlang. Denn da die einzelnen Materiewellen nicht immer in der nämlichen Weise interferieren, so wird das Wellenpaket mehr oder weniger schnell auseinanderfließen, die Lage des entsprechenden Konfigurationspunktes wird immer unschärfer, und schließlich bleibt als genau definierte Größe nur die Wellenfunktion $\psi$ übrig.

Stimmen nun alle diese Folgerungen auch mit der Erfahrung überein? Eine Prüfung dieser Frage kann wegen der Kleinheit des Wirkungsquantums nur im Rahmen der Atomphysik vorgenommen werden und erfordert daher stets äußerst feine Hilfsmittel. Vorläufig läßt sich nur sagen, daß bis jetzt noch keine Tatsache bekanntgeworden ist, die zu einem grundsätzlichen Zweifel an der physikalischen Bedeutung aller dieser Folgerungen Anlaß geben würde.

So hat denn auch seit der Aufstellung der Wellengleichung eine geradezu stürmische Entwickelung und Weiterbildung der Theorie eingesetzt. Es ist unmöglich, im Rahmen dieses Vortrags aller Erweiterungen und Anwendungen zu gedenken, die sie in den letzten Jahren erfahren hat. Von den ersteren will ich hier nur nennen die Einführung des sogenannten Dralls der Protonen und der Elektronen, ferner die relativistische Formulierung der Quantenmechanik, von den letzteren die Anwendung auf die Molekülprobleme und die Behandlung des sogenannten Mehrkörperproblems, das heißt die Anwendung auf ein Gebilde mit mehreren oder vielen ganz gleichartigen Massenpunkten, wobei besonders Fragen statistischer Art auftreten, die sich auf die Zahl der in einem abgeschlossenen Gebilde von gegebener Energie möglichen verschiedenen Zustände beziehen und die auch für die Berechnung der Entropie des Gebildes von Bedeutung sind.

Endlich muß ich es mir auch versagen, hier speziell auf die Physik der Lichtquanten einzugehen, welche in gewissem Sinne die gerade entgegengesetzte Entwicklung erfahren hat wie die Physik der Massenpunkte. Denn auf diesem Gebiete

herrschte ursprünglich, in der klassischen Physik, die Maxwellsche Theorie der elektromagnetischen Wellen, und erst später stellte sich heraus, daß die Annahme von diskreten Lichtpartikeln nicht zu entbehren ist, daß man also die elektromagnetischen Wellen, ebenso wie die Materiewellen, als Wahrscheinlichkeitswellen zu deuten hat.

Es gibt wohl keinen eindrucksvolleren Beweis für die Tatsache, daß eine reine Wellentheorie ebensowenig die Forderungen der neuen Physik zu befriedigen vermag wie eine reine Korpuskulartheorie. Beide Theorien stellen vielmehr extreme Grenzfälle dar. Während die in der klassischen Mechanik maßgebende Korpuskulartheorie zwar der Konfiguration des Gebildes gerecht wird, aber bei der Bestimmung der Eigenwerte seiner Energie und seines Impulses versagt, vermag umgekehrt die für die klassische Elektrodynamik charakteristische Wellentheorie zwar Energie und Impuls darzustellen, steht aber dem Begriff einer Lokalisation der Lichtpartikeln fremd gegenüber. Den allgemeinen Fall stellt das Zwischengebiet dar, in welchem beiden Theorien eine praktisch gleichwertige Rolle zukommt, und dem man sich entweder von der einen oder von der anderen Seite her, vorläufig immer nur um ein kleines Stück, nähern kann. Hier harren noch manche dunkle Fragen der Aufklärung, und es bleibt abzuwarten, welche der verschiedenen zu ihrer Lösung eingeschlagenen Methoden: die ursprünglich von Heisenberg, Born und Jordan ersonnene Matrizenrechnung, oder die von de Broglie und Schrödinger aufgestellte Wellentheorie, oder die von Dirac eingeführte Mathematik der $q$-Zahlen, am besten zum Ziele führen wird.

## V.

Wenn wir versuchen, aus den vorstehenden Schilderungen ein zusammenfassendes Resultat und damit einen Überblick über die charakteristischen Merkmale des neuen Weltbildes zu gewinnen, so wird unser erster Eindruck sicherlich noch ein recht unbefriedigender sein. Vor allem muß es befremden, daß man in der Wellenmechanik, welche sich doch in einen ausgesprochenen Gegensatz zur klassischen Mechanik stellt, von vorneherein Begriffe benützt, die aus der klassischen



Korpuskulartheorie ohne weiteres übernommen sind, so den Begriff der Koordinaten und der Impulse eines materiellen Punktes, sowie den der kinetischen und der potentiellen Energie eines Punktsystems; während es sich hinterher herausstellt, daß es gar nicht möglich ist, Lage und Impuls eines Punktes gleichzeitig genau zu bestimmen. Und doch sind diese Begriffe für die Wellenmechanik durchaus notwendig; denn ohne sie ließe sich der Konfigurationsraum und seine Maßbestimmung überhaupt nicht definieren.

Eine andere Schwierigkeit für das Verständnis der Wellentheorie scheint darin zu liegen, daß die Materiewellen sicherlich nicht dieselbe Art von Anschaulichkeit besitzen wie etwa die akustischen oder die elektromagnetischen Wellen, weil sie ja nicht im gewöhnlichen Raum, sondern im Konfigurationsraum verlaufen und weil ihre Schwingungsperiode abhängig ist von der Wahl des physikalischen Gebildes, zu dem sie gehören. Je ausgedehnter das Gebilde angenommen wird, um so größer wird seine Energie und mit ihr die Schwingungsfrequenz ausfallen.

Derartige Bedenken sind gewiß nicht leicht zu nehmen. Indessen sie werden sich doch beschwichtigen lassen, wenn nur der Inhalt der neuen Theorie erstens keine inneren Widersprüche aufweist und zweitens in seinen Anwendungen eindeutige und für Messungen bedeutungsvolle Resultate ergibt. Aber selbst darüber, ob und wieweit diese Forderung bei der Quantenmechanik erfüllt wird, gehen die Meinungen gegenwärtig noch einigermaßen auseinander. Daher sei es mir gestattet, auf diesen fundamentalen Punkt noch etwas näher einzugehen.

Es ist häufig mit besonderer Betonung darauf hingewiesen worden, daß die Quantenmechanik es nur mit prinzipiell beobachtbaren Größen und nur mit physikalisch sinnvollen Fragen zu tun hat. Das ist gewiß zutreffend, es darf aber nicht speziell der Quantentheorie von vorneherein als ein besonderer Vorzug gegenüber anderen Theorien angerechnet werden. Denn die Entscheidung darüber, ob eine physikalische Größe prinzipiell beobachtbar ist oder ob eine gewisse Frage einen physikalischen Sinn hat, läßt sich niemals a priori, sondern immer erst vom Standpunkt einer bestimm-

ten Theorie aus treffen. Der Unterschied der verschiedenen Theorien liegt eben darin, daß nach der einen Theorie eine gewisse Größe prinzipiell beobachtbar, eine gewisse Frage physikalisch sinnvoll ist, nach der andern nicht. So ist die absolute Geschwindigkeit der Erde nach der Fresnel-Lorentzschen Theorie des ruhenden Lichtäthers prinzipiell beobachtbar, nach der Relativitätstheorie nicht, oder die absolute Beschleunigung eines Körpers ist nach der Newtonschen Mechanik prinzipiell beobachtbar, nach der relativistischen Mechanik nicht. Ebenso war das Problem der Konstruktion eines Perpetuum mobile vor der Einführung des Prinzips der Erhaltung der Energie physikalisch sinnvoll, nachher aber nicht mehr. Die Entscheidung zwischen diesen Gegensätzen liegt nicht bei der Natur der Theorien an sich, sondern bei der Erfahrung. Daher genügt es zur Charakterisierung der Überlegenheit der Quantenmechanik gegenüber der klassischen Mechanik nicht, zu sagen, daß sie nur von prinzipiell beobachtbaren Größen handelt — das tut die klassische Mechanik in ihrem Sinne auch —, sondern man muß die speziellen Größen bezeichnen, die nach ihr prinzipiell beobachtbar beziehungsweise nicht beobachtbar sind, und dann den Nachweis führen, daß die Erfahrung damit übereinstimmt.

Dieser Nachweis ist nun in der Tat, zum Beispiel bezüglich der oben besprochenen Heisenbergschen Unsicherheitsrelation, geführt worden, soweit das bis jetzt möglich scheint, und kann als Begründung für den Vorrang der Wellenmechanik angesehen werden.

Trotz dieser augenscheinlichen Erfolge hat die für die Quantenphysik charakteristische Unsicherheitsrelation dennoch in weiteren Kreisen Bedenken erregt, offenbar weil durch sie die Definition von Größen, mit denen man fortwährend rechnet, in gewissem Sinne als prinzipiell ungenau hingestellt wird. Und das Unbehagen wird noch erheblich dadurch gesteigert, daß, wie wir oben sahen, in die Interpretation der quantenmechanischen Gleichungen der Wahrscheinlichkeitsbegriff eingeführt worden ist. Denn hiermit scheint die Forderung der strengen Kausalität aufgegeben zu werden zugunsten eines gewissen Indeterminismus. Es gibt in der



Tat gegenwärtig hervorragende Physiker, welche geneigt sind, im Hinblick auf den Zwang der Verhältnisse das Prinzip der strengen Kausalität im physikalischen Weltbild zu opfern.

Wenn ein solcher Schritt sich wirklich als notwendig erweisen sollte, so wäre damit das Ziel der physikalischen Forschung um ein Erhebliches zurückgesteckt und damit ein Nachteil in Kauf genommen, dessen Bedeutung nicht schwer genug eingeschätzt werden kann. Denn der Determinismus ist, falls man überhaupt die Wahl hat, nach meiner Meinung unter allen Umständen dem Indeterminismus vorzuziehen, einfach aus dem Grunde, weil eine bestimmte Antwort auf eine Frage immer wertvoller ist als eine unbestimmte.

Soweit ich sehe, liegt aber einstweilen gar keine Veranlassung vor, diesen Akt der Resignation zu vollziehen. Denn es bleibt stets die Möglichkeit offen, die Ursache für die Unmöglichkeit, eine bestimmte Antwort zu geben, nicht in der Beschaffenheit der Theorie, sondern in der Beschaffenheit der gestellten Frage zu sehen. Auf eine physikalisch unzureichend formulierte Frage kann auch die vollkommenste physikalische Theorie keine bestimmte Antwort erteilen. Das ist eine schon im Rahmen der klassischen Statistik allbekannte und vielfach erörterte Wahrheit. Wenn zum Beispiel bei zwei sich in einer Ebene stoßenden elastischen Kugeln sowohl die Geschwindigkeiten der Kugeln vor dem Stoß als auch die Gesetze des Stoßes bis in alle Einzelheiten bekannt sind, so vermag man dennoch nicht, die Geschwindigkeiten nach dem Stoß anzugeben. In der Tat stehen für die Berechnung der 4 unbekannten Geschwindigkeitskomponenten der beiden Kugeln nach dem Stoß nur die 3 Gleichungen der Erhaltung der Energie und der beiden Impulskomponenten zur Verfügung. Aber wir sagen nicht, daß bei dem Stoßvorgang keine Kausalität besteht, sondern wir sagen, daß zur vollständigen Determinierung noch wesentliche Daten fehlen.

Um nun diese Überlegung auch auf die vorliegenden Probleme der Quantenphysik anwenden zu können, müssen wir uns jetzt zum Schlusse wieder den in der Einleitung behandelten Gedankengängen zuwenden.

Wenn es wirklich wahr ist, daß die Struktur des physikalischen Weltbildes in ihren fortwährenden Wandlungen immer weiter von der Sinnenwelt abrückt und sich in entsprechendem Maße der realen prinzipiell unerkennbaren Welt immer mehr annähert, so ist selbstverständlich, daß das Weltbild in fortschreitendem Maße von allen anthropomorphen Elementen gesäubert werden muß. Es ist also gänzlich ausgeschlossen, in das physikalische Weltbild Begriffe aufzunehmen, die irgendwie mit der Kunst menschlicher Meßtechnik zusammenhängen. Das geschieht aber auch bei der Heisenbergschen Unsicherheitsrelation in keiner Weise. Denn diese entspringt ohne weiteres der Überlegung, daß die Elemente des neuen Weltbildes nicht die materiellen Korpuskeln, sondern die einfach periodischen, dem betrachteten physikalischen Gebilde entsprechenden Materiewellen sind, zufolge des mathematischen Satzes, daß es nicht möglich ist, durch Superposition einfach periodischer Wellen von endlicher Länge einen bestimmten Punkt mit einem bestimmten Impuls zu definieren. Mit Messungen hat dieser Satz gar nichts zu tun. Und die Materiewellen ihrerseits sind durch das dem behandelten Falle entsprechende mathematische Randwertproblem eindeutig bestimmt. Von Indeterminismus ist dabei keine Rede.

Eine andere Frage aber ist die nach den Beziehungen der Materiewellen zur Sinnenwelt, die uns ja erst die Bekanntschaft mit den physikalischen Vorgängen vermittelt. Denn von einem nach außen vollkommen abgeschlossenen Gebilde würden wir überhaupt nie etwas erfahren können.

Diese Frage scheint auf den ersten Blick gar nicht vollständig in das Gebiet der Physik zu gehören, da sie zum Teil in die Physiologie und sogar in die Psychologie hinübergreift. Indessen erwächst aus diesen Bedenken keine prinzipielle Schwierigkeit. Denn man kann die menschlichen Sinnesorgane stets ersetzt denken durch passend konstruierte physikalische Meßgeräte, selbstregistrierende Apparate, wie zum Beispiel eine lichtempfindliche Platte, welche die aus der Umgebung stammenden Eindrücke festhalten und dadurch Kunde von den Vorgängen in der Umgebung liefern. Wenn wir solche Meßgeräte mit in das zu betrachtende physikalische



Gebilde einbeziehen unter Fernhaltung aller sonstigen Einflüsse, so haben wir ein nach außen abgeschlossenes physikalisches Gebilde, von dem wir durch Messungen etwas erfahren können, allerdings nur bei Mitberücksichtigung der Struktur der Meßgeräte und der Rückwirkungen, welche sie ihrerseits möglicherweise auf die zu messenden Vorgänge ausüben.

Wenn wir nun ein Meßgerät besäßen, das auf eine einfach periodische Materiewelle ebenso reagiert wie etwa ein akustischer Resonator auf eine Schallwelle, dann könnten wir die Materiewellen einzeln messen und dadurch den ganzen Wellenvorgang analysieren. Das ist nun freilich nicht der Fall, vielmehr gestatten die Angaben der Meßgeräte, zum Beispiel die Schwärzung einer photographischen Platte, keinen eindeutigen Schluß auf alle Einzelheiten des zu untersuchenden Vorganges. Aber deshalb dürfen wir doch nicht behaupten, daß die Gesetze der Materiewellen indeterminiert seien.

Eine direktere Begründung für die Annahme eines Indeterminismus könnte gesucht werden in dem Umstand, daß nach der Wellenmechanik die Vorgänge in einem nach außen abgeschlossenen System materieller Punkte keineswegs determiniert sind durch den Anfangszustand des Systems, das heißt durch die Anfangskonfiguration und den Anfangsimpuls, ja nicht einmal annähernd determiniert; denn das Wellenpaket, welches dem Anfangszustand entspricht, wird im allgemeinen mit der Zeit auseinanderfließen und sich in einzelne Wahrscheinlichkeitswellen auflösen.

Aber eine nähere Betrachtung lehrt, daß hier der Indeterminismus nur durch die Art der Fragestellung herbeigeführt wird. Diese ist der Korpuskularmechanik entnommen, in welcher tatsächlich der Anfangszustand den Vorgang für alle Zeiten eindeutig festlegt; sie paßt aber nicht in die Wellenmechanik, schon deshalb, weil ihr wegen der Unsicherheitsrelation eine prinzipielle Ungenauigkeit von endlichem Betrage anhaftet.

Dagegen ist auch in der klassischen Mechanik schon seit Leibniz eine andere Fragestellung bekannt, welche dort ebenfalls zu einer bestimmten Antwort führt. Ein Vorgang ist nämlich auch dann vollkommen determiniert, und zwar

für alle Zeiten, wenn außer der Konfiguration in einem bestimmten Zeitpunkt nicht der Impuls, sondern die Konfiguration des nämlichen Systems in einem anderen Zeitpunkt gegeben ist. Zur Berechnung des Vorganges dient dann ein Variationsprinzip, das Prinzip der kleinsten Wirkung. So sind in dem früher angeführten Beispiel des ebenen elastischen Stoßes zweier Kugeln bei gegebener Anfangslage und Endlage der Kugeln und gegebener Zwischenzeit die 3 Unbekannten, nämlich die beiden Ortskoordinaten und der Zeitpunkt des Zusammenstoßes, durch die 3 Erhaltungsgleichungen vollkommen bestimmt.

Diese veränderte Formulierung des Problems ist, im Gegensatz zu der vorigen, unmittelbar auch auf die Wellenmechanik übertragbar. Freilich läßt sich, wie wir sahen, auch eine bestimmte Konfiguration durch die Wellentheorie niemals vollkommen genau definieren, aber man kann die Unsicherheit doch prinzipiell unter jede gewünschte Grenze herabdrücken und dadurch den Vorgang bis zu jedem beliebigen Genauigkeitsgrade determinieren. Und was das Auseinanderfließen der Wellenpakete betrifft, so ist dasselbe keineswegs ein Beweis für einen Indeterminismus. Denn ein Wellenpaket kann ebensogut auch zusammenfließen. Das Vorzeichen der Zeit spielt ja in der Wellentheorie ebensowenig eine Rolle wie in der Korpuskulartheorie. Jeder Bewegungsvorgang kann auch in genau umgekehrter Richtung verlaufen.

Natürlich existiert bei der angegebenen Formulierung des Problems ein bestimmtes Wellenpaket im allgemeinen nur in den beiden herausgegriffenen Zeitpunkten. In der Zwischenzeit, wie auch in früheren oder späteren Zeiten, werden die einzelnen Elementarwellen sich gesondert verhalten. Aber mag man sie nun als Materiewellen oder als Wahrscheinlichkeitswellen bezeichnen, sie werden in jedem Fall vollständig determiniert sein. Auf diese Weise erklärt sich auch die scheinbar paradoxe Behauptung, daß, wenn ein physikalisches Gebilde durch einen ganz bestimmten Vorgang aus einer bestimmten Konfiguration während einer bestimmten Zeit in eine bestimmte andere Konfiguration übergeht, die Frage nach der Konfiguration in der Zwischenzeit im allgemeinen



gar keinen physikalischen Sinn hat; ebenso wie es nach dieser Auffassung auch keinen Sinn hat, nach der Bahn eines Lichtquants zu fragen, welches von einer punktförmigen Lichtquelle emittiert und an einer bestimmten Stelle eines Beobachtungsschirms absorbiert worden ist.

Allerdings muß hervorgehoben werden, daß bei dieser Art der Betrachtung der Sinn des Determinismus ein etwas anderer ist als der früher in der klassischen Physik übliche. Denn dort war die Konfiguration determiniert, hier in der Quantenphysik aber sind es die Materiewellen, welche determiniert sind. Der Unterschied ist deshalb von Bedeutung, weil die Konfiguration mit der Sinnenwelt viel unmittelbarer zusammenhängt als die Materiewellen. Insofern erscheinen in der neuen Physik die Beziehungen des physikalischen Weltbildes zur Sinnenwelt um ein erhebliches gelockert.

Das ist gewiß ein Nachteil; aber er wird in Kauf genommen werden müssen, um den Determinismus des Weltbildes zu wahren. Überdies scheint dieser Schritt ganz in der Richtung des schon wiederholt als charakteristisch hervorgehobenen Zuges in der tatsächlichen Entwicklung der Wissenschaft zu liegen, daß die Struktur des physikalischen Weltbildes sich bei seiner fortschreitenden Vervollkommnung in zunehmendem Maße von der Sinnenwelt entfernt und immer abstraktere Formen annimmt. Ja vom Standpunkt des Relativitätsprinzips scheint eine solche Auffassung sogar direkt geboten; denn da nach diesem Prinzip die Zeit keine Vorzugsstellung vor dem Raum besitzt, so folgt mit Notwendigkeit, daß, wenn zur kausalen Beschreibung eines physikalischen Vorganges die Betrachtung eines endlichen Raumgebiets erforderlich ist, ebensowohl auch ein endliches Zeitintervall dazu herangezogen werden muß.

Aber vielleicht ist auch die hier vorgeschlagene Fragestellung noch zu einseitig, zu anthropomorph gefärbt, um zu einem befriedigenden Aufbau des neuen physikalischen Weltbildes verwendet werden zu können, und man muß nach einer anderen suchen. In jedem Falle werden hier noch manche verwickelte Probleme zu lösen, manche dunkle Punkte aufzuklären sein. —

Angesichts dieser eigentümlich schwierigen Lage, in welche

gegenwärtig die theoretisch-physikalische Forschung geraten ist, läßt sich gewiß ein Gefühl des Zweifels nicht ohne weiteres abweisen, ob die Theorie mit ihren radikalen eingeführten Neuerungen sich wirklich auf dem richtigen Wege befindet. Die Entscheidung dieser verhängnisvollen Frage hängt einzig und allein davon ab, ob bei der unablässig fortschreitenden Weiterarbeit am physikalischen Weltbild der notwendige Kontakt desselben mit der Sinnenwelt hinlänglich gewahrt bleibt. Ohne diesen Kontakt wäre auch das formvollendetste Weltbild nichts als eine Seifenblase, die beim ersten Windstoß zerplatzen kann.

Glücklicherweise können wir wenigstens heute in dieser Beziehung völlig beruhigt sein. Ja wir dürfen ohne Übertreibung behaupten, daß in der Geschichte der Physik zu keiner Zeit die Theorie so eng mit der Erfahrung Hand in Hand ging wie in der Gegenwart. Die experimentellen Tatsachen sind es ja gerade, welche die klassische Theorie wankend gemacht und zu Falle gebracht haben. Jede neue Idee, jeder neue Schritt ist der vorwärts tastenden Forschung durch Messungsergebnisse nahegelegt oder sogar aufgezwungen worden. Wie an der Schwelle der Relativitätstheorie der optische Interferenzversuch von Michelson, so standen an der Schwelle der Quantentheorie die Messungen von Lummer und Pringsheim, von Rubens und Kurlbaum über die spektrale Energieverteilung, die von Lenard über die photoelektrische Wirkung, die von Franck und Hertz über den Elektronenstoß. Es würde zu weit führen, wenn ich hier aller der zahlreichen, teilweise völlig überraschenden Versuchsergebnisse gedenken würde, welche die Theorie immer weiter vom klassischen Standpunkt fortgedrängt und in ganz bestimmte Bahnen gewiesen haben.

Wir können nur wünschen und hoffen, daß in diesem einhelligen Zusammenarbeiten, an dem sich alle Länder der Erde in friedlichem Wetteifer beteiligen, niemals ein Wandel eintritt. Denn in der steten Wechselwirkung zwischen experimenteller und theoretischer Forschung, die immer zugleich Antrieb und Kontrolle ist, wird auch in Zukunft die sicherste, die einzige Gewähr liegen für den gedeihlichen Fortschritt der physikalischen Wissenschaft.



Wohin wird er uns einmal führen? Ich habe schon in meinen einleitenden Worten Gelegenheit gehabt, zu betonen, daß das Doppelziel der Forschung: einerseits die vollkommene Beherrschung der Sinnenwelt, andererseits die vollständige Erkenntnis der realen Welt, in Wirklichkeit grundsätzlich unerreichbar bleiben wird. Aber nichts wäre verkehrter, als diesen Umstand zum Anlaß einer Entmutigung zu nehmen. Dafür besitzen wir schon gar zu viele greifbare Erfolge praktischer und theoretischer Art — Erfolge, die sich täglich mehren. Und vielleicht haben wir sogar allen Grund, die Endlosigkeit dieses stetigen Ringens um die aus unnahbarer Höhe winkende Palme als einen besonderen Segen für den forschenden Menschengeist zu betrachten. Denn sie sorgt unablässig dafür, daß ihm seine beiden edelsten Antriebe erhalten bleiben und immer wieder von neuem angefacht werden: die Begeisterung und die Ehrfurcht.

# Positivismus und reale Außenwelt.

(Vortrag, gehalten am 12. November 1930 im Harnack-Haus der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften.)

Meine sehr verehrten Damen und Herren! Es ist eine seltsame Welt, in der wir leben. Wohin wir blicken, auf allen Gebieten der geistigen und der materiellen Kultur, sind wir in eine Zeit schwerer Krisen hineingeraten, die unserm gesamten privaten und öffentlichen Leben mannigfache Zeichen der Unruhe und Unsicherheit aufprägt. Manche wollen darin den Beginn einer großartigen Aufwärtsentwicklung sehen, andere wieder deuten sie als die Vorboten des unabwendbaren Verfalls. Wie in der Religion und in der Kunst schon seit langem, so gibt es jetzt auch in der Wissenschaft kaum einen Grundsatz, der nicht von irgend jemand angezweifelt wird, kaum einen Unsinn, der nicht von irgend jemand geglaubt wird, und es erhebt sich die Frage, ob denn überhaupt noch eine Wahrheit besteht, die als allgemein unanfechtbar gelten kann und die einen festen Halt zu bieten vermag gegen die alles umbrandenden Wogen der Skepsis. Die Logik allein, wie sie uns in der Mathematik in ihrer reinsten Form entgegentritt, vermag uns nicht zu helfen. Denn wenn sie selber auch gewiß als unangreifbar zu betrachten ist, so kann sie doch nicht mehr tun als nur aneinanderknüpfen; um inhaltlich bedeutungsvoll zu werden, bedarf sie eines festen Anhaltspunktes. Denn auch die solideste Kette gibt keinen zuverlässigen Halt, wenn sie nicht an einem sicheren Punkt befestigt ist.

Wo finden wir nun einen festen Grund, den wir zum Ausgangspunkt für unsere Natur- und Weltauffassung machen können? Bei dieser Frage fällt der Blick wohl auf die exakteste der Naturwissenschaften, die Physik. Auch diese ist freilich von der allgemeinen Krisis nicht verschont geblieben. Auch



auf ihrem Gebiet ist ein gewisse Unsicherheit entstanden, die Meinungen in erkenntnistheoretischen Fragen gehen zum Teil erheblich auseinander. Ihre bis dahin allgemein anerkannten Grundsätze, sogar die Kausalität selber, werden stellenweise über Bord geworfen. Ja, daß so etwas gerade in der Physik passieren kann, gilt manchem als ein Symptom für die Unzuverlässigkeit alles menschlichen Wissens. Da mag es mir als Physiker gestattet sein, von dem mir durch meine Wissenschaft gegebenen Standpunkt aus Ihnen einige Ausführungen zu machen über die Lage, in der sich die Physik den aufgeworfenen Fragen gegenüber befindet. Vielleicht ergeben sich daraus dann auch gewisse Anhaltspunkte, die zu Schlüssen auf anderen Gebieten der Betätigung menschlichen Geistes verwertbar sind.

## I.

Die Quelle jeglichen Wissens und daher auch der Ursprung einer jeden Wissenschaft liegt in den persönlichen Erlebnissen. Diese sind das unmittelbar Gegebene, das Wirklichste, was man sich denken kann, und der erste Anhaltspunkt für die Anknüpfung der Gedankengänge, welche die Wissenschaft ausmachen. Denn das Material, mit dem in jeder Wissenschaft gearbeitet wird, empfangen wir entweder direkt durch unsere sinnlichen Wahrnehmungen oder indirekt durch Berichte von anderer Seite, durch unsere Lehrer, durch Schriften, durch Bücher. Andere Quellen des Wissens gibt es nicht.

In der Physik haben wir es mit denjenigen Erlebnissen zu tun, die uns in der unbelebten Natur durch unsere Sinne vermittelt werden und die in mehr oder minder genauen Beobachtungen und Messungen ihren Ausdruck finden. Der Inhalt dessen, was wir sehen, hören, fühlen, ist das unmittelbar Gegebene, also unantastbare Wirklichkeit. Es erhebt sich nun die Frage: Kommt die Physik mit dieser Grundlage aus? Ist die Aufgabe der physikalischen Wissenschaft erschöpfend gekennzeichnet, wenn man sagt, daß sie darin besteht, in den Inhalt der verschiedenartigen vorliegenden Naturbeobachtungen einen möglichst genauen und einfachen gesetzlichen Zusammenhang zu bringen? Wir wollen diejenige

Richtung der Erkenntnistheorie, welche diese Frage bejaht und welche gerade gegenwärtig mit Rücksicht auf die Unsicherheit der allgemeinen Zeitlage von einer Anzahl namhafter Physiker und Philosophen mit Entschiedenheit vertreten wird, im folgenden als „Positivismus" bezeichnen. Das Wort ist zwar seit Auguste Comte in mancherlei verschiedenartiger Bedeutung gebraucht worden. Indessen verlangt die Deutlichkeit der folgenden Aussprache, daß wir mit dem Wort einen ganz bestimmten Sinn verbinden, und der angegebene gehört jedenfalls zu den am meisten gebrauchten.

Um die Frage zu prüfen, ob die Basis, die der Positivismus bietet, breit genug ist, um das ganze Gebäude der Physik zu tragen, können wir wohl keine bessere Methode finden, als daß wir zusehen, wohin uns der Positivismus führt, wenn wir uns ihm einmal völlig anvertrauen und ihn als einzige Grundlage der Physik annehmen. Mit dieser Methode möchte ich Sie heute einladen, eine Probe zu machen. Wir wollen uns also zunächst einmal ganz auf den Standpunkt des Positivismus stellen. Dabei werden wir uns selbstverständlich bemühen müssen, streng folgerichtig zu verfahren, namentlich keinen nur gewohnheits- und gefühlsmäßigen Urteilen Raum zu geben. Wir werden allerdings auf manche eigentümliche Folgerungen stoßen; aber wir können versichert sein, daß logische Widersprüche uns nicht passieren können. Denn wir bleiben stets in der Sphäre des Erlebten, und zwei Erlebnisse können sich niemals logisch widersprechen. Und andererseits wieder sind wir ebenso sicher, daß kein irgendwie geartetes Erlebnis von unserer Betrachtung ausgeschlossen wird, daß wir also ganz gewiß keine Quelle menschlicher Erkenntnis ignorieren. Darin liegt die Stärke des Positivismus. Er beschäftigt sich mit allen Fragen, die durch Beobachtungen ihre Beantwortung finden können, und umgekehrt: jede Frage, die er überhaupt als sinnvoll zuläßt, kann durch Beobachtungen beantwortet werden. Es gibt also für den Positivismus keine grundsätzlichen Rätsel, keine dunklen Fragen, alles liegt für ihn in hellem Tageslicht.

Es ist freilich nicht ganz einfach, diese Auffassung überall im einzelnen durchzuführen. Schon im täglichen Sprachgebrauch weichen wir fortwährend von ihr ab. Wenn wir von einem Gegenstand sprechen, zum Beispiel von einem Tisch, so meinen wir etwas, was verschieden ist von dem Inhalt der Beobachtungen, die wir an dem Tisch machen. Wir können den Tisch sehen, wir können ihn betasten, wir spüren seine Festigkeit, seine Härte, wir empfinden ein Schmerzgefühl, wenn wir uns an ihm stoßen usw. Aber von einem Ding, was außer oder hinter allen diesen Sinnesempfindungen ein selbständiges Dasein führt, wissen wir nichts. Daher ist im Lichte des Positivismus der Tisch nichts anderes als ein Komplex derjenigen Sinnesempfindungen, die wir mit dem Worte Tisch verbinden. Nehmen wir alle Sinnesempfindungen fort, so bleibt schlechterdings nichts übrig. Die Frage, was ein Tisch „in Wirklichkeit" ist, hat gar keinen Sinn. Und so geht es mit allen physikalischen Begriffen überhaupt. Die ganze uns umgebende Welt ist nichts anderes als der Inbegriff der Erlebnisse, die wir von ihr haben. Ohne dieselben hat die Umwelt keine Bedeutung. Wenn eine Frage, die sich auf die Umwelt bezieht, sich nicht in irgendeiner Weise auf ein Erlebnis, eine Beobachtung zurückführen läßt, so ist sie sinnlos und wird nicht zugelassen. Daher ist für irgendeine Art Metaphysik im Positivismus kein Platz.

Blicken wir auf den gestirnten Himmel. Derselbe gewährt uns das Bild einer Unzahl von Lichtpünktchen oder Lichtscheibchen, die sich in gewisser mehr oder minder genau meßbarer Weise am Himmel bewegen und deren Strahlung wir ebenfalls nach Intensität und Farbe messen können. Diese Messungen bilden, positivistisch betrachtet, nicht nur die Grundlage, sondern auch den eigentlichen und einzigen sachlichen Inhalt der Astronomie und der Astrophysik. Was wir zum Verständnis der Messungsergebnisse ersinnen, ist menschliche Zutat, freie Erfindung. Ob wir zum Beispiel mit Ptolemäus sagen: Die Erde ist der ruhende Mittelpunkt der Welt, und die Sonne mit allen Sternen bewegt sich um sie herum, oder ob wir mit Kopernikus sagen: Die Erde ist ein unbedeutendes winziges Stäubchen im All, das sich einmal im Tage um sich selber dreht und einmal im Jahr um die Sonne läuft, das ist für den Positivismus nur eine verschiedene Art der Formulierung der Beobachtungen. Diese bilden den einzigen

Tatbestand, und der Vorzug der kopernikanischen Theorie besteht lediglich darin, daß ihre Art der Formulierung sich als die einfachere und allgemeiner brauchbare erwiesen hat, da in der Ptolemäischen Ausdrucksweise viel mehr Komplikationen in der Fassung der astronomischen Gesetze notwendig sein würden. Danach ist Kopernikus nicht als bahnbrechender Entdecker, sondern als genialer Erfinder zu bewerten. Von der großen Umwälzung der Geister, welche seine Lehre hervorrief, von den erbitterten Kämpfen, die um sie geführt wurden, nimmt der Positivismus ebensowenig Notiz wie von dem Gefühl der stillen Ehrfurcht, welches der Anblick des gestirnten Himmels in dem andächtigen Beschauer erweckt, wenn er sich vergegenwärtigt, daß jeder Stern in der Milchstraße eine Sonne von der Art der unsrigen ist und daß jeder Spiralnebel wieder eine Milchstraße darstellt, von der das Licht viele Millionen von Jahren gebraucht, um zu uns zu gelangen, während die Erde mit dem ganzen Menschengeschlecht darauf inmitten dieses Weltengebäudes zu einer schier unfaßbaren Bedeutungslosigkeit herabsinkt.

Doch das sind Gedanken, die auf ästhetisches und ethisches Gebiet hinübergreifen. Wir dürfen ihnen an dieser Stelle, wo es sich um erkenntnistheoretische Fragen handelt, keinen Spielraum gewähren. Fahren wir daher in unserm logischen Gedankengang fort.

Da nach der positivistischen Lehre die Sinnesempfindungen als das primär Gegebene die unmittelbare Wirklichkeit bedeuten, so ist es prinzipiell unrichtig, von Sinnestäuschungen zu sprechen. Was uns unter Umständen täuschen kann, sind nicht unsere Sinnesempfindungen selber, sondern die Schlußfolgerungen, die wir manchmal aus ihnen ziehen. Wenn wir einen geraden Stab schräg ins Wasser halten und ihn an der Eintauchstelle geknickt sehen, so wird die Knickung uns nicht durch die Lichtbrechung vorgetäuscht, sondern die Knickung ist tatsächlich als optische Wahrnehmung vorhanden, und es ist nur eine andere und für manche Anwendungen zweckmäßigere Ausdrucksweise, wenn wir dies so formulieren, daß die Sinnesempfindung sich ebenso verhält, als ob der Stab gerade wäre und als ob die Lichtstrahlen,



die von seinem eingetauchten Teil in unser Auge gelangen, beim Durchgang durch die Wasseroberfläche eine Ablenkung erfahren.

Das Wesentliche an dieser und an allen ähnlichen Betrachtungen ist, daß vom Standpunkt des Positivismus gesehen die beiden Ausdrucksweisen grundsätzlich völlig gleichberechtigt sind und daß es gar keinen Sinn hat, zwischen ihnen nach einem andern Gesichtspunkt als nach dem der Zweckmäßigkeit, zum Beispiel der Anwendbarkeit auf das Tastgefühl, eine Entscheidung treffen zu wollen.

In der Praxis würde allerdings der Versuch einer ernstlichen Durchführung dieser „als ob"-Theorie zu recht seltsamen und unbequemen Konsequenzen führen. Aber es bleibt dabei, daß man ihr vom rein logischen Standpunkt her nichts anhaben kann. Gehen wir also weiter und sehen zu, wohin wir schließlich kommen.

Es kann keine Frage sein, daß für die Gegenstände der belebten Natur die nämlichen Überlegungen zutreffen. Ein Baum zum Beispiel ist im Lichte des Positivismus nichts anderes als ein Komplex von Sinnesempfindungen: wir können ihn wachsen sehen, seine Blätter rauschen hören, den Duft seiner Blüten einatmen. Aber wenn wir von allen diesen Empfindungen absehen, bleibt schlechterdings nichts übrig, was wir als den „Baum an sich" bezeichnen können.

Und was von der Pflanzenwelt gilt, muß auch für die Tierwelt Bedeutung haben. Von einem selbständigen Dasein, von einem Eigenleben derselben zu reden, wird uns lediglich durch Gründe der Zweckmäßigkeit nahegelegt. Ein getretener Wurm krümmt sich, das kann man sehen. Aber es hat keinen Sinn, zu fragen, ob der Wurm dabei Schmerz empfindet. Denn nur der eigene Schmerz wird empfunden, der eines Tieres nur deshalb als vorhanden angenommen, weil diese Annahme eine zweckmäßige Zusammenfassung verschiedener charakteristischer Begleiterscheinungen, wie Zuckungen, Verzerrungen, ausgestoßener Laute darstellt, derselben Begleiterscheinungen, die bei uns selbst durch unsern eigenen Schmerz ausgelöst werden. Schließlich kommen wir von den Tieren zum Menschen. Auch hier verlangt der Positivismus eine reinliche Scheidung zwischen den eigenen Empfindungen

und den Empfindungen anderer. Denn nur die eigenen Erlebnisse sind wirklich, diejenigen anderer Menschen werden nur indirekt erschlossen, sie sind etwas prinzipiell Verschiedenes und müssen konsequenterweise auch den zweckmäßigen Erfindungen zugerechnet werden.

So gewiß sich diese Auffassung vollständig durchführen läßt, ohne daß man jemals einen logischen Widerspruch zu befürchten hat, so führt sie doch für die physikalische Wissenschaft zu einem verhängnisvollen Resultat. Denn wenn diese nichts weiter zum Ziele hat als die möglichst einfache Beschreibung von sinnlichen Erlebnissen, so kann sie strenggenommen nur die eigenen Erlebnisse zum Gegenstand haben. Denn nur die eigenen Erlebnisse sind primär gegeben. Nun liegt es auf der Hand, daß man auf eigene sinnliche Erlebnisse, auch wenn man ein noch so vielseitiger Mensch ist, keine volle Wissenschaft aufbauen kann, und so steht man vor der Alternative, entweder auf eine umfassende Wissenschaft überhaupt zu verzichten, wozu sich auch der extremste Positivist wohl kaum verstehen würde, oder aber ein Kompromiß einzugehen und auch fremde Erlebnisse mit zur Begründung der Wissenschaft heranzuziehen, obgleich damit strenggenommen der ursprüngliche Standpunkt, nur primär Gegebenes zuzulassen, aufgegeben wird. Denn die fremden Erlebnisse sind nur sekundär, durch die Berichte über sie, gegeben. Hier schiebt sich also ein neuer Faktor: die Glaubwürdigkeit und Zuverlässigkeit der Berichte, der mündlichen und der schriftlichen, in die Definition der Wissenschaft ein, und damit ist die eigentliche Grundlage des Positivismus, die unmittelbare Gegebenheit des wissenschaftlichen Materials, bereits an einer Stelle logisch durchbrochen.

Aber setzen wir uns einmal über diese Schwierigkeit hinweg, machen wir also die Annahme, daß alle Berichte über physikalische Erlebnisse zuverlässig sind oder daß man wenigstens ein untrügliches Mittel besitzt, die unzuverlässigen auszuscheiden, so haben dann doch selbstverständlich sämtliche als ehrlich und zuverlässig anerkannten Physiker in Gegenwart und Vergangenheit darauf Anspruch, daß ihre Erlebnisse Berücksichtigung finden, und es besteht kein



Grund dafür, daß man einige ausschließt. Insbesondere wäre es gänzlich ungerechtfertigt, einen Forscher dann weniger voll zu berücksichtigen, wenn es andern Forschern nicht beschieden war, ähnliche Erlebnisse wie er zu erzielen.

Unter diesem Gesichtspunkt ist es gar nicht zu verstehen und zu rechtfertigen, daß man zum Beispiel die von dem französischen Physiker Blondlot im Jahre 1903 aufgefundenen und damals vielfach studierten sogenannten N-Strahlen heute gänzlich ignoriert. René Blondlot, Professor an der Universität Nancy, war gewiß ein ausgezeichneter und zuverlässiger Experimentator, und seine Entdeckung war für ihn ein Erlebnis so gut wie das irgendeines andern Physikers. Wir dürfen nicht etwa sagen, daß er einer Sinnestäuschung zum Opfer gefallen ist; denn Sinnestäuschungen gibt es in der positivistischen Physik nicht, wie wir sahen. Die N-Strahlen sind vielmehr als primär gegebene Wirklichkeit zu behandeln. Und wenn es seit Blondlot und seiner Schule jahrelang niemandem mehr gelungen ist, sie zu reproduzieren, so kann man, positivistisch gesehen, nie wissen, ob sie sich eines Tages unter besondern Umständen nicht doch wieder einmal bemerkbar machen.

Man muß hinzunehmen, daß die Zahl der Persönlichkeiten, deren Erlebnisse für die physikalische Wissenschaft von Wert sind, ohnehin schon nur eine sehr kleine sein kann. Selbstverständlich kommen nur solche Personen in Betracht, die sich speziell dieser Wissenschaft widmen, da die Erlebnisse der anderen auf diesem Gebiete doch mehr oder minder dürftig sind. Ferner scheiden von vornherein auch alle Theoretiker aus; denn deren Erlebnisse beschränken sich im wesentlichen auf den Verbrauch von Tinte, Papier und Gehirnsubstanz, enthalten aber kein neues Material für den Aufbau der Wissenschaft. So bleiben nur die Experimentalphysiker übrig, und zwar in erster Linie solche, die über besonders empfindliche Instrumente für Spezialuntersuchungen verfügen. Somit beschränken sich die für den Fortschritt der physikalischen Wissenschaft in Betracht kommenden Erlebnisse im Grunde auf die einiger weniger Personen.

Wie ist es nun aber zu verstehen, daß die Erlebnisse eines Oersted, der eine Beeinflussung seiner Kompaßnadel durch

einen galvanischen Strom beobachtete, oder eines Faraday, dem zum erstenmal ein elektromagnetischer Induktionseffekt aufstieß, oder eines Hertz, der mit der Lupe nach winzigen elektrischen Fünkchen im Brennpunkt seines parabolischen Spiegels suchte, ein solches Aufsehen und eine solche Umwälzung in der internationalen Welt der Physiker hervorriefen? Der Positivismus kann auf diese Frage nur eine sehr gewundene und im hohen Grade unbefriedigende Antwort geben. Er muß sich auf die Glaubwürdigkeit der Theorie berufen, welche die Aussicht eröffnete, daß diese einzelnen an sich unbedeutenden Erlebnisse eine große Anzahl wichtiger und folgereicher Erlebnisse anderer Personen nach sich ziehen würden. Aber andrerseits ist doch die positivistische Theorie dadurch ausgezeichnet, und sie tut sich etwas darauf zugute, daß sie nichts anderes geben will als eine Beschreibung tatsächlich vorliegender Erlebnisse, und die Frage, wieso es denn kommt, daß ein gewisses Erlebnis eines einzelnen Physikers, selbst bei einer ganz primitiven Beschreibung, unmittelbar auch für alle anderen Physiker der ganzen Welt Bedeutung besitzt, bleibt von ihrem Standpunkt aus ununtersucht und muß als physikalisch sinnlos abgelehnt werden.

Der Grund für diese auffallende Erscheinung ist leicht einzusehen. Der Positivismus, konsequent durchgeführt, leugnet den Begriff und die Notwendigkeit einer objektiven, das heißt von der Individualität des Forschers unabhängigen Physik. Er ist gezwungen, das zu tun, weil er grundsätzlich keine andere Wirklichkeit anerkennt als die Erlebnisse der einzelnen Physiker. Ich brauche nicht zu sagen, daß mit dieser Feststellung die Frage, ob der Positivismus zum Aufbau der physikalischen Wissenschaft genügt, unzweideutig beantwortet ist; denn eine Wissenschaft, die sich selber das Prädikat der Objektivität prinzipiell aberkennt, spricht damit ihr eigenes Urteil. Die Grundlage, die der Positivismus der Physik gibt, ist zwar fest fundiert, aber sie ist zu schmal, sie muß durch einen Zusatz erweitert werden, dessen Bedeutung darin besteht, daß die Wissenschaft nach Möglichkeit befreit wird von den Zufälligkeiten, die durch die Bezugnahme auf einzelne menschliche Individuen in sie hineingebracht werden. Und das geschieht durch einen prinzipiellen, nicht durch die formale Logik, sondern durch die gesunde Vernunft gebotenen Schritt ins Metaphysische, nämlich durch die Hypothese, daß unsere Erlebnisse nicht selber die physikalische Welt ausmachen, daß sie vielmehr uns nur Kunde geben von einer anderen Welt, die hinter ihnen steht und die unabhängig von uns ist, mit anderen Worten, daß eine reale Außenwelt existiert.



Damit machen wir einen Strich durch das positivistische „als ob" und legen den sogenannten zweckmäßigen Erfindungen, von denen wir oben einige spezielle Beispiele besprochen haben, einen höheren Grad von Realität bei als den direkten Beschreibungen der unmittelbaren Sinneseindrücke. Dann verschiebt sich die Aufgabe der Physik: sie hat nicht Erlebnisse zu beschreiben, sondern sie hat die reale Außenwelt zu erkennen.

Allerdings tut sich jetzt eine neue erkenntnistheoretische Schwierigkeit auf. Denn darin wird der Positivismus immer recht behalten, daß es keine andere Erkenntnisquelle gibt als die Sinnesempfindungen. Die beiden Sätze: „Es gibt eine reale, von uns unabhängige Außenwelt", und: „Die reale Außenwelt ist nicht unmittelbar erkennbar", bilden zusammen den Angelpunkt der ganzen physikalischen Wissenschaft. Sie stehen aber in einem gewissen Gegensatz zueinander und legen damit zugleich das irrationale Element bloß, welches der Physik ebenso wie jeder andern Wissenschaft anhaftet und welches sich dahin auswirkt, daß eine Wissenschaft ihre Aufgabe niemals vollständig zu lösen imstande ist. Das müssen wir als eine Tatsache hinnehmen, an der nun einmal nicht zu rütteln ist und die man auch nicht, wie es der Positivismus will, dadurch aus der Welt schaffen kann, daß man die Aufgabe der Wissenschaft von vornherein entsprechend einschränkt. Die Arbeit der Wissenschaft stellt sich uns also dar als ein unablässiges Ringen nach einem Ziel, welches niemals erreicht werden wird und grundsätzlich niemals erreicht werden kann. Denn das Ziel ist metaphysischer Art, es liegt hinter jeglicher Erfahrung.

Aber heißt es nicht alle Wissenschaft für sinnlos erklären, wenn man behauptet, daß sie nur einem luftigen Phantom

nachjagt? — Mitnichten. Denn gerade aus diesem fortwährenden Ringen erwachsen in unaufhörlich anschwellender Menge die wertvollen Früchte, welche uns den handgreiflichen, allerdings auch den einzigen Beweis dafür liefern, daß wir auf dem rechten Wege sind und daß wir dem in unerreichbarer Ferne winkenden Ziel doch andauernd etwas näher rücken. Nicht der Besitz der Wahrheit, sondern das erfolgreiche Suchen nach ihr befruchtet und beglückt den Forscher. Das ist eine Erkenntnis, die einsichtigen Denkern schon lange aufgegangen war, ehe ihr Lessing in seinem bekannten Spruch die klassische Prägung gegeben hat.

## II.

Dem Physiker ist das ideale Ziel die Erkenntnis der realen Außenwelt; aber seine einzigen Forschungsmittel, seine Messungen, sagen ihm niemals etwas direkt über die reale Welt, sondern sind ihm immer nur eine gewisse mehr oder weniger unsichere Botschaft oder, wie es Helmholtz einmal ausgedrückt hat, ein Zeichen, das die reale Welt ihm übermittelt und aus dem er dann Schlüsse zu ziehen sucht, ähnlich einem Sprachforscher, welcher eine Urkunde zu enträtseln hat, die aus einer ihm gänzlich unbekannten Kultur stammt. Was er dabei von vornherein voraussetzt und voraussetzen muß, wenn seiner Arbeit überhaupt ein Erfolg möglich sein soll, ist, daß der Urkunde ein gewisser vernünftiger Sinn innewohnt. So muß auch der Physiker voraussetzen, daß die reale Welt gewissen uns begreiflichen Gesetzen gehorcht, wenn er auch keine Aussicht hat, diese Gesetze vollständig zu erfassen oder auch nur ihre Natur von vornherein mit voller Sicherheit festzustellen.

Im Vertrauen auf die Gesetzlichkeit der realen Welt formt er sich nun ein System von Begriffen und Sätzen, das sogenannte physikalische Weltbild, welches er nach bestem Wissen und Können so ausstattet, daß es, an die Stelle der realen Welt gesetzt, ihm möglichst die nämlichen Botschaften zusendet als diese. Insoweit ihm das gelingt, darf er, ohne eine sachliche Widerlegung befürchten zu müssen, die Behauptung aufstellen, daß er eine Seite der realen Welt wirklich erkannt hat, obwohl sich eine solche Behauptung natürlich niemals direkt beweisen läßt. Ohne überheblich zu erscheinen, darf man wohl seinem Erstaunen und seiner Bewunderung Ausdruck geben, bis zu welch hohem Grade von Vollendung der menschliche Forschergeist seit den Zeiten des Aristoteles das physikalische Weltbild auszugestalten verstanden hat. Vom Standpunkt des Positivismus betrachtet ist natürlich die Idee eines physikalischen Weltbildes und das stete Ringen nach Erkenntnis des Realen etwas Fremdes, Sinnloses. Denn wo kein Gegenstand vorhanden ist, da gibt es auch nichts, was abgebildet werden kann.



Die Aufgabe des physikalischen Weltbildes läßt sich also dahin charakterisieren, daß es einen möglichst engen Zusammenhang herstellen soll zwischen der realen Welt und der Welt der sinnlichen Erlebnisse. Die letztere ist es, welche zunächst das Material liefert, und die Bearbeitung des Materials läuft im wesentlichen darauf hinaus, daß aus dem Komplex der physikalischen Erlebnisse alles dasjenige nach Möglichkeit abgetrennt und ausgeschieden wird, was darin durch die Besonderheit des Einzelfalles, namentlich durch die Beschaffenheit der menschlichen Sinnesorgane beziehungsweise der benützten Meßgeräte bedingt erscheint.

Im übrigen hat das physikalische Weltbild von vornherein nur die eine Bedingung zu erfüllen, daß es in allen seinen Teilen logisch widerspruchsfrei ist. Sonst ist dem Bildner vollständig freie Hand gelassen, er darf mit unbeschränkter Autonomie verfahren und braucht seiner Einbildungskraft keinerlei Zwang aufzuerlegen. Darin liegt freilich auch ein bedeutendes Maß von Willkür und Unsicherheit, und dementsprechend erweist sich die Natur der Aufgabe als viel schwieriger, als es einer naiven Betrachtung vielleicht zunächst erscheinen mag. Schon beim allerersten Schritt, der darin besteht, einzelne vorliegende Messungsergebnisse in ein einheitliches Gesetz zusammenzufassen, muß die freie Spekulation einsetzen, da der Forscher sofort genötigt ist, über das in der Erfahrung Gegebene irgendwie hinauszugreifen. Er steht vor derselben Aufgabe, wie wenn er eine Anzahl einzelner hingezeichneter Punkte durch eine Kurve verbinden soll. Bekanntlich gibt es, wie dicht auch die Punkte neben-

einander liegen, stets unendlich viele derartige Kurven. Auch wenn man ein in dauernder Bewegung befindliches Registrierinstrument benützt, welches selbständig eine vollständige Kurve, zum Beispiel eine Temperaturkurve aufzeichnet, so ist diese Kurve doch niemals eine scharfe, sondern sie ist ein mehr oder weniger dicker Strich, in welchem unendlich viele scharfe Kurven Platz haben.

Um aus dieser Unsicherheit heraus zu einer bestimmten Entscheidung zu kommen, gibt es keine allgemein brauchbare Vorschrift. Hier kann immer nur ein besonderer Gedanke helfen, ein Gedanke, der darauf hinauskommt, auf Grund einer gewissen speziellen Ideenverbindung eine Hypothese einzuführen, welche der gesuchten Kurve von vornherein bestimmte Eigenschaften vorschreibt und dadurch unter den unendlich vielen Kurven eine ganz bestimmte aussondert. Ein solch neuer Gedanke hat seinen Ursprung jenseits aller Logik; um ihn fassen zu können, muß der Physiker zwei Eigenschaften besitzen: Sachkenntnis und schöpferische Phantasie. Er muß nämlich erstens auch mit anderen Arten von Messungen vertraut sein, und er muß zweitens den Einfall haben, zwei verschiedenartige Messungserlebnisse unter einen gemeinsamen Gesichtspunkt zu bringen. Jede leistungsfähige Hypothese geht zurück auf die glückliche Kombination zweier verschiedenartiger Erlebnisvorstellungen. Das läßt sich in vielen Fällen auch historisch im einzelnen verfolgen, von Archimedes angefangen, der den Gewichtsverlust seines eigenen Körpers im Wasser kombinierte mit dem Gewichtsverlust der ins Wasser getauchten goldenen Krone des Tyrannen von Syrakus, über Newton, der den Fall eines Apfels vom Baum kombiniert haben soll mit der Bewegung des Mondes gegen die Erde, bis hin zu Einstein, der den Zustand eines gravitierenden Körpers in einem ruhenden Kasten kombinierte mit dem Zustand eines gravitationsfreien Körpers in einem nach oben hin beschleunigten Kasten, oder zu Bohr, der den Kreislauf eines Elektrons um den Atomkern kombinierte mit dem Umlauf eines Planeten um die Sonne. Es wäre gewiß ein reizvolles Unternehmen, für möglichst viele bedeutungsvolle Hypothesen der Physik den Ideenverbindungen im einzelnen nachzuspüren, denen sie ihren Ursprung verdanken, obwohl eine solche Aufgabe ihre großen Schwierigkeiten hat. Denn von jeher pflegten die schaffenden Meister aus gewissen persönlichen Gründen es nicht zu lieben, die feinsten Gedankenfäden, mit denen sie ihre Hypothesen spannen, und die oft auch Unwesentliches mit enthalten, der Öffentlichkeit preiszugeben.



Was nun die Brauchbarkeit einer aufgestellten Hypothese betrifft, so kann dieselbe immer nur dadurch geprüft werden, daß man ihre Konsequenzen ableitet. Das geschieht durch ein rein logisches, der Hauptsache nach mathematisches Verfahren, welches die Hypothese als Ausgangspunkt benützt und daraus eine möglichst vollständige Theorie entwickelt. Die speziellen Aussagen der Theorie sind es dann, die mit Messungen in Zusammenhang gebracht werden können, und je nachdem der Zusammenhang befriedigend gefunden wird oder nicht, zieht man auf die Ausgangshypothese günstige oder ungünstige Schlüsse.

Bei diesem Sachverhalt offenbart sich vor allem die bemerkenswerte Tatsache, daß der Fortschritt der physikalischen Wissenschaft sich nicht etwa in stetig fortschreitender Entwicklung vollzieht, entsprechend einer allmählichen Vertiefung und Verfeinerung unserer Kenntnisse, sondern daß er ruckweise, explosionsartig vor sich geht. Jede neu auftauchende Hypothese stellt eine Art plötzlicher Eruption vor, einen Sprung ins Dunkle, logisch unerklärbar. Dann schlägt die Geburtsstunde einer neuen Theorie, welche sich, nachdem sie einmal das Licht der Welt erblickt hat, stetig und mehr oder minder zwangsläufig fortentwickelt und ihren Schicksalsspruch schließlich durch die Messungen erfährt. Solange derselbe günstig ausfällt, gewinnt die Hypothese mehr und mehr an Ansehen, und die Entwicklung der Theorie zieht immer weitere Kreise. Sobald aber einmal irgendwo eine Schwierigkeit bei der Deutung von Messungsergebnissen auftaucht, stellen sich Zweifel, Mißtrauen, kritische Wehen ein. Das sind Anzeichen für das Absterben der alten und das Heranreifen einer neuen Hypothese, deren Aufgabe es ist, die Krisis zu lösen und eine andere Theorie heraufzuführen, welche die Vorzüge der alten beibehält und ihre Mängel verbessert. So vollzieht sich in dauerndem Wechselspiel, bald im kleinen,

bald im großen die Entwicklung der physikalischen Erkenntnis auf ihrem Wege zur Erforschung der realen Außenwelt. Das läßt sich überall in der Geschichte der Physik verfolgen. Nur wer die Schwierigkeiten und die Konflikte, in welche die schöne Lorentzsche Theorie der Elektrodynamik bewegter Körper mit den Messungen geraten war, im einzelnen mit verfolgt hat, wird das erlösende Gefühl der Erleichterung richtig bewerten, welches die Aufstellung der Relativitätshypothese mit sich gebracht hat. Und bei der Quantenhypothese kann man etwas ganz Ähnliches beobachten, nur daß wir hier gegenwärtig die Krisis noch nicht vollständig hinter uns haben.

Da in bezug auf die Fassung einer Hypothese dem Schöpfer derselben von vornherein völlig freie Hand gelassen ist, so kann er bei der Wahl der einzuführenden Begriffe und Sätze, sofern sie nur keinen logischen Widerspruch aufweisen, mit voller Souveränität schalten. Es ist nicht richtig, wie auch in Physikerkreisen manchmal behauptet wird, daß man bei der Aufstellung einer physikalischen Hypothese nur solche Begriffe benützen dürfe, deren Sinn durch Messungen von vornherein, das heißt unabhängig von jeder Theorie, hinlänglich scharf festgelegt sei. Denn erstens ist jede Hypothese, als Bestandteil des physikalischen Weltbildes, ein Produkt des vollkommen frei spekulierenden Menschengeistes, und zweitens gibt es überhaupt keine physikalische Größe, die unmittelbar gemessen wird. Vielmehr empfängt eine Messung ihren physikalischen Sinn immer erst durch die Deutung, welche ihr eine Theorie verleiht. Ein jeder, der in einem Präzisionslaboratorium Bescheid weiß, kann bezeugen, daß auch die direkteste und feinste Messung, wie die eines Gewichts oder einer Stromstärke, um physikalisch brauchbar zu werden, einer Anzahl Korrekturen bedarf, die nur aus einer Theorie, mithin aus einer Hypothese, abgeleitet werden können.

So verfügt der Schöpfer einer Hypothese über schier unbegrenzte Möglichkeiten und Hilfsmittel, er ist so wenig auf die physiologischen Leistungen seiner Sinnesorgane angewiesen, wie auf die Benützung physikalischer Meßgeräte. Mit seinem geistigen Auge durchschaut und kontrolliert er die



feinsten Vorgänge, die sich in einem physikalischen Gebilde abspielen, er verfolgt die Bewegungen eines jeden Elektrons, er kennt die Frequenz und die Phase einer jeden Welle, ja er schafft sich sogar nach freier Willkür seine Geometrie. Und mit seinen geistigen Werkzeugen, seinen Instrumenten von idealer Genauigkeit greift er in alle physikalischen Geschehnisse nach Belieben ein, um die verwegensten Gedankenexperimente auszuführen und aus deren Ergebnis weittragende Schlüsse zu ziehen. Alle solche Schlüsse haben freilich mit wirklichen Messungen zunächst gar nichts zu tun. Daher kann auch eine Hypothese an sich niemals durch Messungen direkt als richtig oder als falsch erwiesen werden, sie kann sich nur als mehr oder minder zweckmäßig herausstellen.

Und damit kommen wir zur Kehrseite der Sache. Die ideale Hellsichtigkeit des geistigen Auges hinsichtlich aller Vorgänge in der physikalischen Welt kommt ja nur dadurch zustande, daß diese Welt nur ein selbstgeschaffenes Bild der realen Welt ist, daß daher die vollkommene Kenntnis derselben und die unbeschränkte Herrschaft über sie im Grunde eine Selbstverständlichkeit darstellt. Eine Bedeutung für die Wirklichkeit und damit ihren eigentlichen Wert bekommt jede physikalische Hypothese erst dadurch, daß die aus ihr fließende Theorie mit Messungserlebnissen in Beziehung gebracht wird. Nun lehrt freilich eine Messung, wie wir sahen, unmittelbar ebensowenig etwas über das physikalische Weltbild wie über die reale Welt, vielmehr bedeutet eine jede Messung einen gewissen Vorgang in den Sinnesorganen des messenden Physikers beziehungsweise in dem von ihm benützten Meßgerät, von dem nur das eine feststeht, daß er mit dem zu messenden realen Vorgang irgendwie zusammenhängt. Der physikalische Sinn einer Messung ist also nicht unmittelbar gegeben, sondern seine Feststellung ist ebensogut eine Aufgabe der Wissenschaft, wie die Erforschung des gesetzlichen Ablaufs irgendeines anderen Vorganges. Und auch die Methode der Forschung ist die nämliche, das heißt man muß alle Einzelheiten des Messungsvorganges mit in das physikalische Weltbild einreihen, man muß also auch die Sinnesorgane des messenden Physikers beziehungsweise seine

Meßgeräte und die sich darin abspielenden Vorgänge mit dem geistigen Auge des idealen Hellsehers zu durchschauen suchen. Auf diese Weise allein kann es gelingen, den gesetzlichen Zusammenhang des Messungserlebnisses mit dem Wesen des gemessenen Vorganges näher zu ergründen. Die erkenntnistheoretischen Schwierigkeiten, in welche die theoretische Physik neuerdings durch die Entwicklung der Quantenhypothese geraten ist, beruhen, wie es scheint, im Grunde darauf, daß man in naheliegender, aber nicht gerechtfertigter Weise das leibliche Auge des messenden Physikers identifiziert hat mit dem geistigen Auge des spekulierenden Physikers, während doch das erstere das Objekt des letzteren bildet. Da nämlich eine jede Messung mit einem gewissen mehr oder weniger merklichen kausalen Eingriff in den Verlauf des zu messenden Vorgangs verbunden ist, so ist es prinzipiell genommen gar nicht möglich, die Gesetze des Ablaufs physikalischer Vorgänge ganz zu trennen von den Methoden ihrer Messung. Zwar bei gröberen Vorgängen, wie solchen, die viele Atome umfassen, ist die Messungsmethode in weiterm Umfang unerheblich, und daher hat sich in der theoretischen Physik der früheren, jetzt sogenannten klassischen Epoche allmählich die Annahme eingebürgert, daß die Messungen einen unmittelbaren Einblick in die realen Vorgänge gewähren können. Aber in dieser Voraussetzung liegt, wie wir schon oben ausführlich erörterten, ein prinzipieller Fehler, ein Fehler, der demjenigen gerade entgegengesetzt ist, den der Positivismus begeht, wenn er nur die Messungserlebnisse allein berücksichtigt und reale Vorgänge überhaupt ignoriert. So wenig das zulässig ist, ebensowenig ist es möglich, die Messungen ganz auszuschalten und zu den realen Vorgängen selber vorzudringen. Ja in der Existenz des unteilbaren Wirkungsquantums ist sogar eine ganz bestimmte zahlenmäßig angebbare Grenze festgelegt, über die hinaus auch die feinste physikalische Meßmethode keinen Aufschluß über alle Fragen nach den Einzelheiten realer Vorgänge zu liefern vermag. Daher bleibt nur die Folgerung übrig, daß solche Fragen gar keinen physikalischen Sinn haben. Hier ist der Punkt, wo die Ergebnisse der Messungen durch die freie Spekulation ergänzt werden müssen, um das physikalische Weltbild nach



Möglichkeit abzurunden und damit einer Erkenntnis der realen Welt etwas näherzukommen. —

Zurückschauend können wir sagen, daß der inhaltliche Fortschritt der physikalischen Wissenschaft in erster Linie abhängt von der Ausbildung der Messungsmethoden. Insofern teilen wir ganz den Standpunkt des Positivismus. Aber der Unterschied ist der, daß nach der positivistischen Auffassung die Messungserlebnisse die primären unteilbaren Elemente bilden, auf denen sich die ganze Wissenschaft aufbaut, während im Gegensatz dazu in der wirklichen Physik die Messungen betrachtet werden als das mehr oder minder verwickelt zusammengesetzte Endergebnis von Wechselwirkungen zwischen Vorgängen in der Außenwelt mit Vorgängen in den Meßinstrumenten beziehungsweise den Sinnesorganen, deren sachgemäße Entwirrung und Deutung eine Hauptaufgabe der wissenschaftlichen Forschung bildet. Daher müssen vor allem die Messungen zweckmäßig angeordnet werden; denn jede Versuchsanordnung stellt die spezielle Formulierung einer gewissen Frage an die Natur dar.

Aber zu einer vernünftigen Frage gelangt man nur mit Hilfe einer vernünftigen Theorie. Man darf nämlich nicht etwa glauben, daß man über den physikalischen Sinn einer Frage ein Urteil gewinnen kann, ohne überhaupt eine Theorie zu benützen. Vielmehr kommt es häufig genug vor, daß eine gewisse Frage nach der einen Theorie einen physikalischen Sinn hat, nach der andern Theorie nicht, und daß sie daher ihre Bedeutung zugleich mit der Theorie wechselt.

Nehmen wir zum Beispiel die Frage der Verwandlung eines unedlen Metalles, sagen wir Quecksilber, in Gold. Diese Frage hatte zur Zeit der Alchemisten einen tiefen Sinn, ihrer Enträtselung haben ungezählte Forscher ihr Vermögen und ihre Gesundheit geopfert. Nach der Einführung der Lehre von der Unveränderlichkeit der Atome verlor die Frage ihren Sinn, es galt allgemein als töricht, ihr nachzugehen. Heute, seit der Einführung des Bohrschen Atommodells, wonach das Goldatom sich vom Quecksilberatom nur durch das Fehlen eines einzigen Elektrons unterscheidet, ist die Frage wieder so akut geworden, daß ihre Bearbeitung mit den modernsten Forschungsmitteln von neuem aufgenommen wurde. Man

sieht auch hier: in letzter Linie geht doch das Probieren über das Studieren. Ja, selbst das ergebnislose Probieren vermag, wenn es richtig gedeutet wird, die wichtigsten Erkenntnisse zu liefern.

So legten die mehr oder weniger planlosen Versuche, Gold zu machen, den Grund zur wissenschaftlichen Chemie, so entsprang dem unlösbaren Problem des Perpetuum mobile das Prinzip der Erhaltung der Energie, so gaben die vergeblichen Versuche, die absolute Bewegung der Erde zu messen, den Anlaß zur Aufstellung der Relativitätstheorie. Experimentelle und theoretische Forschung sind stets aufeinander angewiesen. Keine der beiden kann ohne die andere vorwärtskommen.

Freilich ist es manchmal verlockend, hinterher, wenn einmal eine neue Erkenntnis sich durchgerungen hat, gewisse damit zusammenhängende Probleme nicht nur als sinnlos zu erklären, sondern auch die Sinnlosigkeit a priori beweisen zu wollen. Aber das ist eine Täuschung. An sich ist weder die absolute Bewegung der Erde, das heißt die Erdbewegung gegenüber dem Lichtäther, noch der absolute Newtonsche Raum physikalisch sinnlos, wie man das in manchen populären Darstellungen der Relativitätstheorie lesen kann. Die erstere wird es erst dann, wenn die spezielle Relativitätstheorie, der letztere, wenn die allgemeine Relativitätstheorie eingeführt wird.

So kann man überall verfolgen, wie gewisse an sich vollberechtigte, durch Jahrhunderte festgewurzelte und daher vielfach als selbstverständlich betrachtete wissenschaftliche Anschauungen durch neu auftauchende leistungsfähigere Theorien wankend gemacht und schließlich verdrängt werden.

## III.

Selbst vor dem Fundament aller bisherigen naturwissenschaftlichen Forschung, dem Gesetz der Kausalität, hat der Kampf der Meinungen nicht haltgemacht. Gilt das Kausalgesetz, wie man bisher stets annahm, für jeden physikalischen Vorgang bis ins einzelne in aller Strenge, oder besitzt es, auf die feinsten Vorgänge in den Atomen angewendet, nur



eine summarische, statistische Bedeutung? Auch diese Frage läßt sich nicht von vornherein, weder auf rein erkenntnistheoretischem Wege noch durch Messungen entscheiden. Es steht vielmehr von vornherein ganz in dem Belieben des spekulierenden und hypothesenbildenden Physikers, ob er es vorzieht, sein Weltbild mit der strengen dynamischen oder aber mit der statistischen Kausalität auszustatten. Entscheidend ist nur, wie weit er damit kommt. Und das kann nur in der Weise geprüft werden, daß man sich zunächst einmal versuchsweise für einen der beiden Standpunkte entscheidet und nun zusieht, zu welchen Folgen man von ihm aus gelangt, ganz ebenso, wie wir es zu Anfang unserer heutigen Betrachtung bei der Untersuchung der Leistungen des Positivismus gemacht haben. Welchen der beiden Standpunkte man zunächst wählen will, ist prinzipiell gleichgültig, praktisch wird man denjenigen vorziehen, der von vornherein mehr Befriedigung gewährt; und da möchte ich meinerseits entschieden glauben, daß die Annahme einer strengen Kausalität vorzuziehen ist, einfach deshalb, weil die dynamische Gesetzlichkeit viel weiter und tiefer greift als die statistische, welche von vornherein auf gewisse Erkenntniswerte Verzicht leistet. Denn in einer statistischen Physik gibt es nur solche Gesetze, die sich auf eine Vielheit von Ereignissen beziehen. Die einzelnen Ereignisse werden zwar ausdrücklich als solche eingeführt und anerkannt, aber die Frage nach ihrem gesetzlichen Verlauf wird von vornherein als sinnlos erklärt. Das scheint mir in hohem Grade unbefriedigend. Auch sehe ich bis jetzt nicht den mindesten Grund, der dazu drängen würde, die Annahme einer strengen Gesetzlichkeit aufzugeben, und zwar weder im physischen noch im geistigen Weltbild. Selbstverständlich ist die strenge kausale Gesetzlichkeit nicht unmittelbar auf die Aufeinanderfolge von Erlebnissen anwendbar. Zwischen Erlebnissen lassen sich immer nur statistische Zusammenhänge aufstellen. Auch die schärfste Messung enthält stets einen zufälligen, unkontrollierbaren Fehler. Aber ein Erlebnis ist, wie wir sahen, objektiv betrachtet, ein aus vielen verschiedenartigen Elementen resultierender Vorgang, und wenn auch jedes einzelne Element nach einem streng kausalen Gesetz mit einem andern einzelnen Element eines

darauffolgenden Erlebnisses verbunden ist, so können doch aus einem ganz bestimmten als Ursache betrachteten Erlebnis je nach der Art seiner elementaren Zusammensetzung ganz verschiedene Folgeerlebnisse hervorgehen.

Doch hier drängt sich eine Frage auf, welche der Voraussetzung einer strengen Kausalität, wenigstens auf geistigem Gebiet, eine prinzipiell unübersteigliche Schranke entgegenzustellen scheint, und bei der ich wegen ihres höchsten menschlichen Interesses zum Schluß noch kurz verweilen zu dürfen bitte: die Frage der Willensfreiheit. Denn die Freiheit des Willens ist uns durch unser eigenes Bewußtsein, das doch die letzte und höchste Instanz unseres Erkenntnisvermögens darstellt, unmittelbar gewährleistet.

Ist nun der menschliche Wille wirklich frei oder ist er streng kausal determiniert? Diese beiden Alternativen scheinen sich völlig auszuschließen, und da die erstere offenbar bejaht werden muß, so scheint damit die Annahme einer strengen Kausalität wenigstens in einem Falle ad absurdum geführt zu sein.

Es sind ja schon viele Versuche gemacht worden, um dieses Dilemma zu lösen, häufig in der Weise, daß man sich bemühte, eine Grenze festzustellen, über welche die Gültigkeit des Kausalitätsgesetzes nicht hinausreicht. Neuerdings wird dabei auch die moderne Entwicklung der Physik herangezogen und die Willensfreiheit direkt als eine Stütze für die Annahme einer lediglich statistischen Kausalität verwertet. Ich vermag, wie ich schon bei anderen Anlässen zu betonen Gelegenheit hatte, einer solchen Auffassung nicht beizupflichten. Wäre sie zutreffend, so würde damit der menschliche Wille zu einem Organ des blinden Zufalls degradiert. Nach meiner Meinung hat die Frage nach der Willensfreiheit nichts zu tun mit dem Gegensatz zwischen kausaler und statistischer Physik, ihre Bedeutung geht viel tiefer, sie ist überhaupt unabhängig von irgendeiner physikalischen oder biologischen Hypothese.

Die Lösung des genannten Dilemmas liegt, wie ich in wesentlicher Übereinstimmung mit namhaften Philosophen glaube, auf einer ganz anderen Seite. Eine nähere Prüfung ergibt nämlich, daß die oben gestellte Alternative, ob der



menschliche Wille frei oder ob er streng kausal determiniert ist, auf einer logisch unzulässigen Disjunktion beruht. Diese beiden einander gegenübergestellten Fälle schließen sich gar nicht aus. Was heißt denn: der menschliche Wille ist kausal determiniert? Das kann doch nur den Sinn haben, daß eine jede menschliche Willenshandlung mit allen ihren Motiven vorausgesehen und vorausgesagt werden kann, aber natürlich nur von jemandem, der den betreffenden Menschen in allen seinen physischen und geistigen Eigenschaften, seinem Bewußtsein und seinem Unterbewußtsein absolut genau durchschaut, der also ein absolut hellsehendes geistiges Auge, sagen wir ein göttliches Auge besitzt. Das können und müssen wir ohne Widerrede zugeben. Vor Gott sind alle Menschen, auch die vollkommensten und die genialsten, auch ein Goethe und ein Mozart, primitive Geschöpfe, deren geheimste Gedanken und feinste Gefühlsregungen unter seinem Auge sich wie die Perlen einer Kette in regelmäßiger Aufeinanderfolge aneinanderreihen. Das tut der Würde dieser großen Männer keinen Eintrag. Nur muß man immer berücksichtigen, daß es eine Vermessenheit und ein Unsinn wäre, wenn man auf Grund dieser Überlegungen den Versuch machen wollte, es dem göttlichen Auge gleichzutun und die Gedanken des göttlichen Geistes vollständig nachzudenken. Der gewöhnliche menschliche Intellekt würde gar nicht fähig sein, die tiefsten Gedanken auch nur zu verstehen, selbst wenn sie ihm mitgeteilt würden, und insofern entzieht sich der Satz von der Determiniertheit der geistigen Vorgänge in vielen Fällen einer jeden Prüfung, er ist metaphysischer Art, ebenso wie der Satz, daß es eine reale Außenwelt gibt. Aber er ist logisch unanfechtbar, und daß er eine hohe Bedeutung besitzt, beweist die einfache Tatsache, daß er jeder wissenschaftlichen Erforschung des Zusammenhangs seelischer Vorgänge tatsächlich zugrunde gelegt wird. Kein Biograph wird die Frage nach den Motiven einer auffallenden Handlung seines Helden dadurch als erledigt betrachten, daß er sie auf einen Zufall zurückführt, er wird vielmehr stets den Mangel einer befriedigenden Erklärung entweder mit der Lückenhaftigkeit des vorliegenden Quellenmaterials, oder auch, wenn er einsichtig genug ist, mit den Grenzen seiner eigenen Fassungs-

kraft in Verbindung bringen, und ebenso stellen wir im praktischen Leben unser Verhalten gegen die Mitmenschen stets auf die Voraussetzung ein, daß ihre Worte und Handlungen durch ganz bestimmte Ursachen, die entweder in ihnen selber oder in ihrer Umgebung liegen, determiniert werden, wenn dieselben uns auch oft nicht erkennbar sind.

Was heißt nun aber andrerseits: Der menschliche Wille ist frei? Doch nur, daß ein jeder, dem die Möglichkeit gegeben ist, zwei Handlungen zu begehen, die Kraft in sich fühlt, nach eigenem Ermessen sich für die eine oder die andere Handlung beliebig entscheiden zu können. Das steht durchaus nicht im Widerspruch mit unseren vorigen Feststellungen. Ein Widerspruch wäre nur dann vorhanden, wenn der Fall eintreten könnte, daß ein Mensch sich selber so vollkommen durchschaut wie es ein göttliches Auge tut. Denn dann könnte er auf Grund des Kausalgesetzes seine eigenen Willenshandlungen voraussehen, und sein Wille wäre nicht mehr frei. Dieser Fall ist aber schon rein logisch ausgeschlossen. Denn auch das feinste Auge vermag sich ebensowenig selber zu durchschauen als wie irgendein Werkzeug sich selber bearbeiten kann. Objekt und Subjekt der Erkenntnistätigkeit können niemals identisch sein, weil man von Erkenntnis nur dann reden kann, wenn das zu erkennende Objekt nicht beeinflußt wird durch die Vorgänge im erkennenden Subjekt. Daher ist schon die Frage nach der Gültigkeit des Kausalgesetzes bei der Anwendung auf eigene Willenshandlungen von vornherein sinnlos, ebenso wie es von vornherein sinnlos ist zu fragen, ob jemand durch gehöriges Emporklimmen sich über sich selber erheben kann, oder ob jemand im Wettlauf seinen eigenen Schatten überholen kann.

Prinzipiell genommen kann jedermann das Kausalgesetz auf alle Vorgänge in seiner Umwelt, der physischen wie der geistigen, nach Maßgabe seiner Intelligenz anwenden, aber nur falls sie durch diese Anwendung nicht beeinflußt werden, also nicht auf die eigenen gegenwärtigen und zukünftigen Gedanken und Willenshandlungen. Diese sind das einzige Objekt, welches sich für ihn begrifflicherweise prinzipiell dem Zwang des Kausalgesetzes entzieht, freilich gerade dasjenige Objekt, welches seinen kostbarsten und eigensten Besitz ausmacht und von dessen richtiger Verwaltung sein Friede und sein Glück abhängt. Das Kausalgesetz vermag ihm daher auch keine Richtschnur seines Handelns zu gewähren, es kann ihn nicht entbinden von der sittlichen Verantwortung, die ihm durch ein ganz anderes Gesetz auferlegt wird, welches mit dem Kausalgesetz nichts zu tun hat, und welches ein jeder in seinem Gewissen mit sich trägt, deutlich genug erkennbar, wenn er es verstehen will.



Es ist eine gefährliche Selbsttäuschung, wenn man versucht, sich eines unbequemen sittlichen Gebotes dadurch zu entledigen, daß man sich auf ein unabwendbares Naturgesetz beruft. Ein Menschenkind, das seine eigene Zukunft als durch das Schicksal zwangsläufig vorherbestimmt ansieht, oder ein Volk, das den Prophezeiungen seines naturgesetzlich festgelegten Unterganges Glauben schenkt, bekundet damit in Wirklichkeit nur, daß es den rechten Willen zum Aufstieg nicht aufzubringen vermag.

Meine Damen und Herren! Wir sind hier bei einem Punkt angelangt, an welchem die Wissenschaft sich selber für unzuständig erklärt und über sich hinausweist in Regionen, die sich ihrer Betrachtung entziehen. Daß sie eine derartige Selbstbescheidung zu üben vermag, sollte uns, wie ich meine, um so mehr Vertrauen einflößen auf die Zuverlässigkeit derjenigen Resultate, die sie in ihrem eigenen Bereich gewonnen hat. Aber auf der anderen Seite sehen wir doch auch zugleich, daß die verschiedenen Gebiete, in denen sich der menschliche Geist betätigt, sich nicht vollständig voneinander isolieren lassen, sondern vielmehr aufs innigste zusammenhängen. Wir waren ausgegangen von einer einzelnen Fachwissenschaft und wir sind durch Fragen rein physikalischer Art hinausgeführt worden über die Sinneswelt in die reale metaphysische Welt, die uns wegen der Unmöglichkeit, sie direkt zu erkennen, als etwas Geheimnisvolles und unbegreiflich Erhabenes entgegentritt, während sie doch auch wieder bei unserem Versuche, sie abzubilden, eine tiefe innere Harmonie und Schönheit ahnen läßt. Und schließlich sind wir bei den höchsten Fragen angelangt, welche sich einem jeden aufdrängen müssen, der überhaupt einmal über den Sinn seines Lebens ernsthaft nachdenken will.

So werden auch diejenigen von Ihnen, welche der Physik ferner stehen, wie ich hoffe, den Eindruck gewonnen haben, daß auch eine spezielle Fachwissenschaft, wenn sie nur gründlich und gewissenhaft betrieben wird, wertvolle Schätze ästhetischer und ethischer Art zutage fördern kann, und weiter, daß gerade die großen Krisen in der geistigen Kultur, deren wir anfangs gedachten und an deren Betrachtung wir anknüpften, in letzter Linie doch nur dazu dienen, um den Zusammenschluß zu einer neuen, höheren Einheit vorzubereiten.

# Die Kausalität in der Natur.

(Erweiterung der Guthrie-Lecture, vorgetragen am 17. Juni 1932 in der Physical Society of London.)

Die neuere Entwicklung der Physik hat gelehrt, daß die hohen Erwartungen, die man eine Zeitlang an die glänzenden Erfolge der physikalischen Forschung für die Vertiefung der Naturerkenntnis mit gewissem Recht geknüpft hatte, in wesentlichen Punkten eingeschränkt werden müssen, und daß insbesondere das Kausalgesetz in seiner bisher üblichen klassischen Formulierung unmöglich allgemein durchgeführt werden kann; denn in seiner Anwendung auf die Welt der Atome hat es endgültig versagt. Daher findet sich ein jeder, der für den Sinn und die Bedeutung naturwissenschaftlicher Forschung Interesse besitzt, vor die dringende Aufgabe gestellt, das eigentliche Wesen der Naturgesetzlichkeit aufs neue der Prüfung zu unterziehen und vor allem dem Begriff der Kausalität noch tiefer als bisher auf den Grund zu kommen.

Es geht heute nicht mehr an, daß man, wie es Kant getan hat, das Kausalgesetz als Ausdruck der Gültigkeit unverbrüchlicher Regeln für alles Geschehen einfach mit zu den Kategorien rechnet, als eine Form der Anschauung, ohne die wir überhaupt nicht imstande sind, Erfahrungen zu sammeln. Denn wenn auch der Kantsche Satz, daß gewisse Kategorien allen unseren Erfahrungen von vornherein mit zugrunde liegen, wohl für alle Zeiten unantastbar bleiben wird, so ist damit noch nichts über den speziellen Sinn der einzelnen Kategorien ausgesagt, und die Tatsache, daß die Axiome der Euklidischen Geometrie, welche Kant mit zu den Kategorien rechnete, neuerdings nicht nur als erweiterungsfähig, sondern sogar als erweiterungsbedürftig erkannt worden sind, hat die Physiker in dieser Hinsicht sehr vorsichtig gemacht. Wir wollen also, um nicht voreingenommen

zu verfahren, uns an keine gefährlichen Voraussetzungen binden und müssen daher zunächst nach einem auf die Dauer zuverlässigen Ausgangspunkt für die Einführung des Begriffes der Kausalität suchen.

Wenn von einem Kausalzusammenhang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ereignissen die Rede ist, so meint man damit ohne Zweifel eine gewisse gesetzmäßige Verkettung der beiden Ereignisse, wobei das frühere Ereignis als Ursache, das spätere als Wirkung bezeichnet wird. Aber die Frage ist: Worin besteht diese besondere Art der Verkettung? Gibt es ein untrügliches Zeichen dafür, daß ein gewisses, in der Natur stattfindendes Ereignis kausal durch ein anderes bedingt ist?

Diese Frage ist so alt wie die Naturwissenschaft, ja wie die Wissenschaft überhaupt, und der Umstand, daß sie immer wieder aufgeworfen wird, beweist schon, daß sie auch bis heute noch nicht endgültig beantwortet worden ist. Das Unbefriedigende dieser Feststellung wird aber erheblich gemildert, wenn man bedenkt, daß es gar nicht anders sein kann. Denn die Erwartung, daß es je gelingen könnte, den Begriff der Kausalität von vornherein in aller Schärfe zu formulieren und sodann auf diese Definition eine Untersuchung der Gültigkeit des Kausalgesetzes in der Natur zu gründen, mußte in früherer Zeit als naiv, kann aber heute, angesichts der Entwicklung, welche die exakte Naturforschung genommen hat, nur als töricht bezeichnet werden. Es ist ja in der Naturwissenschaft, wie in jeder anderen Wissenschaft, nicht so, daß wir von festen Grundbegriffen ausgehen und nach deren Verwirklichung in der uns umgebenden Welt suchen, sondern es verhält sich gerade umgekehrt. Wir Menschen alle sind nun einmal durch unsere Geburt, ohne vorher darauf vorbereitet oder auch nur verständigt worden zu sein, mitten ins Leben hineingestellt, und um uns in diesem uns aufoktroyierten Leben zurechtfinden zu können, suchen wir unsere Erlebnisse zu ordnen, indem wir mit Hilfe der uns bei der Geburt mitgegebenen geistigen Fähigkeiten, so gut es eben geht, gewisse Begriffe bilden, die zur Anwendung auf die von uns erlebten oder zu erlebenden Ereignisse geeignet sind. Daß bei diesem Verfahren viel Willkür und



Unbestimmtheit mit unterläuft, liegt auf der Hand und wird durch unzählige Tatsachen auf allen Gebieten der Wissenschaft immer wieder bestätigt. Ich weise hier nur auf den Umstand hin, daß sogar in der exaktesten aller Wissenschaften, der Mathematik, noch heutzutage heftiger wie je über den Ursprung und die Bedeutung der Grundbegriffe gestritten wird. Wenn so etwas bei den mathematischen Begriffen passiert, wird niemand erwarten, daß es so leicht gelingen wird, den Begriff der Kausalität in der Natur in einer für alle Zeiten und Kulturen anerkannt gültigen Weise festzulegen.

Und doch läßt gerade das nie erlahmende und sogar gegenwärtig in starkem Ansteigen begriffene Interesse der denkenden Menschheit an der Frage nach dem Wesen und der Gültigkeit des Kausalgesetzes vermuten, daß es sich beim Kausalbegriff um etwas ganz Fundamentales handelt, um einen Begriff, der im Grunde unabhängig ist von menschlichen Sinnen und menschlicher Intelligenz, und der mit seinen tiefsten Wurzeln in die reale, einer direkten wissenschaftlichen Prüfung unzugängliche Welt hineinreicht. Denn es wird wohl kaum jemand daran zweifeln, daß, wenn einmal unsere Erde mit allen ihren Bewohnern zugrunde ginge, die kosmischen Vorgänge ihren kausalen Gesetzen nach wie vor gehorchen würden, wenn auch kein Mensch in der Lage ist, den Sinn und die Berechtigung einer solchen Behauptung zu prüfen.

Wie dem nun aber auch sein mag: das einzige Mittel, das wir besitzen, um dem wahren Wesen der Kausalität auf die Spur zu kommen, besteht darin, daß wir von der uns nun einmal gegebenen Welt der Tatsachen, nämlich von unseren Erlebnissen, ausgehen und durch gehörige Bearbeitung und Verallgemeinerung derselben und möglichste Eliminierung aller beigemischten anthropomorphen Elemente uns allmählich an den objektiven Begriff der Kausalität heran-tasten.

Aus den zahlreichen bisher über diese Frage angestellten Untersuchungen geht hervor, daß wir uns dem Kausalitätsbegriff am sichersten nähern, wenn wir ihn in Verbindung bringen mit unserer in täglicher Erfahrung erworbenen und

erprobten Fähigkeit, zukünftige Ereignisse vorauszusagen. In der Tat gibt es für den Nachweis, daß irgend zwei Vorgänge kausal zusammenhängen, kein einwandfreieres Mittel, als zu zeigen, daß aus dem Eintreffen des einen Vorganges stets im voraus auch das Eintreffen des anderen Vorganges gefolgert werden kann. Das wußte schon jener Landwirt, der den Kausalzusammenhang zwischen Kunstdünger und Bodenfruchtbarkeit den ungläubigen Bauern schlagend ad oculos demonstrierte. Die Bauern wollten nämlich nicht glauben, daß der üppige Kleewuchs auf dem Acker des Landwirts durch den künstlichen Dünger verursacht werde, und suchten nach anderen Gründen dafür. Da ließ dieser auf seinem Acker gewisse schmale, zu Buchstaben geformte Streifen ziehen und düngte sie kräftig, während er den übrigen Boden ungedüngt ließ. Als nun im Frühjahr die Saat aufging, konnte jeder in deutlicher Kleeschrift den Satz lesen: „Dieser Streifen ist mit Gips gedüngt."

Ich will daher als Ausgangspunkt für alle weiteren Überlegungen den folgenden einfachen und allgemeinen Satz benutzen: Ein Ereignis ist dann kausal bedingt, wenn es mit Sicherheit vorausgesagt werden kann. Damit soll selbstverständlich nur gesagt sein, daß die Möglichkeit, eine zutreffende Voraussage für die Zukunft zu machen, ein untrügliches Kriterium für das Walten eines Kausalzusammenhanges bildet, nicht etwa, daß sie mit diesem gleichbedeutend sei. Denken wir nur an das bekannte Beispiel von Tag und Nacht. Man kann wohl bei Tage das Eintreffen der Nacht mit Sicherheit voraussagen und daraus den Schluß ziehen, daß die Nacht kausal bedingt ist. Aber man betrachtet deshalb doch nicht den Tag als die Ursache der Nacht. Auf der anderen Seite kommt es aber auch häufig vor, daß wir einen Kausalzusammenhang in Fällen als vorhanden annehmen, wo von der Möglichkeit einer zutreffenden Voraussage gar keine Rede ist. Denken wir nur an die Wetterprognose. Die Unzuverlässigkeit der Wetterpropheten ist sprichwörtlich geworden, und doch gibt es wohl keinen gebildeten Meteorologen, der nicht die Vorgänge in der Atmosphäre als kausal determiniert betrachtet. Wir sehen: Der gewählte Ausgangssatz besitzt nur einen provisorischen



Charakter. Um dem Wesen des Kausalbegriffs auf die rechte Spur zu kommen, müssen wir noch wesentlich tiefer schürfen.

Im Falle der Wettervorhersage liegt der Gedanke nahe, daß ihre Unzuverlässigkeit nur durch die Größe und Kompliziertheit des vorliegenden Objekts, der Atmosphäre, bedingt ist. Greifen wir einen kleinen Teil derselben heraus, etwa ein Liter Luft, so sind wir schon weit eher imstande, zutreffende Voraussagen zu machen über ihr Verhalten gegenüber äußeren Einflüssen, wie Kompression, Erwärmung, Anfeuchtung usw. Wir kennen bestimmte physikalische Gesetze, welche uns in den Stand setzen, die Resultate der entsprechenden vorgenommenen Messungen, wie Druckerhöhung, Temperatursteigerung, Kondensation usw., mehr oder weniger sicher im voraus anzugeben.

Sieht man aber nun etwas näher zu, so gelangt man bald zu einer sehr bemerkenswerten Feststellung. Selbst wenn wir die Verhältnisse noch so einfach wählen, und wenn wir noch so feine Messungsinstrumente benutzen, so wird es doch niemals gelingen, das Messungsergebnis mit absoluter Genauigkeit, d. h. in allen Dezimalstellen übereinstimmend mit der gemessenen Zahl vorauszuberechnen. Es bleibt immer ein gewisser Rest von Unsicherheit zurück, im Gegensatz zu den Berechnungen rein mathematischer Art, wie der Quadratwurzel von 2, welche auf beliebig viele Dezimalstellen genau angegeben werden kann. Und was von den mechanischen und thermischen Vorgängen gilt, trifft auf allen Gebieten der Physik zu, auch für elektrische und optische Vorgänge.

Daher sind wir nach allen vorliegenden Erfahrungen gezwungen, den folgenden Satz als eine gegebene festliegende Tatsache anzuerkennen: In keinem einzigen Fall ist es möglich, ein physikalisches Ereignis genau vorauszusagen.

Halten wir diese Tatsache zusammen mit dem vorher als Ausgangspunkt aufgestellten Satz, daß ein Ereignis dann kausal bedingt ist, wenn es mit Sicherheit vorausgesagt werden kann, so finden wir uns vor ein unbequemes, aber unausweichliches Dilemma gestellt. Entweder wir halten an dem Wortlaut des Ausgangssatzes fest, dann gibt es in der Natur keinen einzigen Fall, in welchem ein Kausalzusammenhang

behauptet werden kann, oder wir fordern von vornherein Platz für die Geltung einer strengen Kausalität, dann sind wir genötigt, den Ausgangssatz einer gewissen Modifikation zu unterwerfen.

Es gibt gegenwärtig eine Reihe von Physikern und Philosophen, welche sich für die erste Alternative entscheiden, ich will sie hier die Indeterministen nennen. Nach ihnen gibt es in der Natur überhaupt keine echte Kausalität, keine strenge Gesetzlichkeit. Dieselbe wird nur vorgetäuscht durch das Auftreten gewisser, allerdings oft mit sehr großer Annäherung, aber doch niemals genau gültiger Regeln. Grundsätzlich genommen sucht der Indeterminist bei jedem physikalischen Gesetz, auch bei der Gravitation, auch bei der elektrischen Anziehungskraft, nach einer Wurzel statistischer Art; sie sind ihm allesamt Wahrscheinlichkeitsgesetze, die sich nur auf Mittelwerte aus zahlreichen gleichartigen Beobachtungen beziehen, für einzelne Beobachtungen aber nur annähernde Gültigkeit besitzen und stets Ausnahmen zulassen.

Ein gutes Beispiel für ein derartiges statistisches Gesetz ist die Abhängigkeit des Druckes, welchen ein Gas auf die einschließende Gefäßwand ausübt, von der Gasdichte und von der Temperatur. Der Druck eines Gases wird hervorgerufen durch das fortgesetzte Anprallen der ungeheuer zahlreichen, mit großer Geschwindigkeit unregelmäßig nach allen Richtungen durcheinanderfliegenden Gasmoleküle gegen die Gefäßwandung. Die summarische Berechnung der gesamten, durch den Anprall ausgeübten Kraftwirkung ergibt als Resultat, daß der Druck auf die Gefäßwand nahezu proportional ist der Dichte des Gases sowie dem mittleren Quadrat der Molekülgeschwindigkeit, in befriedigender Übereinstimmung mit den Messungen, sofern man die Temperatur als ein Maß der Molekülgeschwindigkeit ansieht.

Eine direkte Bestätigung dieser Theorie liefert die Untersuchung der zeitlichen Schwankungen des Druckes, die dann auftreten, wenn man den Druck auf einen sehr kleinen Teil der Gefäßwandung betrachtet. Wenn wir nämlich einen sehr kleinen Teil der Wandfläche ins Auge fassen, etwa den billionsten Teil eines Quadratmillimeters, so kann lange Zeit vergehen, bis einmal ein Molekül gerade auf dieses Flächenstück trifft. Vielleicht treffen aber auch einmal zwei oder sogar drei Moleküle bald hintereinander auf, wie es der Zufall fügt. Unter diesen Umständen ist natürlich von einem konstanten, gleichmäßigen Gasdruck keine Rede, sondern der Druck erleidet unregelmäßige Schwankungen. Das einfache Druckgesetz gilt nur für große Flächen der Wand, auf die sehr viele Moleküle stoßen, weil da die Unregelmäßigkeiten sich ausgleichen.



Solche durch unregelmäßige Molekülstöße bewirkte Schwankungserscheinungen werden überall beobachtet, wo schnell bewegte Moleküle mit leicht beweglichen Körpern in Berührung kommen, sie äußern sich auch in den zuerst von Brown beschriebenen und nach ihm benannten zitternden Bewegungen feiner, in einer Flüssigkeit suspendierter Pulverkörner, die von den Flüssigkeitsmolekülen hin und her gestoßen werden, sowie auch in der Tatsache, daß eine sehr empfindliche Waage niemals vollständig zur Ruhe kommt, sondern unaufhörlich kleine unregelmäßige Schwankungen um ihre Gleichgewichtslage ausführt.

Ein weiteres Beispiel für statistische Gesetzlichkeit liefern die Erscheinungen der Radioaktivität. Eine radioaktive Substanz emittiert infolge des spontanen Zerfalls ihrer Atome fortwährend eine Menge positiv oder negativ geladener Teilchen. Für größere Zeiträume kann man von einer gleichmäßigen Emission sprechen. Aber in kleineren Zeiträumen, d. h. in solchen, welche die mittlere Zwischenzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Emissionen nicht erheblich übersteigen, besteht völlige Unregelmäßigkeit.

In gleicher Weise wie die Gasgesetze und die radioaktiven Gesetze führen die Indeterministen jede andere Art von physikalischer Gesetzlichkeit in letzter Linie auf den Zufall zurück. Für sie herrscht in der Natur ausschließlich die Statistik, und ihr Ziel ist, die Physik auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung aufzubauen.

Tatsächlich hat sich die physikalische Wissenschaft bis jetzt auf der entgegengesetzten Grundlage entwickelt. Sie hat die zweite der beiden genannten Alternativen gewählt, d. h. sie hat, um das Kausalgesetz in aller Strenge aufrechterhalten zu können, den Ausgangspunkt, daß ein Ereignis

dann kausal bedingt ist, wenn es mit Sicherheit vorausgesagt werden kann, etwas modifiziert. Das geschieht in der Weise, daß das Wort „Ereignis" in einem etwas geänderten Sinne gebraucht wird. Als Ereignis betrachtet nämlich die theoretische Physik nicht einen einzelnen Messungsvorgang, der immer auch zufällige und unwesentliche Elemente enthält, sondern einen gewissen, nur gedachten Vorgang, indem sie an die Stelle der Sinnenwelt, wie sie uns durch unsere Sinnesorgane bzw. durch die wie verschärfte Sinnesorgane wirkenden Meßinstrumente unmittelbar gegeben wird, eine andere Welt setzt: das sogenannte „physikalische Weltbild", welches eine bis zu einem gewissen Grade willkürliche Gedankenkonstruktion darstellt, eine modellmäßige Idealisierung, geschaffen zu dem Zweck, um von der Unsicherheit, die an jeder einzelnen Messung haftet, loszukommen und scharfe Begriffsbestimmungen zu ermöglichen.

Demzufolge besitzt in der Physik jede meßbare Größe, jede Länge, jedes Zeitintervall, jede Masse, jede Ladung eine zweifache Bedeutung, je nachdem man sie als durch irgendeine Messung unmittelbar gegeben betrachtet oder aber sie auf das Modell, welches wir das physikalische Weltbild nennen, übertragen denkt. In der ersten Bedeutung ist sie stets nur unscharf zu definieren und daher niemals durch eine ganz bestimmte Zahl darstellbar, im physikalischen Weltbild aber bedeutet sie ein bestimmtes mathematisches Symbol, mit dem nach genauen Vorschriften operiert werden kann. Wenn wir in der Physik von der Höhe eines Turmes reden und zu ihrer Berechnung eine trigonometrische Gleichung benutzen, so meinen wir etwas ganz Bestimmtes, eine wohldefinierte Größe. Die wirkliche Messung der Höhe gibt uns aber gar keine bestimmte Größe. Also ist die genau zu berechnende ideale Höhe immer etwas anderes als die gemessene Höhe. Genau dasselbe gilt für die Schwingungsdauer eines Pendels oder für die Helligkeit einer Glühlampe. Ebenso ist jede universelle Konstante, zum Beispiel die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum, oder die Ladung eines Elektrons, im physikalischen Weltbilde etwas anderes als bei irgendeiner wirklichen Messung. In der ersten Bedeutung ist sie absolut scharf, in der zweiten aber ist sie nur unscharf definiert. Die



deutliche und konsequente Unterscheidung zwischen den Größen der Sinnenwelt und den gleichbenannten Größen des Weltbildes ist für die Klärung der Begriffe durchaus unerläßlich. Ohne sie wird man bei der Diskussion über diese Fragen stets aneinander vorbeireden.

Es ist daher keineswegs so, wie man manchmal äußern hört, daß das physikalische Weltbild nur direkt beobachtbare Größen enthalte oder enthalten dürfe. Im Gegenteil: direkt beobachtbare Größen kommen im Weltbild überhaupt nicht vor, sondern nur Symbole. Ja, das Weltbild enthält sogar stets Bestandteile, die für die Sinnenwelt nur sehr indirekte oder auch gar keine Bedeutung haben, wie Ätherwellen, Partialschwingungen, Bezugssysteme usw. Solche Bestandteile wirken zunächst als Ballast, aber sie werden in Kauf genommen wegen des entscheidenden Vorteils, welchen die Einführung des Weltbildes bietet und welcher eben darin besteht, daß dasselbe die Durchführung eines strengen Determinismus ermöglicht.

Freilich bleibt das Weltbild immer nur ein Hilfsbegriff. In letzter Linie kommt es selbstverständlich auf die Ereignisse in der Sinnenwelt und auf deren möglichst angenäherte Vorausberechnung an. Diese vollzieht sich in der klassischen Theorie folgendermaßen: Zunächst wird das der Sinnenwelt entnommene Objekt, etwa ein System materieller Körper, in irgendeinem gemessenen Zustand symbolisiert, d. h. auf das Weltbild übertragen. So erhält man ein bestimmtes physikalisches Gebilde in einem bestimmten Anfangszustande. Ebenso werden die Einwirkungen, die das Objekt im Laufe der folgenden Zeit von außen her erfährt, durch entsprechende Symbole im Rahmen des Weltbildes ersetzt. Das liefert die auf das Gebilde wirkenden äußeren Kräfte bzw. die Randbedingungen. Durch diese Daten ist dann das Verhalten des Gebildes für alle Zeiten kausal bestimmt und kann aus den Differentialgleichungen der Theorie mit absoluter Genauigkeit berechnet werden. So ergeben sich die Koordinaten und die Geschwindigkeiten aller materiellen Punkte des Gebildes als ganz bestimmte Funktionen der Zeit. Wenn wir nun zu irgendeiner späteren Zeit die für das Weltbild benutzten Symbole wieder zurückübersetzen in die Sinnenwelt, so hat

man als Resultat eine Verknüpfung eines späteren Ereignisses der Sinnenwelt mit einem früheren Ereignis der Sinnenwelt gewonnen, und kann dasselbe zur annähernden Voraussage des späteren Ereignisses verwerten.

Zusammenfassend können wir sagen: Während in der Sinnenwelt die Voraussage eines Ereignisses immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist, verlaufen im physikalischen Weltbilde alle Ereignisse nach bestimmten angebbaren Gesetzen, sie sind kausal streng determiniert. Daher wird durch die Einführung des physikalischen Weltbildes — und darin liegt seine Bedeutung — die Unsicherheit in der Voraussage eines Ereignisses der Sinnenwelt reduziert auf die Unsicherheit der Übertragung des Ereignisses aus der Sinnenwelt auf das Weltbild, sowie der Rückübersetzung aus dem Weltbilde in die Sinnenwelt.

Die klassische Theorie hat sich um diese Unsicherheit wenig gekümmert. Sie hat ihr Hauptaugenmerk auf die Durchführung der kausalen Betrachtungsweise der Vorgänge im Weltbilde gerichtet und hat dabei ihre großen Erfolge erzielt. Insbesondere ist es ihr auch gelungen, für die oben besprochenen unregelmäßigen Schwankungsvorgänge, welche dem Druck eines Gases oder der Brownschen Molekularbewegung entsprechen, eine befriedigende Deutung auf Grund der Annahme einer strengen Kausalität zu finden. Für die Indeterministen lag hier kein eigentliches Problem vor. Denn da diese hinter jeder Regel die Regellosigkeit suchen, so ist die statistische Gesetzlichkeit für sie das unmittelbar Befriedigende. Daher begnügen sie sich auch mit der Annahme, daß der Zusammenstoß zweier einzelner Moleküle ebenso wie der Anprall eines Moleküls auf die Gefäßwand lediglich nach statistischen Gesetzen erfolgt. Indessen liegt für diese Annahme ebensowenig ein triftiger Grund vor, als man etwa aus der Tatsache, daß in einem Leiter die Elektronen sich an der Oberfläche sammeln, den Schluß ziehen darf, daß auch die Ladung eines einzelnen Elektrons an dessen Oberfläche sitzt. Dagegen wurden die Deterministen, welche umgekehrt hinter jeder Regellosigkeit die Regel suchen, auf die Aufgabe geführt, eine Theorie der Gasgesetze auf die Voraussetzung aufzubauen, daß der Zusammenstoß zweier einzelner Moleküle streng kausal bedingt ist. Die Lösung dieser Aufgabe bildet das Lebenswerk des großen Physikers Ludwig Boltzmann, sie stellt einen der schönsten Triumphe der theoretischen Forschung dar. Denn sie führt nicht nur zu dem durch die Messungen bestätigten Satz, daß die mittlere Energie der Schwankungen um die Gleichgewichtslage proportional ist der absoluten Temperatur, sondern sie gestattet auch, aus der Messung dieser Schwankungen, zum Beispiel bei einer hochempfindlichen Drehwaage, die absolute Zahl und Masse der stoßenden Moleküle mit bemerkenswerter Genauigkeit zu berechnen.



Nach solchen und anderen großen Erfolgen schien begründete Hoffnung vorhanden, daß das Weltbild der klassischen Physik seiner Aufgabe im wesentlichen gerecht werde, und daß die Unsicherheiten, die bei der Übersetzung in die Sinnenwelt und aus der Sinnenwelt übrigbleiben, bei fortschreitender Verfeinerung der Messungsmethoden immer mehr an Bedeutung verlieren würden. Diese Hoffnung ist durch das Auftreten des elementaren Wirkungsquantums mit einem Schlage, und zwar für immer, vernichtet worden.

Da die Quantentheorie ursprünglich von der Licht- und Wärmestrahlung ausgegangen ist, so sei hier zunächst an die Strahlungsvorgänge angeknüpft. Es ist durch zahlreiche Tatsachen als festgestellt zu betrachten, daß in einem Lichtstrahl von bestimmter Farbe die Energie sich nicht in einem gleichmäßigen kontinuierlichen Strom fortpflanzt, sondern in einzelnen Teilchen, den sogenannten Photonen, deren Größe nur von der Farbe des Lichts abhängt, und die von der Strahlungsquelle nach allen Richtungen mit Lichtgeschwindigkeit auseinanderfliegen, ganz im Sinne der früheren Newtonschen Emanationstheorie des Lichts. Bei starker Lichtintensität folgen sich die Photonen so dicht hintereinander, daß sie praktisch wie ein kontinuierlicher gleichmäßiger Strom wirken; wenn aber, mit wachsender Entfernung von der Lichtquelle, die Strahlungsdichte schwächer und schwächer wird, so lösen sich die Photonen voneinander, ähnlich wie ein Wasserstrahl, der immer dünner wird, sich schließlich in einzelne Tropfen von bestimmter

Größe auflöst. Das Charakteristische hierbei ist, daß bei dieser allmählichen Schwächung der Strahlenenergie die Photonen oder Energietropfen nicht etwa fortwährend kleiner werden, sondern daß sie bei gleichbleibender Größe immer seltener aufeinanderfolgen.

Es ist nun leicht zu sehen, daß die Anwendung der kausalen Betrachtungsweise auf solche Vorgänge zu einer ernsten Schwierigkeit führt. Nehmen wir zum Beispiel einen Lichtstrahl von bestimmter Farbe, der in einer bestimmten Richtung auf eine gut geschliffene ebene Glasplatte fällt. Ein Teil des Lichts wird reflektiert, ein anderer Teil, sagen wir dreimal soviel, wird durchgelassen. Dies Verhältnis gilt erfahrungsgemäß ganz unabhängig von der Intensität des Lichts, also von der Zahl der auftreffenden Photonen. Wenn nun sehr viele Photonen, etwa eine Million, auf die Platte treffen, ist es nicht schwer, die Zahl der reflektierten und die der durchgelassenen Photonen anzugeben: $^1/_4$ Million wird reflektiert, $^3/_4$ Million wird durchgelassen. Wenn aber, in einem sehr dünnen Lichtstrahl, ein einzelnes Photon die Platte trifft, so wird es durch die Frage, ob es sich reflektieren lassen oder ob es durchgehen soll, zum mindesten in eine arge Verlegenheit gebracht. Denn eine Vierteilung, an die es am liebsten denken möchte, ist ausgeschlossen.

Es kommt aber noch viel schlimmer. Wenn man sich im vorhergehenden Beispiel noch vielleicht mit der Annahme helfen könnte, daß bei der schwebenden Ungewißheit doch vielleicht ein uns allerdings bisher gänzlich unbekannter Umstand mitspielen könnte, welcher die Entscheidung des Photons in bestimmtem Sinne beeinflußt, so erscheint der folgende Fall gänzlich hoffnungslos. Es ist Tatsache, daß bestimmte Farben vorzugsweise reflektiert, andere Farben vorzugsweise durchgelassen werden. Denn wenn weißes Licht auffällt, so erscheint die Glasplatte sowohl im reflektierten als auch im durchgelassenen Licht farbig. Das wird in der klassischen Wellentheorie des Lichts vollständig befriedigend dadurch erklärt, daß das an der Vorderseite der Platte reflektierte Licht mit dem an der Rückseite der Platte reflektierten Licht interferiert, daß heißt daß diese beiden reflektierten Strahlen sich gegenseitig verstärken oder schwächen,



je nachdem ein Wellenberg des einen Strahles mit einem Wellenberg oder mit einem Wellental des anderen Strahles zusammentrifft. Da nun die Wellenlänge für verschiedene Farben verschieden ist, so ergeben sich für verschiedene Farben Unterschiede, und die so berechneten Unterschiede stimmen genau mit den Messungen überein. Auch dieses Phänomen wird bei den schwächsten Lichtintensitäten beobachtet.

Was geschieht nun, wenn ein einzelnes Photon auf die Platte trifft? Das Photon muß mit sich selbst interferieren; denn sonst könnte seine Wellenlänge keinen Einfluß ausüben. Dazu müßte es sich teilen, was aber unmöglich ist. Man sieht das Unhaltbare der ganzen Betrachtungsweise.

Mit der Mechanik steht es in der Quantentheorie nicht anders als mit der Optik. Denn auch die kleinsten Massenpunkte, die Elektronen, verhalten sich wie die Photonen, sie interferieren mit sich selber. Ein Elektron mit bestimmter Geschwindigkeit entspricht nämlich in dieser Beziehung genau einem Photon von bestimmter Farbe, es wird von einer Kristallplatte, auf die es in bestimmter Richtung auftrifft, je nach seiner Geschwindigkeit vorzugsweise reflektiert oder vorzugsweise durchgelassen, und die vollständige Erklärung hierfür in allen Einzelheiten ergibt sich aus der Berücksichtigung der seiner Energie entsprechenden Wellenlänge. Daher stellt die Frage, welche Bahn das Elektron beim Auftreffen auf die Platte in Wirklichkeit einschlägt, ebenso wie beim Photon, nicht nur ein ungelöstes, sondern ein unlösliches Problem vor.

Die grundsätzliche Schwierigkeit, den Ort eines mit bestimmter Geschwindigkeit sich bewegenden Elektrons zu bestimmen, findet ihren allgemeinen Ausdruck in der für die Quantenphysik charakteristischen, von Werner Heisenberg formulierten sogenannten Unsicherheitsrelation, welche unter anderem besagt, daß, je genauer man die räumliche Lage eines Elektrons mißt, desto ungenauer die Messung der Geschwindigkeit ausfällt, und umgekehrt. Das kann man sich folgendermaßen klarmachen. Wir können die Lage eines fliegenden Elektrons nur messen, wenn wir das Elektron sehen, und damit wir es sehen, müssen wir es beleuchten, das heißt, wir müssen Licht darauf fallen lassen. Die auffallenden

Lichtstrahlen erteilen aber dem Elektron einen Stoß und verändern dadurch seine Geschwindigkeit in unkontrollierbarer Weise. Je schärfer der Ort des Elektrons bestimmt werden soll, um so kürzere Lichtwellen müssen wir zur Beleuchtung benutzen, und um so stärker wird der Stoß und mit ihm die Unsicherheit der Geschwindigkeitsbestimmung.

Es versteht sich, daß es nach dieser Feststellung prinzipiell unmöglich ist, die gleichzeitigen Werte der Koordinaten und der Geschwindigkeiten materieller Punkte, wie sie im Mittelpunkt des Weltbildes der klassischen Physik stehen, mit beliebiger Genauigkeit in die Sinnenwelt zu übertragen, und damit erwächst der Durchführung einer strengen Kausalität eine Schwierigkeit, welche einige Indeterministen schon dazu geführt hat, das Kausalgesetz in der Physik als endgültig widerlegt zu bezeichnen. Indessen erweist sich bei näherer Betrachtung diese Schlußfolgerung, welche auf einer Verwechslung des Weltbildes mit der Sinnenwelt beruht, denn doch zum mindesten als voreilig. Denn viel näher liegt ein anderer Ausweg aus der Schwierigkeit, ein Ausweg, der in ähnlichen Fällen schon oft vortreffliche Dienste geleistet hat und der in der Annahme besteht, daß die Frage nach den gleichzeitigen Werten der Koordinaten und der Geschwindigkeiten eines materiellen Punktes, ebenso wie die nach der Bahn eines Photons von bestimmter Farbe, gar keinen physikalischen Sinn hat. Die Unmöglichkeit, auf eine sinnlose Frage eine Antwort zu erteilen, darf aber natürlich nicht dem Kausalgesetz als solchem zur Last gelegt werden, sondern nur den Voraussetzungen, die zur Aufstellung dieser Frage geführt haben, also im vorliegenden Fall der vorausgesetzten Struktur des physikalischen Weltbildes. Und da das klassische Weltbild versagt hat, ist es durch ein anderes zu ersetzen.

Das ist nun in der Tat geschehen. Das neue Weltbild der Quantenphysik ist gerade dem Bedürfnis entsprungen, die Durchführung eines strengen Determinismus auch mit dem Wirkungsquantum zu ermöglichen. Zu diesem Zweck mußte der bisherige Urbestandteil des Weltbildes: der materielle Punkt, seines elementaren Charakters entkleidet werden, er ist aufgelöst worden in ein System von Materiewellen. Diese Materiewellen bilden die Elemente des neuen Weltbildes.



Das Weltbild der Quantenphysik steht zu dem der klassischen Physik ungefähr in demselben Verhältnis wie die Huygenssche Wellenoptik zur Newtonschen korpuskularen oder Strahlenoptik. Wie letztere für viele Fälle ausreicht, für andere aber versagt, so erscheint die klassische oder korpuskulare Mechanik nur mehr als ein Spezialfall der allgemeineren Wellenmechanik. An die Stelle des klassischen materiellen Punktes tritt ein unendlich schmales Wellenpaket, das heißt ein System von zahlreichen Wellen, die so miteinander interferieren, daß sie sich überall im Raum gegenseitig vernichten, mit alleiniger Ausnahme des Ortes wo sich der materielle Punkt befindet.

Selbstverständlich sind die Gesetze der Wellenmechanik grundverschieden von denen der klassischen Mechanik materieller Punkte, wesentlich ist aber der Umstand, daß die für die Materiewellen charakteristische Größe, die Wellenfunktion, durch die Anfangsbedingungen und die Randbedingungen für alle Orte und Zeiten vollständig determiniert ist, nach ganz bestimmten Rechnungsregeln, sei es, daß man sich dabei der Schrödingerschen Operatoren, oder der Heisenbergschen Matrizen, oder der Diracschen q-Zahlen bedient.

So löst sich mit der Einführung der Wellenfunktion auch die oben berührte Schwierigkeit der Frage, wie sich ein einzelnes Elektron beim Auftreffen auf eine Kristallplatte verhält, ob es nämlich reflektiert wird oder ob es in die Platte eindringt. Das auftreffende Elektron vermag sich nicht zu teilen, wohl aber vermag sich jede der an seine Stelle gesetzten auffallenden Wellen zu teilen, und so ergibt sich die Möglichkeit einer Interferenz der an der Vorderseite und der an der Rückseite der Platte reflektierten Wellen, die früher ganz unverständlich war, jetzt aber nach ganz bestimmten genau angebbaren Gesetzen erfolgt.

Wir sehen: In dem Weltbilde der Quantenphysik herrscht der Determinismus ebenso streng wie in dem der klassischen Physik, nur sind die benutzten Symbole andere, und es wird mit anderen Rechnungsvorschriften operiert. Dementsprechend wird in der Quantenphysik, ebenso wie früher in der klassischen Physik, die Unsicherheit in der Voraussage von

Ereignissen der Sinnenwelt reduziert auf die Unsicherheit des Zusammenhangs zwischen Weltbild und Sinnenwelt, das heißt auf die Unsicherheit der Übertragung der Symbole des Weltbildes auf die Sinnenwelt, und umgekehrt. Daß diese doppelte Unsicherheit mit in Kauf genommen wird, ist der eindrucksvollste Beweis für die Wichtigkeit der Aufgabe, den Determinismus zunächst einmal innerhalb des Weltbildes aufrechtzuerhalten.

Allerdings muß dem kritischen Beurteiler der so für die Rettung der strengen Kausalität bezahlte Preis doch recht bedenklich hoch erscheinen. Denn schon eine flüchtige Betrachtung zeigt, wie weit in der Quantenphysik das Weltbild sich von der Sinnenwelt entfernt hat und wieviel schwieriger es in der Quantenphysik ist, ein Ereignis aus dem Weltbild in die Sinnenwelt zu übersetzen oder umgekehrt, als es früher in der klassischen Physik der Fall war. Dort war die Bedeutung jedes Symbols ohne weiteres verständlich: Die Lage, die Geschwindigkeit, die Energie eines materiellen Punktes ließ sich mehr oder weniger direkt durch Messungen bestimmen, und es war kein Grund ersichtlich, weshalb man nicht annehmen sollte, daß die zurückbleibende Unsicherheit sich durch fortschreitende Verfeinerung der Messungsmethoden unter jede beliebige Grenze werde herabdrücken lassen. Im Gegensatz dazu bietet die Wellenfunktion der Quantenmechanik zunächst überhaupt keinen Anhalt für eine unmittelbare Deutung für die Sinnenwelt. Der Name „Welle", so anschaulich und passend er gewählt ist, darf uns nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Bedeutung dieses Wortes in der Quantenphysik eine ganz andere ist als früher in der klassischen Physik. Dort bezeichnet eine Welle einen bestimmten physikalischen Vorgang, eine sinnlich wahrnehmbare Bewegung oder ein der direkten Messung zugängliches elektrisches Wechselfeld. Hier bezeichnet sie nur gewissermaßen die Wahrscheinlichkeit für das Bestehen eines gewissen Zustandes. Denn was sich beim Auftreffen eines Photons oder eines Elektrons auf eine Kristallplatte teilt, um die Interferenzerscheinungen hervorzubringen, ist ja nicht das Photon oder das Elektron selbst, sondern ist nur die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein des unteilbaren Photons



oder Elektrons. Nur wenn ungeheuer viele Photonen oder Elektronen auftreffen, stellt diese Größe eine ganz bestimmte Anzahl Photonen oder Elektronen dar.

Solche Überlegungen haben die Indeterministen zu einem erneuten Angriff auf das Kausalgesetz veranlaßt. Und diesmal scheint der Angriff in der Tat einen positiven Erfolg zu versprechen; denn aus allen Messungen kann man für die Wellenfunktion immer nur eine statistische Bedeutung herleiten. Indessen auch diesmal wieder bietet sich für die Verfechter einer strengen Kausalität derselbe rettende Ausweg wie früher, nämlich die Annahme, daß die Frage nach der Bedeutung eines bestimmten Symbols des quantenphysikalischen Weltbildes, zum Beispiel einer Materiewelle, gar keinen bestimmten Sinn hat, solange nicht zugleich auch angegeben wird, wie man diese Bedeutung feststellen will, in welchem Zustande sich also das spezielle Meßgerät befindet, das man verwendet, um das Symbol auf die Sinnenwelt zu übertragen. Man spricht daher auch von einer kausalen Wirkung des benutzten Meßgeräts und will damit zum Ausdruck bringen, daß die vorliegende Unbestimmtheit wenigstens zu einem Teil dadurch bedingt ist, daß der Betrag der zu messenden Größe in gewisser gesetzmäßiger Weise von der Art ihrer Messung abhängt.

In der Tat bringt ja jede Messung, nach welcher Methode sie auch erfolgen möge, stets eine kleinere oder größere Störung des zu messenden Vorgangs mit sich, wie wir das schon an dem früher beschriebenen Beispiel mit dem fliegenden Elektron gesehen haben, dessen Bahn durch die für die Messung unentbehrliche Beleuchtung um so empfindlicher gestört wird, je schärfer diese ist. Wenn also eine bestimmte Materiewelle das eine Mal diesem, das andere Mal jenem Vorgang der Sinnenwelt entspricht, so hängt das damit zusammen, daß die Frage nach der sinnlichen Bedeutung der Materiewelle nicht durch die Betrachtung der Materiewelle allein, sondern nur durch eine Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Materiewelle und Meßgerät zu beantworten ist.

Mit dieser Hilfsannahme ist nun allerdings die ganze Frage auf ein Gleis geschoben, dessen weiterer Verlauf zunächst

im Dunkeln liegt. Denn jetzt können die Indeterministen mit Recht die Frage aufwerfen, ob denn die Vorstellung von einem kausalen Einfluß des Meßgeräts auf den zu messenden Vorgang überhaupt einen vernünftigen Sinn hat, da wir doch den Vorgang nur dadurch kennen, daß wir ihn messen, und da mit jeder neuen Messung ein neuer kausaler Eingriff, also eine neue Störung des Vorgangs, bewirkt wird. Es muß daher überhaupt unmöglich erscheinen, den „Vorgang an sich" prinzipiell zu trennen von dem Apparat, mit dem er gemessen wird.

Und doch ist mit diesem Einwand die Sache noch nicht abgetan. Denn es gibt, wie jeder Experimentalphysiker weiß, außer den direkten auch noch indirekte Prüfungsmethoden, und in vielen Fällen haben, wo die ersteren versagten, die letzteren gute Dienste geleistet. Vor allem aber muß ich mich gegen die gegenwärtig weit verbreitete, allerdings sehr plausibel klingende Meinung wenden, daß eine physikalische Frage erst dann geprüft zu werden verdient, wenn von vornherein feststeht, daß sie eine bestimmte Antwort zuläßt. Hätten die Physiker diese Vorschrift stets befolgt, so wäre das berühmte Experiment von Michelson und Morley zur Messung der sogenannten absoluten Geschwindigkeit der Erde niemals angestellt worden, und wir wären vielleicht auch heute noch nicht im Besitz der Relativitätstheorie. Wenn nun schon die Beschäftigung mit einer jetzt ziemlich allgemein als sinnlos erkannten Frage, wie der nach der absoluten Erdgeschwindigkeit, sich überaus fruchtbar für die Wissenschaft gezeigt hat, um wieviel mehr muß es sich lohnen, dem Problem der Durchführung einer strengen Kausalität weiter nachzugehen, über dessen tiefere Bedeutung die Akten noch keineswegs abgeschlossen sind und das, wie kein anderes, die Forschung zu befruchten vermag.

Auf welchem Wege aber soll man eine Entscheidung gewinnen? Offenbar bleibt nichts anderes übrig, als daß man von den beiden einander gegenüberstehenden Standpunkten zunächst nach freier Wahl einen bestimmten sich zu eigen macht und nun untersucht, ob man, von ihm ausgehend, zu wertvollen oder zu unbrauchbaren Folgerungen gelangt. Insofern ist es nur zu begrüßen, daß die Physiker, welche diesem



Gegenstand ein näheres Interesse zuwenden, sich in zwei Lager spalten, von denen das eine dem Determinismus, das andere dem Indeterminismus zuneigt. So weit ich sehe, sind die letzteren gegenwärtig in der Mehrzahl; indessen ist das schwierig festzustellen und kann sich auch im Laufe der Zeit leicht ändern. Dazwischen ist wohl auch noch Raum für eine dritte Partei, welche in gewissem Sinne eine vermittelnde Stellung einnimmt, indem sie gewissen Begriffen, wie der elektrischen Anziehungskraft oder der Gravitation, eine unmittelbare Bedeutung und eine strenge Gesetzlichkeit, dagegen anderen Begriffen, wie der Lichtwelle oder der Materiewelle, nur eine statistische Bedeutung für die Sinnenwelt zuschreibt. Doch wird diese Auffassung wegen ihres Mangels an Einheitlichkeit von vornherein wohl wenig befriedigend erscheinen. Daher möchte ich jetzt von ihr absehen und nur die beiden völlig konsequenten Standpunkte noch ein wenig erläutern.

Der Indeterminist fühlt sich durch die Feststellung, daß die Wellenfunktion der Quantenphysik lediglich eine Wahrscheinlichkeitsgröße ist, in seinem Erkenntnistrieb befriedigt, er hat daran keine weitere Frage zu knüpfen. Auch bei den radioaktiven Vorgängen begnügt er sich mit der Feststellung, daß zum Beispiel von irgendeiner Radiumverbindung pro Sekunde durchschnittlich eine bestimmte Anzahl Atome zerfallen, er fragt aber nicht danach, warum ein Atom gerade jetzt zerfällt und ein unmittelbar benachbartes vielleicht tausend Jahre später. Dagegen erscheint ihm ein bestimmtes Naturgesetz, wie das Coulombsche Gesetz der elektrischen Anziehung, als ein ungelöstes Problem; denn er kann sich mit dem Coulombschen Ausdruck des Potentials nicht begnügen, sondern er muß nach Ausnahmen suchen und darf sich erst dann zufrieden geben, wenn es ihm gelungen ist, die Größe der Wahrscheinlichkeit festzustellen, die dafür besteht, daß die elektrische Kraft von dem Coulombschen Wert um einen beliebig vorgegebenen Betrag abweicht.

Der Determinist denkt in allen diesen Punkten gerade umgekehrt. Dem Coulombschen Gesetz der elektrischen Anziehung spricht er den befriedigenden Charakter vollkommener Endgültigkeit zu, dagegen erkennt er die Wellen-

funktion nur so lange als Wahrscheinlichkeitsgröße an, als von dem speziellen Apparat abgesehen wird, durch welchen die Welle erzeugt bzw. analysiert wird, und er sucht nach strengen gesetzlichen Beziehungen zwischen den Eigenschaften der Wellenfunktion und den Vorgängen in den mit der Welle in Wechselwirkung stehenden Körpern. Zu diesem Zweck muß er selbstverständlich zunächst einmal alle diese Körper ebenso wie die Wellenfunktion zum Objekt der Forschung machen, er muß also nicht nur die gesamte Versuchsanordnung, welche zur Erzeugung der Materiewellen dient, etwa die Hochspannungsbatterie, den Glühdraht, das radioaktive Präparat, sondern auch das Meßgerät, etwa die photographische Platte, die Ionisierungskammer, den Spitzenzähler, samt den sich darin abspielenden Vorgängen mit in sein physikalisches Weltbild übertragen und muß alle diese Objekte zusammen als ein einziges Gebiet, als eine abgeschlossene Ganzheit behandeln.

Nicht als ob damit nun das Problem erledigt wäre. Es ist im Gegenteil zunächst noch verwickelter geworden. Denn da das gesamte Gebilde weder zerschnitten noch auch äußeren Eingriffen ausgesetzt werden darf, wenn seine Eigenart nicht verlorengehen soll, so ist eine direkte Prüfung überhaupt nicht möglich. Wohl aber wird es jetzt möglich sein, gewisse neuartige Hypothesen in bezug auf die inneren Vorgänge aufzustellen und deren Folgerungen hinterher zu prüfen. Ob auf diesem Wege wirklich weiterzukommen ist, kann nur die Zukunft lehren; vorläufig ist noch nicht deutlich zu sehen, nach welcher Richtung ein Fortschritt sich vollziehen wird. So viel darf allerdings nach dem Gesagten als festgestellt gelten, daß durch das elementare Wirkungsquantum eine objektive Schranke gezogen ist, über welche die Leistungsfähigkeit der uns zur Verfügung stehenden physikalischen Meßgeräte nicht hinausreicht, und welche uns für alle Zeiten hindern wird, die feinsten physikalischen Vorgänge „an sich", d. h. unabhängig von ihrem Ursprung und von ihren Auswirkungen, kausal vollständig zu verstehen.

Hiermit wären wir nun eigentlich am Ende unserer Überlegungen, die uns gezeigt haben, daß die Durchführung einer



streng kausalen Betrachtungsweise — das Wort „kausal" immer in dem oben erläuterten modifizierten Sinne genommen — auch vom Standpunkt der modernen Physik aus keineswegs ausgeschlossen ist, wenn sich auch ihre Notwendigkeit weder von vornherein noch hinterher beweisen läßt. Indessen drängt sich hier auch für den überzeugten Deterministen, und gerade für diesen, ein Bedenken auf, das ihn hindert, die hier eingeführte Deutung der Kausalität als völlig befriedigend anzusehen. Denn selbst wenn es gelingen sollte, den Kausalbegriff auf dem beschriebenen Wege noch weiter zu entwickeln, so haftet ihm doch in seiner hier benutzten Fassung ein grundsätzlicher schwerwiegender Mangel an. Wir haben nämlich die Durchführung der deterministischen Betrachtungsweise nur dadurch erzwingen können, daß wir an die Stelle der unmittelbar gegebenen Sinnenwelt das physikalische Weltbild setzten, also eine Schöpfung menschlicher Einbildungskraft von provisorischem und wandelbarem Charakter. Das ist ein Notbehelf, welcher schlecht zu einem fundamentalen physikalischen Begriff paßt, und es erhebt sich die Frage, ob es nicht einen Weg gibt, dem Kausalbegriff dadurch eine direktere und tiefere Bedeutung zu verleihen, daß man ihn unabhängig macht von der Einführung eines menschlichen Kunstproduktes, und ihn nicht auf das physikalische Weltbild, sondern unmittelbar auf die Erlebnisse der Sinnenwelt bezieht. Freilich an unserem Ausgangssatz, daß ein Ereignis dann kausal bedingt ist, wenn es mit Sicherheit vorausgesagt werden kann, werden wir festhalten müssen, denn sonst würden wir unserem Grundsatz, von tatsächlichen Erlebnissen auszugehen, untreu werden. Aber auch den zweiten Satz, daß es in keinem einzigen Falle möglich ist, ein Ereignis genau vorauszusagen, müssen wir als gegebene Tatsache anerkennen. Daraus folgt dann, ebenso wie früher, daß wir, um überhaupt von Kausalität in der Natur reden zu können, an dem ersten Satz irgendeine Modifikation anbringen müssen. Insofern bleibt also alles wie bisher. Aber die Art der Modifikation, die wir oben vornahmen, kann durch eine gänzlich andere, in gewissem Sinne gerade entgegengesetzte, ersetzt werden.

Was wir dort modifizierten, war das Objekt der Voraus-

sage: das Ereignis. Wir bezogen nämlich die Ereignisse nicht auf die unmittelbar gegebene Sinnenwelt, sondern auf das künstlich fingierte Weltbild, und gewannen dadurch die Möglichkeit, Ereignisse genau zu determinieren. Statt des Objekts können wir aber auch das Subjekt der Voraussage modifizieren: den voraussagenden Geist. Denn zu jeder Voraussage gehört jemand, der die Voraussage macht. Wir wollen also im folgenden unsere Aufmerksamkeit lediglich auf das voraussagende Subjekt richten, während wir als Objekt der Voraussage stets die unmittelbar gegebenen Ereignisse der Sinnenwelt betrachten, ohne die Einführung eines künstlichen Weltbildes vorzunehmen.

Zunächst ist leicht zu sehen, daß die Sicherheit der Voraussage in hohem Maße von der Individualität des Voraussagenden abhängig ist. Um wieder an die Wetterprognose anzuknüpfen, so macht es einen großen Unterschied, ob etwa das morgige Wetter prophezeit wird von einem Unkundigen, der nichts von dem heute herrschenden Luftdruck, der Windrichtung, der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit weiß, oder etwa von einem praktischen Landwirt, der alle diese Daten beachtet und außerdem über eine reiche Erfahrung verfügt, oder endlich von einem wissenschaftlich geschulten Meteorologen, dem außer den lokalen Daten zahlreiche Wetterkarten von nah und fern mit genauen Aufzeichnungen zu Gebote stehen. Mit jedem der in dieser Reihe aufeinanderfolgenden Propheten wird die Unsicherheit der Voraussage immer mehr verringert. Da ist es jedenfalls ein naheliegender Gedanke, anzunehmen, daß ein idealer Geist, der sämtliche physikalischen Vorgänge des heutigen Tages allerorten bis ins kleinste durchschaut, imstande sein könnte, das morgige Wetter in allen Einzelheiten mit voller Sicherheit vorauszusagen, und das Entsprechende gilt für jede andere Voraussage physikalischer Ereignisse.

Eine solche Annahme bedeutet eine Extrapolation, eine Verallgemeinerung, die durch logische Schlußfolgerungen nicht zu begründen, aber auch nicht von vornherein zu widerlegen ist, und die daher nicht nach ihrem Wahrheitsgehalt, sondern nur nach ihrem Wertgehalt beurteilt werden darf. Im Lichte dieser Auffassung erscheint die tatsächliche



Unmöglichkeit, auch nur in einem einzigen Falle ein Ereignis genau vorauszusagen, sowohl vom Standpunkt der klassischen Physik als auch von dem der Quantenphysik aus als eine natürliche Folge des Umstandes, daß der Mensch mit seinen Sinnesorganen und seinen Meßgeräten selber ein Teil der Natur ist, deren Gesetzen er unterworfen ist und aus der er nun einmal nicht heraus kann, während eine derartige Bindung für den idealen Geist nicht besteht.

Der Einwand, daß dieser ideale Geist selber doch nur ein Produkt unserer Gedanken ist und daß unser denkendes Gehirn schließlich auch aus Atomen besteht, die physikalischen Gesetzen gehorchen, vermag einer näheren Prüfung nicht standzuhalten. Denn es kann kein Zweifel darüber bestehen, daß unsere Gedanken uns ohne weiteres über jedes uns bekannte Naturgesetz hinausführen können und daß wir Zusammenhänge auszumalen vermögen, die mit eigentlicher Physik überhaupt nichts mehr zu tun haben. Wer da behauptet, daß der ideale Geist nur im menschlichen Gedanken existieren könnte und mit dem Denkenden zugleich aus dem Leben verschwinden würde, der müßte konsequenterweise auch behaupten, daß die Sonne, wie überhaupt die ganze uns umgebende Außenwelt, nur in unseren Sinnen, als der einzigen Quelle unserer wissenschaftlichen Erkenntnis, existieren kann, während doch jeder vernünftige Mensch davon überzeugt ist, daß die Sonne selbst beim Aussterben des ganzen Menschengeschlechts nicht im mindesten dadurch an Leuchtkraft einbüßen würde. Wir glauben an die Existenz einer realen Außenwelt, obwohl sie sich einer jeden direkten Erforschung entzieht. Ganz ebenso hindert nichts, an die Existenz eines idealen Geistes zu glauben, obwohl er sich niemals zum Gegenstand einer wissenschaftlichen Untersuchung machen lassen wird.

Denn wir müssen uns wohl hüten, den idealen Geist gewissermaßen als unseresgleichen zu betrachten und an ihn etwa die Frage zu richten, wie er sich denn die Kenntnisse verschafft, die ihn befähigen, künftige Ereignisse genau vorauszusagen. Dann könnte es dem neugierigen Frager leicht passieren, daß ihm die Antwort entgegentönt: „Du gleichst dem Geist, den du begreifst, nicht mir.“ Und wenn

der also Beschiedene gleichwohl hartnäckig bleibt und die Vorstellung von einem idealen Geist wennschon nicht für unlogisch, so doch für inhaltsleer und überflüssig erklärt, so ist ihm entgegenzuhalten, daß nicht alle Sätze, welche sich einer logischen Begründung entziehen, wissenschaftlich wertlos sind, und daß er mit seinem kurzsichtigen Formalismus gerade die Quelle verstopft, an welcher Männer wie Galilei, Kepler, Newton und viele andere großen Physiker ihren wissenschaftlichen Forschungsdrang genährt haben. Für alle diese Männer war die Hingabe an die Wissenschaft, bewußt oder unbewußt, eine Sache des Glaubens, des unbeirrbaren Glaubens an eine vernünftige Weltordnung.

Freilich aufzwingen läßt sich dieser Glaube niemandem, ebensowenig wie man die Wahrheit befehlen oder den Irrtum verbieten kann. Aber allein die einfache Tatsache, daß wir wenigstens bis zu einem gewissen Grade imstande sind, künftige Naturereignisse unseren Gedanken zu unterwerfen und nach unserem Willen zu lenken, müßte ein völlig unverständliches Rätsel bleiben, wenn sie nicht zum mindesten eine gewisse Harmonie ahnen ließe, die zwischen der Außenwelt und dem menschlichen Geist besteht. Und es ist logisch genommen nur eine Frage von sekundärer Bedeutung, bis zu welcher Tiefe man sich die Reichweite dieser Harmonie erstreckt denken will. Die vollendetste Harmonie und damit die strengste Kausalität gipfelt jedenfalls in der Annahme eines idealen Geistes, der sowohl das Walten der Naturkräfte als auch die Vorgänge im Geistesleben des Menschen bis ins einzelste und Feinste in Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft durchschaut.

Wie steht es denn aber mit der Freiheit des menschlichen Willens? Wird dieser nicht durch die geschilderte Anschauung aufgehoben und damit der Mensch zu einem blutlosen Automaten degradiert? Diese Frage ist zu naheliegend und zu wichtig, als daß ich, obwohl mir schon öfters Veranlassung gegeben war, zu ihr Stellung zu nehmen, hier darauf verzichten möchte, mit einigen Worten auf sie einzugehen. Nach meiner Meinung besteht nicht der geringste Widerspruch zwischen dem Walten einer strengen Kausalität in dem hier behandelten Sinne und der Freiheit des menschlichen Willens. Denn das Kausalgesetz einerseits und die Willensfreiheit andererseits beziehen sich auf ganz verschiedenartige Fragen. Während man, wie wir gesehen haben, zum Verständnis einer strengen Kausalität im Weltgeschehen der Annahme eines idealen, alles durchschauenden Geistes bedarf, ist die Frage, ob der Wille frei ist oder nicht, lediglich eine Angelegenheit des Selbstbewußtseins, sie kann also nur durch das eigene Ich entschieden werden. Der Begriff der menschlichen Willensfreiheit hat nur den Sinn, daß der Mensch sich selbst innerlich frei fühlt, und ob das der Fall ist, kann nur er selber wissen. Damit steht nicht in Widerspruch, daß seine Willensmotive von einem idealen Geiste vollständig durchschaut werden können. Wer sich durch eine solche Vorstellung in seiner sittlichen Würde geschmälert fühlt, der vergißt die himmelhohe Erhabenheit des idealen Geistes über seine eigene Intelligenz.



Der eindrucksvollste Beweis für die Unabhängigkeit des eigenen Willens vom Kausalgesetz ergibt sich wohl dann, wenn man einmal den Versuch macht, auf dem Wege gesteigerter Selbsterkenntnis nur mit Hilfe des Kausalgesetzes die eigenen Willensmotive und Handlungen vorauszubestimmen. Ein solcher Versuch ist von vornherein zum Scheitern verurteilt, weil jede Anwendung des Kausalgesetzes auf den eigenen Willen und jede daraus gewonnene Erkenntnis selber als Willensmotiv wirkt und dadurch das gesuchte Resultat immer wieder von neuem verändert. Es ist daher auch durchaus falsch, die Unmöglichkeit der rein kausalen Vorausbestimmung eigener Handlungen einem Mangel an Einsicht zuzuschreiben, der vielleicht später einmal bei gehöriger Steigerung der Intelligenz behoben werden könnte. Das wäre ebenso, als wenn man in der Physik die Unmöglichkeit, die Lage und die Geschwindigkeit eines Elektrons gleichzeitig genau zu bestimmen, einer Unvollkommenheit der Messungsmethoden zuschreiben wollte. Nein, die Unmöglichkeit, eigene, zukünftige Handlungen rein kausal abzuleiten, beruht nicht auf einem Mangel an Einsicht, sondern auf dem einfachen Satz, daß zur Untersuchung eines Objekts keine Methode tauglich ist, durch deren Anwendung das Objekt wesentlich verändert wird. Daher kann sich der denkende

Mensch endgültig die maßgebende Entscheidung für seine Willenshandlungen niemals aus dem Kausalgesetz holen, sondern immer nur aus einem ganz anderen Gesetz, dem Sittengesetz, welches auf einem besonderen Boden erwächst und welches mit wissenschaftlichen Methoden allein überhaupt nicht zu fassen ist.

Wissenschaftliches Denken erfordert immer einen weiten Abstand und eine scharfe Trennung des denkenden Subjekts von dem gedachten Objekt, und dieser Abstand wird am besten gewährleistet durch die Annahme eines idealen Geistes, der nur als Subjekt, niemals als Objekt in Betracht kommen kann.

Aber liegt in dem Verbot, den idealen Geist zum Objekt des Denkens zu machen, nicht immerhin ein unbefriedigender Verzicht? Und ist dadurch die Durchführung eines strengen Determinismus nicht doch zu teuer erkauft? Jedenfalls bei weitem nicht so teuer, als der Preis bedeutet, welchen die Indeterministen für die Durchführung ihrer Weltanschauung zahlen müssen. Denn diese sind ja genötigt, ihrem Erkenntnistrieb noch an einer viel früheren Stelle Halt zu gebieten, dadurch, daß sie von vornherein auf die Aufstellung bestimmter, für Einzelfälle gültiger Gesetze verzichten — ein Grad der Resignation, der so erstaunlich ist, daß man sich fragt, woher es denn kommt, daß der Indeterminismus gegenwärtig unter den Physikern so viele Anhänger in sein Lager gezogen hat. Wenn ich mich nicht irre, so liegt die Erklärung für diesen Umstand auf psychologischem Gebiet. Jedesmal wenn eine neue große Idee in der Wissenschaft auftaucht, wird sie nach allen Richtungen ausprobiert, und wenn sie sich als fruchtbar erweist, sucht man sie zur Grundlage eines möglichst umfassenden und in sich abgeschlossenen Gedankensystems zu machen. So ist es mit der Relativitätstheorie ergangen, und so geht es gegenwärtig mit der Quantentheorie. Da nun die Leistungen der Quantenphysik nach ihrem jetzigen Stande in der Aufstellung der Wellenfunktion gipfeln, so sucht man der Wellenfunktion eine endgültige Bedeutung zu geben, und weil die Wellenfunktion an sich nur die Bedeutung einer Wahrscheinlichkeitsgröße besitzt, so bemüht man sich, die Frage nach der Wahrscheinlichkeit als



die letzte, höchste Aufgabe hinzustellen und macht damit den Wahrscheinlichkeitsbegriff zur endgültigen Grundlage der ganzen Physik.

Ich glaube nicht, daß man auch in alle Zukunft sich mit dieser Fragestellung zufrieden geben wird. Denn wennschon auf geistigem Gebiet, dessen Gesetze doch noch in viel höherem Grade Wahrscheinlichkeitscharakter besitzen, kein Einzelereignis als wissenschaftlich vollständig erforscht gilt, wenn nicht der kausale Ursprung geklärt ist, so wird es in der Naturwissenschaft noch viel weniger gelingen, die Frage nach der Kausalität auf die Dauer auszuschalten.

Allerdings läßt sich das Kausalgesetz ebensowenig beweisen wie logisch widerlegen, es ist also weder richtig noch falsch; aber es ist ein heuristisches Prinzip, ein Wegweiser, und zwar nach meiner Meinung der wertvollste Wegweiser, den wir besitzen, um uns in dem bunten Wirrwarr der Ereignisse zurechtzufinden und die Richtung anzuzeigen, in der die wissenschaftliche Forschung vorangehen muß, um zu fruchtbaren Ergebnissen zu gelangen. Wie das Kausalgesetz schon die erwachende Seele des Kindes sogleich in Beschlag nimmt und ihm die unermüdliche Frage „Warum?“ in den Mund legt, so begleitet es den Forscher durch sein ganzes Leben und stellt ihm unaufhörlich neue Probleme. Denn die Wissenschaft bedeutet nicht beschauliches Ausruhen im Besitz gewonnener sicherer Erkenntnis, sondern sie bedeutet rastlose Arbeit und stets vorwärtsschreitende Entwicklung, nach einem Ziel, das wir wohl dichterisch zu ahnen, aber niemals verstandesmäßig voll zu erfassen vermögen.

# Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen.

(Vortrag, gehalten am 17. Februar 1933 im Verein deutscher Ingenieure, Berlin.)

Wenn ich, der freundlichen Einladung Ihres verehrlichen Vorstandes Folge leistend, den Versuch mache, Ihr Interesse auf kurze Zeit für einige Betrachtungen über den Ursprung und die Auswirkung wissenschaftlicher Ideen in Anspruch zu nehmen, so schulde ich Ihnen vor allem eine nähere Erläuterung bezüglich der Fassung des von mir gewählten Themas. Diese klingt wohl reichlich allgemein und etwas anspruchsvoll; namentlich hätte es vielleicht näher für mich gelegen, nur von naturwissenschaftlichen Ideen zu reden. Allein das würde den Gedanken, die ich vor Ihnen entwickeln möchte, doch von vornherein eine Einschränkung geben, die ich für unnötig und unnatürlich halte. Denn die Wissenschaft bildet nun einmal sachlich genommen eine innerlich geschlossene Einheit. Ihre Trennung nach verschiedenen Fächern ist ja nicht in der Natur der Sache begründet, sondern entspringt nur der Begrenztheit des menschlichen Fassungsvermögens, welche zwangsläufig zu einer Arbeitsteilung führt. In der Tat zieht sich ein kontinuierliches Band von der Physik und Chemie über die Biologie und Anthropologie bis zu den sozialen und Geisteswissenschaften, ein Band, das sich an keiner Stelle ohne Willkür durchschneiden läßt. Auch die Methoden, nach denen die Forschung auf den einzelnen Gebieten arbeitet, erweisen sich bei näherer Betrachtung als innerlich nahe verwandt, und nur wegen der Anpassung an den jeweils zu behandelnden Gegenstand wirken sie sich verschieden aus. Das ist gerade in der neueren Zeit immer deutlicher hervorgetreten und hat der gesamten Wissenschaft inneren und äußeren Vorteil gebracht. Darum glaube ich, die allgemeinen Betrachtungen von vornherein auf die gesamte



Wissenschaft beziehen zu dürfen, was natürlich nicht ausschließt, daß ich beim Übergang zu speziellen Anwendungen die mir näher liegenden Gebiete bevorzuge.

Wenn wir zuerst fragen: Wie kommt eine wissenschaftliche Idee zustande und was ist an ihr charakteristisch? so kann nicht etwa davon die Rede sein, daß ich es unternehme, die feinen psychischen Vorgänge, die sich dabei in der Gedankenwelt des Forschers, zum großen Teil in seinem Unterbewußtsein, abspielen, im einzelnen zu analysieren. Das sind göttliche Geheimnisse, die sich gar nicht oder nur bis zu einem gewissen Grade lüften lassen und an deren Kern zu rühren ebenso töricht wie vermessen wäre. Es kann sich vielmehr nur darum handeln, daß wir zunächst einmal von dem ausgehen, was offensichtlich vorliegt, daß wir also die in einer Wissenschaft für ihre Entwicklung tatsächlich wirksam gewordenen Ideen einer Musterung unterwerfen, indem wir prüfen, in welcher Form sie zuerst aufgetreten sind und welchen Inhalt sie bei ihrer Entstehung besaßen.

Bei einer derartigen Prüfung finden wir nun als erstes Ergebnis die folgende Regel: Eine jede wissenschaftliche Idee, die dem Gehirn eines Forschers entspringt, knüpft stets an ein konkretes Erlebnis an, an eine Entdeckung, eine Beobachtung, eine Feststellung irgendwelcher Art, ob es sich um eine physikalische oder astronomische Messung, eine chemische oder biologische Beobachtung, einen archivalischen Fund oder um ein ausgegrabenes Kulturdenkmal handelt, und der Inhalt der Idee besteht darin, daß sie dies Erlebnis in Zusammenhang und in Vergleich bringt mit gewissen bereits vorliegenden andersartigen tatsächlichen Erlebnissen, daß sie also eine Brücke schlägt von einem zum andern und dadurch die zunächst lose nebeneinander stehenden Tatsachen durch eine feste Beziehung miteinander verbindet. Die Fruchtbarkeit der Idee und damit ihre Bedeutung für die Wissenschaft beruht dann auf der Verallgemeinerung des so hergestellten Zusammenhanges auf eine Reihe anderer verwandter Tatsachen. Denn Zusammenhang schafft Ordnung und damit Vereinfachung und Vervollkommnung des wissenschaftlichen Weltbildes. Vor allem aber führt die Aufgabe,

die neue Idee vollständig durchzuführen, zu neuen Fragen und damit zu neuen Forschungen und Erfolgen. Das gilt für die Hypothesenbildung des Physikers nicht minder wie für die Interpretationskunst des Philologen.

Es liegt mir zunächst daran, den Sinn des Gesagten noch etwas weiter im einzelnen zu verfolgen, und dabei hoffe ich als Physiker, zumal in diesem Kreise, mich auf das mir näher liegende Gebiet beschränken zu dürfen. Erscheint dabei der Gesichtswinkel der Betrachtung einigermaßen eingeengt, so wird mir dadurch die Möglichkeit gegeben, die Beleuchtung um so schärfer zu gestalten.

Ein klassisches Beispiel für das Aufblitzen einer großen wissenschaftlichen Idee bildet die hübsche Erzählung von Isaac Newton, wie er, unter einem Apfelbaum sitzend, durch den Anblick eines zur Erde fallenden Apfels an die Bewegung des Mondes um die Erde erinnert wurde, und dabei die Beschleunigung des Apfels mit der des Mondes in Zusammenhang brachte. Der Umstand, daß diese beiden Beschleunigungen sich verhalten wie das Quadrat des Radius der Mondbahn zu dem Quadrat des Erdradius, brachte ihn auf den Gedanken, daß die beiden Beschleunigungen eine gemeinsame Ursache haben, und lieferte ihm dadurch die Grundlage zu seiner Gravitationstheorie.

Ganz ähnlich wurde James Clerk Maxwell bei der Vergleichung der elektromagnetisch gemessenen Stromstärke mit der elektrostatisch gemessenen Stromstärke durch die numerische Übereinstimmung des Verhältnisses dieser beiden Größen mit der Geschwindigkeit der Fortpflanzung des Lichts zu der Idee geführt, daß die elektromagnetischen Wellen von der nämlichen Art sind wie die Lichtwellen, und machte diese Übereinstimmung zum Ausgangspunkt seiner elektromagnetischen Lichttheorie.

So finden wir bei jeder in der Wissenschaft neu auftauchenden Idee als Charakteristikum eine gewisse originelle Kombination zweier verschiedener Tatsachenreihen. Das läßt sich überall im einzelnen verfolgen, wenn auch nach Inhalt und Formulierung gewisse Unterschiede auftreten. Dem entspricht dann auch eine mehr oder minder starke Verschiedenheit in der Auswirkung und in dem Schicksal der



einzelnen wissenschaftlichen Ideen. Es gibt Ideen, welche nach längerer oder kürzerer Zeit derartig Gemeingut der Wissenschaft geworden sind, daß man sie schließlich zu den Selbstverständlichkeiten zählt und gar nicht mehr besonders hervorhebt. Dahin gehören auch die beiden von mir bereits erwähnten Ideen: die Newtonsche von der Gleichartigkeit der Mondbeschleunigung und der irdischen Schwerebeschleunigung, und die Maxwellsche von der elektromagnetischen Natur des Lichts. Freilich hat die letztere Idee erheblich längere Zeit gebraucht, um sich durchzusetzen; namentlich in Deutschland wurde sie anfänglich wenig beachtet, weil hier die auf die Annahme einer unvermittelten Fernwirkung basierte Theorie von Wilhelm Weber im Vordergrund stand. Erst die genialen Versuche von Heinrich Hertz mit sehr schnellen elektrischen Schwingungen bahnten ihr den Weg zur verdienten Anerkennung.

Andere Ideen, die gegenwärtig zum dauernden Besitz der Wissenschaft gehören, sind die von der mechanischen Natur der Schallwellen oder die von der Identität der Licht- und Wärmestrahlen. Wenn man beim Unterricht in der Physik diese Ideen mit einem Worte abtut, so sollte man doch nicht vergessen, daß ihr Inhalt keineswegs immer als selbstverständlich galt, ja daß um die letztgenannte, um die Identität von Licht- und Wärmestrahlen jahrelang sogar scharfe Kämpfe geführt wurden. Als Kuriosum fällt dabei auf, daß gerade der Forscher, der durch seine Experimente am meisten zu ihrem Erfolge beigetragen hat, der italienische Physiker Macedonio Melloni, ursprünglich zu ihren Gegnern gehörte — ein lehrreiches Beispiel dafür, daß der wissenschaftliche Wert genauer Versuche unabhängig ist von ihrer theoretischen Deutung.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Ideen, welche unmittelbar in vollendeter Form auftauchten und für immer unverändert in Geltung bleiben werden, weisen die meisten in die Wissenschaft eingetretenen Ideen eine wechselvolle Geschichte auf; sie nehmen oft erst allmählich eine bestimmte Form an, befruchten dann eine Zeitlang die Forschung und sterben dann schließlich wieder ab oder werden mehr oder weniger stark umgebildet. Dabei passiert es häufig, daß

sie einer Umbildung zunächst einen gewissen Widerstand entgegensetzen, und zwar um so hartnäckiger, je mehr Erfolge sie vorher gezeitigt hatten, wodurch unter Umständen der Fortschritt der Wissenschaft sogar merklich gehemmt werden kann. Auch hierfür finden wir in der Physik lehrreiche Beispiele, auf deren nähere Besprechung sich einzugehen lohnt.

Ich beginne mit der Idee von dem Wesen der Wärme.

Die erste Stufe in der Entwicklung der Wärmetheorie bildete die Kalorimetrie; sie ist gegründet auf die Annahme, daß die Wärme sich verhält wie ein feiner Stoff, der bei der Berührung zweier Körper von verschiedenen Temperaturen aus dem wärmeren in den kälteren Körper hinüberströmt, ohne dabei seine Quantität zu ändern. Diese Hypothese bewährt sich auch ganz gut, solange keine mechanischen Wirkungen ins Spiel kommen. Die Schwierigkeit, die sich bei der Erklärung der Erzeugung von Wärme durch Reibung oder durch Kompression ergab, suchte man zu überwinden durch die Annahme einer Veränderlichkeit der Wärmekapazität, indem man sich vorstellte, daß die Wärme aus einem komprimierten Körper gewissermaßen herausgepreßt wird, ebenso wie aus einem feuchten Schwamm, wenn er komprimiert wird, das Wasser abfließt, dessen Quantität sich ja auch dabei nicht ändert. Als dann die Frage nach den Gesetzen der Erzeugung mechanischer Arbeit aus Wärme durch die Erfindung der Wärmekraftmaschine immer brennender wurde, suchte Sadi Carnot das Analogon der Gewinnung von Arbeit aus Wärme ganz sinngemäß in der Gewinnung von Arbeit aus der Schwerkraft. Ebenso wie das Herabsinken eines Gewichtes aus größerer auf geringere Höhe, so kann auch der Übergang von Wärme aus höherer auf tiefere Temperatur zur Erzeugung von Arbeit benutzt werden, und wie die aus der Gravitation gewonnene Arbeit proportional ist der Größe des Gewichtes und der durchfallenen Höhendifferenz, so ist die aus Wärme erzeugte Arbeit proportional der übergegangenen Wärme und der Temperaturdifferenz.

Diese stoffliche Theorie der Wärme erlitt aber einen Stoß durch die erfahrungsmäßig festgestellte Tatsache, daß die Wärmekapazität eines Körpers weder durch Kompression



noch durch Reibung wesentlich geändert wird, und sie wurde entscheidend widerlegt durch die Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalents, nach welchem bei der Reibung Wärme verloren geht, bei der Kompression Wärme neu erzeugt wird. Damit waren die bisherigen Anschauungen vom Wesen der Wärme ad absurdum geführt, und der Aufbau der Wärmetheorie mußte von neuem in Angriff genommen werden. Dieser Aufgabe unterzog sich Rudolf Clausius und löste sie in einer Reihe von klassischen Arbeiten durch die Aufstellung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, für welchen die Voraussetzung wesentlich ist, daß es irreversible Prozesse gibt, d. h. Vorgänge, die durch keinerlei Mittel rückgängig gemacht werden können. Zu ihnen gehört die Wärmeleitung, die Reibung, die Diffusion.

Indessen die Carnotsche Idee von der Gleichartigkeit des Wärmeübergangs von höherer zu tieferer Temperatur mit dem Herabsinken eines Gewichtes von höherem zu tieferem Niveau ließ sich nicht so schnell verdrängen. Es gab Physiker, welche die Clausiusschen Gedankengänge unnötig kompliziert und noch dazu unklar fanden und welche es insbesondere ablehnten, durch die Einführung des Begriffs der Irreversibilität der Wärme eine Sonderstellung unter den verschiedenen Energiearten anzuweisen. Sie schufen als Gegenstück zur Clausiusschen Thermodynamik die sogenannte Energetik, deren erster Hauptsatz, ebenso wie der Clausiussche, das Prinzip der Erhaltung der Energie ausspricht, deren zweiter Hauptsatz aber, der die Richtung alles Geschehens anzeigen soll, den Wärmeübergang von höherer zu tieferer Temperatur in vollkommene Analogie stellte zu dem Herabsinken eines Gewichtes von größerer zu geringerer Höhe oder dem Übergang einer Elektrizitätsmenge von höherem zu tieferem Potential. Damit hing dann zusammen, daß die Annahme einer Irreversibilität für den Beweis des zweiten Hauptsatzes als unwesentlich erklärt wurde, ferner auch, daß die Existenz eines absoluten Nullpunktes der Temperatur bestritten wurde unter Berufung darauf, daß man, wie bei Höhenniveaus und Potentialniveaus, so auch bei der Temperatur nur Differenzen messen könne. Der grundlegende Unterschied, der darin besteht, daß ein gehobenes

Pendel beim Herabfallen in die Gleichgewichtslage über dieselbe hinausschwingt, und daß ein zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Leitern überspringender Funke Oszillationen ausführt, während dagegen beim Wärmeaustausch zweier Körper von einem Pendeln der Wärme zwischen den beiden Körpern keine Rede ist, wurde von den Energetikern als nebensächlich betrachtet und mit Stillschweigen übergangen.

Ich selber habe in den achtziger und neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts am eigenen Leibe erfahren, wie einem Forscher zumute ist, der sich im Besitz einer sachlich überlegenen Idee weiß und der die Wahrnehmung macht, daß alle seine vorgebrachten guten Gründe nicht verfangen, da seine eigene Stimme zu schwach ist, um sich in der wissenschaftlichen Welt das nötige Gehör zu verschaffen. Gegen die Autorität von Männern wie Wilhelm Ostwald, Georg Helm, Ernst Mach war eben damals nicht aufzukommen.

Der Umschwung wurde erst von einer ganz andern Seite herbeigeführt, von dem Eindringen der Atomistik. Die atomistische Idee ist uralt, aber eine brauchbare Formulierung fand sie erst in der kinetischen Gastheorie, welche um die Zeit der Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalents entstand, um zunächst, von den Energetikern scharf bekämpft, eine Zeitlang ein bescheidenes Dasein zu führen, schließlich aber gegen Ende des vorigen Jahrhunderts, dank der Fortschritte der experimentellen Forschung, sich sehr schnell durchzusetzen. Nach der atomistischen Idee gleicht der Wärmeübergang von einem wärmeren zu einem kälteren Körper nicht dem Herabsinken eines Gewichtes, sondern etwa einem Mischungsvorgang, der darin besteht, daß zwei verschiedene, in einem Gefäß befindliche Sorten Pulver, die anfangs übereinander geschichtet sind, beim fortgesetzten Schütteln des Gefäßes sich allmählich vermengen. Dann pendelt nicht etwa das Pulver zwischen dem Zustand der vollständigen Vermischung und dem der vollständigen Entmischung hin und her, sondern die Veränderung vollzieht sich ein einziges Mal in einer bestimmten Richtung, nämlich bis zur vollständigen Vermischung, und nimmt dann endgültig ein Ende, entsprechend der Irreversibilität des Prozesses. Im Lichte dieser Betrachtung erscheint der zweite Hauptsatz der Thermodynamik als ein statistischer, ein Wahrscheinlichkeitssatz, und wer von Ihnen im vorigen Monat den Vortrag meines Kollegen Max von Laue über thermodynamische Schwankungserscheinungen anhören konnte, der hat sicherlich einen starken Eindruck empfangen von dem Gewicht der Gründe, welche diese Auffassung bekräftigen und über alle Zweifel hinausheben.



Der hier geschilderte historische Entwicklungsgang kann zugleich als Beispiel dienen für eine allgemeine auf den ersten Blick wohl etwas seltsam erscheinende Tatsache. Eine neue große wissenschaftliche Idee pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, daß ihre Gegner allmählich überzeugt und bekehrt werden — daß aus einem Saulus ein Paulus wird, ist eine große Seltenheit — sondern vielmehr in der Weise, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Idee vertraut gemacht wird. Auch hier heißt es wieder: Wer die Jugend hat, der hat die Zukunft. Deshalb gehört eine sachgemäße Ausgestaltung des Schulunterrichts mit zu den wichtigsten Bedingungen des wissenschaftlichen Fortschritts, und ich kann es mir nicht versagen, hier mit einem Worte auf diesen Punkt einzugehen.

Es kommt weniger darauf an, was in der Schule gelernt wird, als darauf, wie gelernt wird. Ein einziger mathematischer Satz, der von einem Schüler wirklich verstanden wird, besitzt für ihn mehr Wert, als zehn Formeln, die er auswendig gelernt hat und die er auch vorschriftsmäßig anzuwenden weiß, ohne aber ihren eigentlichen Sinn zu verstehen. Denn die Schule soll nicht fachmäßige Routine vermitteln, sondern folgerichtiges methodisches Denken. Man wende nicht ein, daß es in letzter Linie weniger auf das Wissen als auf das Können ankommt. Gewiß ist ein Wissen ohne Können wertlos, ebenso wie eine jede Theorie ihre Bedeutung in letzter Linie immer erst durch ihre besonderen Anwendungen empfängt. Aber eine Theorie kann doch niemals durch bloße Routine ersetzt werden, welche bei außergewöhnlichen Fällen hilflos versagt. Deshalb bleibt das erste Erfordernis für die Erzielung tüchtiger Leistungen eine gründliche elementare

Vorbildung, wobei es weniger auf die Fülle des Stoffs als auf die Art der Behandlung ankommt. Wenn diese Vorbildung nicht schon auf der Schule erworben wird, läßt sie sich schwer nachholen; denn die Fachschulen und die Hochschulen haben später andere Aufgaben zu erfüllen. Im übrigen ist die letzte, höchste Aufgabe der Erziehung weder auf das Wissen noch auf das Können gerichtet, sondern auf das Handeln. Aber ebenso, wie dem Handeln das Können vorausgehen muß, so ist für das Können das Wissen und Verstehen unerläßliche Vorbedingung. In unserer heutigen schnellebigen Zeit, die allem Neuen, was nach außen hin unmittelbare sensationelle Wirkung ausübt, ganz besonderes Interesse entgegenbringt, findet sich auch bei der Erziehung zur Wissenschaft vielfach die Neigung, gewisse neue aufsehenerregende Resultate vorweg zu nehmen, ehe sie wirklich ausgereift sind. Es macht eben in der Öffentlichkeit einen guten Eindruck, wenn schon im Lehrplan der Mittelschule auch moderne Probleme der wissenschaftlichen Forschung mit aufgeführt werden. Das ist aber in hohem Grade bedenklich. Denn da von einer gründlichen Behandlung derselben keine Rede sein kann, so wird dadurch bei den Schülern leicht eine gewisse Flüchtigkeit im Denken und ein hohler Wissensdünkel großgezogen. So zum Beispiel würde ich es für sehr bedenklich halten, die Relativitätstheorie oder die Quantentheorie schon in der Mittelschule zu behandeln. Hochbegabte Schüler bilden immer eine Ausnahme, aber für solche ist der Lehrplan nicht bestimmt. Und es müßte geradezu als Unfug bezeichnet werden, wenn etwa die Frage nach der Allgemeingültigkeit des Prinzips der Erhaltung der Energie, die bekanntlich gegenwärtig in der Kernphysik ernstlich zur Diskussion steht, als eine offene hingestellt würde vor Schülern, die noch nicht einmal den Inhalt des Prinzips, geschweige denn seine Tragweite, richtig begriffen haben.

Was bei einem solchen „auf der Höhe der modernen Forschung stehenden" Unterricht herauskommen kann, sehen wir mit erschreckender Deutlichkeit an der Art, wie jetzt manchmal in der Öffentlichkeit von einem Zusammenbruch der exakten Wissenschaften gesprochen wird. Es ist ein charakteristisches Zeichen der gegenwärtig herrschenden



Verwirrung, daß nicht wenige erfinderische Köpfe sich gegenwärtig wieder um Konstruktionen bemühen, welche auf die unbegrenzte Erschaffung von Energie oder auf die Unschädlichmachung der neuerdings in Mode gekommenen mysteriösen Erdstrahlen hinzielen, und es ist noch erstaunlicher, wie reichliche Geldspenden solchen Erfindern von gutgläubiger Seite her zufließen, während andrerseits wertvolle und aussichtsreiche wissenschaftliche Untersuchungen aus Mangel an Mitteln eingeschränkt oder abgebrochen werden müssen. Hier könnte nur eine gründliche Schulbildung, und zwar nicht nur bei den Erfindern, sondern auch bei den Geldgebern wirksam Abhilfe schaffen.

Nach dieser Abschweifung ins Pädagogische lassen Sie mich zunächst noch in Kürze einer andern physikalischen Idee gedenken, deren wechselvolle Schicksale für unsere Betrachtungen vielleicht noch lehrreicher sind als die Wandlungen der Theorie der Wärme: ich meine die Idee vom Wesen des Lichts.

Die Erforschung der Natur des Lichtes nimmt ihren Anfang mit der Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes. Die Idee, durch welche Newton auf seine Emanationstheorie geführt wurde, setzt einen Lichtstrahl in Vergleich mit einem Wasserstrahl, und die Lichtgeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit der geradlinig fliegenden Wasserteilchen. Aber diese Hypothese vermochte nicht Rechenschaft abzulegen von der Tatsache der Interferenz des Lichtes, d. h. von der Tatsache, daß zwei Lichtstrahlen, die an einem Ort zusammentreffen, dort unter Umständen Dunkelheit erzeugen können. Daher wurde die Emanationstheorie aufgegeben und abgelöst durch die Undulationstheorie von Huygens, welcher die Idee zugrunde liegt, daß die Lichtausbreitung einer Wasserwelle gleicht, die sich vom Ort ihrer Entstehung nach allen Richtungen konzentrisch ausbreitet mit einer Geschwindigkeit, die mit der Geschwindigkeit der Wasserteilchen natürlich gar nichts zu tun hat. Diese Theorie gab vorzüglich Rechenschaft von den Interferenzerscheinungen, da zwei zusammentreffende Wellen sich überall da gegenseitig vernichten können, wo ein Berg der einen Welle auf ein Tal der andern Welle trifft. Indessen auch die Herrschaft der

Undulationstheorie dauerte nicht länger als ein Jahrhundert. Denn die Undulationstheorie versagt bei der Erklärung der Wirkungen eines Lichtstrahls von kurzer Wellenlänge auf große Entfernungen. Da nämlich die Lichtintensität mit wachsender Entfernung quadratisch abnimmt, so ist bei gleichmäßiger Ausbreitung des Lichts nach allen Richtungen nicht zu verstehen, daß der Strahl auch an sehr entfernten Orten eine Energiemenge erzeugen kann, die ganz unabhängig ist von seiner Intensität und die bei kurzen Wellen, wie bei Röntgenstrahlen oder Gammastrahlen, verhältnismäßig sehr große Beträge annimmt. Eine solche gewaltige Wirkung bei schwächster Intensität kann nur verstanden werden, wenn die Lichtenergie auf diskrete unveränderliche Teilchen oder Quanten konzentriert gedacht wird, und das bedeutet in gewissem Sinn eine Rückkehr zu der Newtonschen Hypothese der Lichtpartikel.

So ist gegenwärtig eine höchst unbefriedigende Lage geschaffen. Die beiden Lichthypothesen stehen sich gegenüber wie zwei ebenbürtige Kämpfer. Jeder von ihnen hat eine scharf geschliffene Waffe, aber auch jeder hat eine verwundbare Stelle. Was wird das Ende des Kampfes sein? Soviel läßt sich wohl heute mit Bestimmtheit sagen, daß keine der beiden Hypothesen ausschließlich triumphieren wird. Vielmehr kann die Entscheidung nur darin bestehen, daß von einem höheren Standpunkt aus sowohl die Berechtigung als auch die Einseitigkeit einer jeden Hypothese klar zu überschauen ist.

Ein solcher Standpunkt wird aber nur dadurch zu finden sein, daß wir der Quelle, welcher alle unsere Erfahrungen entspringen, näher nachgehen, daß wir also im vorliegenden Falle den Vorgängen bei der Messung optischer Erscheinungen unsere Aufmerksamkeit zuwenden, und dazu gehört, daß wir die Meßinstrumente mit in den Kreis der Untersuchungen einbeziehen. Das ist ein Schritt von prinzipiell enormer Tragweite, er kann als die Einführung des Begriffs der Ganzheit in die Physik bezeichnet werden. Danach gehört zum vollständigen Verständnis der Gesetze eines optischen Phänomens nicht allein die Betrachtung der physikalischen Vorgänge an den Orten der Entstehung und der Fortpflanzung



des Lichtes, sondern auch die Untersuchung der Eigentümlichkeiten des Messungsvorganges. Die optischen Meßinstrumente sind nicht allein passive Empfänger, welche die auf sie treffenden Strahlen einfach registrieren, sondern sie sind bei dem Messungsvorgang aktiv mitbeteiligt, sie üben einen kausalen Einfluß aus auf sein Ergebnis. Erst mit ihm zusammen bildet das betrachtete physikalische System ein gesetzliches Ganzes.

Wie auf diesem Wege weiter vorwärts zu kommen ist, bildet eine schwierige Zukunftsfrage. Um ihre Bedeutung zu prüfen, lassen Sie uns zunächst noch etwas weiter ausholen und über den speziellen Fall der Optik hinausgehend von einem allgemeineren Standpunkt aus an das Problem herantreten.

Sind wir überhaupt befähigt, mit einiger Sicherheit die zukünftigen Wandlungen irgendeiner wissenschaftlichen Idee vorauszusagen? Kann man, wenn auch nur mit einer gewissen Annäherung, von einer Gesetzlichkeit, von einer Zwangsläufigkeit in der Entwicklung wissenschaftlicher Ideen sprechen? Fast möchte man beim Rückblick auf den historischen Gang der Dinge etwas derartiges vermuten, wenn wir bedenken, daß manche großen Ideen zunächst ein verborgenes Dasein geführt haben, unverstanden und höchstens vorausgeahnt von einzelnen zu früh auf die Welt gekommenen Forschern, dann aber, nachdem die Menschheit für sie gewissermaßen reif geworden war, wie mit einem Schlage gleichzeitig und unabhängig an verschiedenen Orten aufgetaucht und an die Öffentlichkeit getreten sind. So lassen sich die Spuren des Prinzips der Erhaltung der Energie Jahrhunderte weit zurückverfolgen; aber erst um die Mitte des vorigen Jahrhunderts empfing das Prinzip fast gleichzeitig durch vier bis sechs miteinander in keinerlei Verbindung stehende Forscher seine wissenschaftlich brauchbare Formulierung, und es wäre wohl nicht allzu kühn, zu behaupten, daß, wenn Julius Robert Mayer, James Prescott Joule, Ludwig August Colding, Hermann von Helmholtz damals nicht gelebt hätten, das Energieprinzip nur wenig später das Licht der Welt erblickt hätte. Ja, ich würde gern die Vermutung wagen, daß Ähnliches von der Entstehung der mo-

dernen Relativitätstheorie oder der Quantentheorie zu sagen wäre, wenn ich nicht den naheliegenden Einwurf der Wohlfeilheit derartiger Prophezeiungen ex eventu scheuen müßte. Das Zwangsläufige dieser Entwicklungen erblicke ich darin, daß durch die Ausbreitung der Experimentierkunst und durch die Verfeinerung der Messungsmethoden die theoretische Forschung gewissermaßen automatisch in eine bestimmte Richtung gedrängt worden ist.

Trotz alledem wäre nichts verkehrter als die Vorstellung, daß die Gesetze der Entstehung und der Auswirkung wissenschaftlicher Ideen sich jemals auf eine genaue, auch für die Zukunft gültige Formel bringen lassen würden. Denn in letzter Linie entspringt eine neue Idee doch der Phantasiewelt ihres Schöpfers, und insofern wird die Forschung, sogar in der exaktesten Wissenschaft, in der Mathematik, stets in irgendeinem Punkte an das irrationale Element gebunden bleiben, welches nun einmal in dem Begriff der geistigen Persönlichkeit enthalten ist.

Wenn wir uns erinnern, daß eine jede Idee an ein gewisses Erlebnis anknüpft, so ist es nur natürlich und begreiflich, daß gerade unsere Gegenwart, die an neuen und sich gegenseitig überstürzenden Ereignissen so reich ist, der Hervorbringung und Verkündigung neuer Ideen besonders günstige Bedingungen darbietet. Und wenn wir weiter bedenken, daß bei der Formulierung einer Idee stets zwei verschiedene Ereignisse aufeinander bezogen werden, so ergibt sich schon aus den formalen Regeln der Kombinationsrechnung, daß die Anzahl der überhaupt möglichen Ideen noch um eine volle Größenordnung mannigfaltiger ist als die Anzahl der zur Auswahl stehenden Ereignisse.

Zur Erklärung der gegenwärtig überreichen Produktion von wissenschaftlichen Ideen mag weiter auch der Umstand dienen, daß bei der weit verbreiteten Arbeitslosigkeit manche geistig interessierten Köpfe, die das Bedürfnis nach produktiver Tätigkeit empfinden, die Beschäftigung mit allgemein theoretischen und philosophischen Problemen als einen rettenden und wohlfeilen Ausweg aus der leeren Öde ihres täglichen Lebens willkommen heißen. Leider kommt dabei nur in den seltensten Fällen ein wertvolles Resultat



zustande. Ich übertreibe nicht, wenn ich sage, daß kaum eine Woche vergeht, in der ich nicht eine oder mehrere kürzere oder längere Zuschriften von Personen aller Berufsstände, Lehrern, Beamten, Literaten, Juristen, Ärzten, Ingenieuren, Architekten mit dem Ersuchen um Stellungnahme empfange, deren gründliche Prüfung meine gesamte freie Arbeitszeit mehr als voll in Anspruch nehmen würde.

Man kann diese Zuschriften nach ihrem Inhalt in zwei Klassen teilen. Die eine Klasse umfaßt die ganz naiven Elaborate, deren Verfasser gar nicht bedenken, daß eine neue wissenschaftliche Idee, wenn sie brauchbar sein soll, an bestimmte Tatsachen anknüpfen muß, daß also zu ihrer Formulierung jedenfalls eine gewisse spezielle Sachkenntnis notwendig ist. Statt dessen meinen sie, durch einen gewissen genialen Seherblick die Wahrheit direkt erraten zu können, haben keine Ahnung von der Tatsache, daß allen großen Entdeckungen stets eine Periode harter Einzelarbeit vorausgegangen ist, und bilden sich ein, daß gerade ihnen zufällig durch eine glückliche Schicksalsfügung die ersehnte Frucht in den Schoß gefallen ist, wie weiland dem behaglich unter dem Apfelbaum sitzenden Newton die Idee seiner allgemeinen Gravitation. Das Schlimme dabei ist, daß solche Phantasten, die über allen Wassern schweben, aber nirgends in die Tiefe dringen, eben wegen ihrer mangelnden wissenschaftlichen Bildung fast niemals eines Besseren zu belehren sind. Man darf die von ihnen ausgehenden Gefahren nicht unterschätzen. Gerade weil in der heutigen Jugend das Interesse für allgemeine Fragen, für die Gewinnung einer befriedigenden Weltanschauung erfreulicherweise im Zunehmen begriffen ist, muß immer wieder darauf hingewiesen werden, daß eine Weltanschauung völlig in der Luft hängt und beim ersten Sturm rettungslos umgeblasen wird, wenn sie nicht auf den festen Boden der Wirklichkeit gegründet ist, und daß daher ein jeder, der sich eine wissenschaftliche Weltanschauung aufbauen will, zunächst einmal auf dem Gebiet der Tatsachen Bescheid wissen muß.

Freilich ist es heutzutage dem einzelnen Forscher nicht mehr möglich, unmittelbar alle Gebiete der Wissenschaften auch nur einigermaßen vollständig zu überschauen, und er

ist in den meisten Fällen darauf angewiesen, aus zweiter Quelle zu schöpfen. Aber um so dringender muß man verlangen, daß er sich wenigstens auf irgendeinem Gebiete wirklich vollständig zu Hause fühlt und darin ein selbständiges Urteil besitzt. Daher habe ich auch als Mitglied der philosophischen Fakultät von jeher die Forderung vertreten, daß jemand, der sich in der Philosophie den Doktorgrad erwerben will, mindestens in irgendeiner Fachwissenschaft spezielle Kenntnisse nachweist. Ob das Fach den Naturwissenschaften oder den Geisteswissenschaften angehört, ist dabei unwesentlich. Wesentlich ist nur, daß er durch eigenes Studium einen Begriff davon bekommen hat, wie man wissenschaftlich methodisch arbeitet.

Wenn bei der erwähnten Klasse von Zuschriften die Aufdeckung ihrer Wertlosigkeit in der Regel rasch gelingt, so verlangt die andere Klasse wesentlich mehr Beachtung, da es sich hier oft um durchaus ernst zu nehmende Autoren handelt, welche auf ihrem speziellen Gebiet Vorzügliches leisten. Je mehr sich infolge des heute notwendig gewordenen Wissenschaftsbetriebs das Arbeitsgebiet des einzelnen einengt, um so stärker macht sich bei einem tiefer veranlagten Forscher das Bedürfnis geltend, über die Grenzen seines Faches hinauszublicken und die Kenntnisse, die er sich dort erworben hat, für andere Wissensgebiete nutzbar zu machen. So verbindet er gern zwei einander fernliegende Gebiete durch eine ihm einleuchtend erscheinende Idee und benutzt diese dann als Brücke, um die Gesetzmäßigkeiten und Methoden, mit denen er auf seinem eigenen Gebiet genau vertraut ist, auf das andere Gebiet zu übertragen und zur Lösung der dort bestehenden Probleme zu verwerten. Namentlich bei Mathematikern, Physikern und Chemikern findet man häufig die Neigung, ihre exakten Methoden zur Klärung biologischer, psychologischer oder soziologischer Fragen heranzuziehen. Aber hier ist stets wohl zu bedenken, daß es für die Tragfähigkeit einer solchen neugeschaffenen Ideenbrücke nicht genügt, wenn ihr einer Pfeiler sicher fundiert ist. Auch ihr anderer Pfeiler muß auf festem Grunde ruhen, sonst kann sie ihren Zweck nicht erfüllen. Oder konkreter gesprochen: es genügt nicht, wenn ein ideenreicher Forscher auf seinem



ursprünglichen Fachgebiet gründlich Bescheid weiß. Er muß, wenn seine weitausschauenden Gedanken fruchtbar sein sollen, auch mit den Tatsachen und den Problemen des andern Gebietes, auf das sich seine Arbeit bezieht, ebenfalls bis zu einem gewissen Grade vertraut sein. Diese Forderung muß deshalb besonders betont werden, weil nun einmal ein jeder Fachmann dazu neigt, die Bedeutung des eigenen Spezialgebietes um so höher zu bewerten, je länger er darin arbeitet und je mehr Schwierigkeiten ihm die Arbeit bereitet. Hat er dann glücklich die Lösung eines Problems gefunden, so geht er dann leicht dazu über, ihre Tragweite zu überschätzen und sie ohne weiteres auf Fälle anzuwenden, in denen die Verhältnisse vielleicht ganz anders liegen. Daß auch auf andern Wissenschaftsgebieten Forscher mit der nämlichen Sorgfalt und unter nicht geringeren Schwierigkeiten, wenn auch mit andern Methoden, arbeiten, sollte niemand vergessen, der das Bedürfnis fühlt, in der Wissenschaft einen höheren Standpunkt zu gewinnen, als ihm sein engeres Fach zu bieten vermag. Wie häufig diese Regel unbeachtet bleibt, ist aus der Geschichte einer jeden Wissenschaft zu ersehen. Doch werde ich, wenn ich wiederum einige Beispiele auswähle, wohlweislich bei der Physik bleiben, um nicht in denselben Fehler zu verfallen, den ich soeben gerügt habe.

Es gibt unter den allgemeinen Begriffen der Physik wohl keinen einzigen, der nicht schon mit mehr oder weniger Geschick auf andere Gebiete übertragen worden ist, mittels irgendeiner Ideenverbindung, die häufig nur durch äußere Umstände, sei es auch nur durch Zufälligkeiten der Terminologie, angeregt worden ist. So führt das Wort „Energie“ leicht dazu, den entsprechenden physikalischen Begriff und mit ihm den physikalischen Satz der Erhaltung der Energie auch für die Psychologie in Anspruch zu nehmen, und es ist in diesem Zusammenhang sogar allen Ernstes versucht worden, den Ursprung und den Grad des menschlichen Glücks bestimmten mathematisch formulierten Gesetzen zu unterwerfen. Auf gleicher Stufe stehen die Bemühungen, das Prinzip der Relativität auch außerhalb der Physik, z. B. in der Ästhetik oder gar in der Ethik, zu verwerten. Und doch gibt es nichts Irreführenderes als den gedankenlosen Satz:

„Alles ist relativ". Schon innerhalb der Physik ist er unrichtig. Alle sogenannten universellen Konstanten, wie die Masse oder die Ladung eines Elektrons oder eines Protons oder das elementare Wirkungsquantum, sind absolute Größen; sie dienen als die festen unveränderlichen Bausteine für die Atomistik. Freilich ist es oft vorgekommen, daß eine früher als absolut betrachtete Größe sich später als relativ herausgestellt hat, aber das geschah immer nur in dem Sinne, daß sie auf eine andere, tiefer liegende absolute Größe zurückgeführt wurde. Ohne die Voraussetzung absoluter Größen läßt sich überhaupt kein Begriff definieren, keine Theorie aufbauen.

Auch der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, das Prinzip der Vermehrung der Entropie, hat mehrfach Deutungen außerhalb der Physik gefunden. So hat man den Satz, daß der Verlauf aller physikalischen Vorgänge einseitig gerichtet ist, für den Entwicklungsgedanken in der Biologie verwerten wollen. Das ist nun ein ganz besonders unglücklicher Versuch, wenigstens dann, wenn man mit dem Worte Entwicklung den Begriff des Fortschritts in aufsteigender Richtung, also der Vervollkommnung, Veredelung, verbindet. Denn das Entropieprinzip ist nach seinem Inhalt ein Wahrscheinlichkeitssatz, es besagt im Grunde nur, daß auf einen von vornherein unwahrscheinlichen Zustand im Mittel stets ein wahrscheinlicherer Zustand folgt. Will man dies Gesetz biologisch deuten, so liegt es jedenfalls näher, an eine Degeneration zu denken als an eine Veredelung. Denn das Ungeordnete, Gewöhnliche, Gemeine ist immer von vornherein wahrscheinlicher als das Geordnete, Vorzügliche, Hervorragende.

Zu den irreführenden Ideen, deren wir hier einige betrachtet haben, gesellt sich noch eine andere Klasse von Ideen, nämlich solche, welche genau genommen überhaupt keinen Sinn haben. Sie spielen auch in der Physik eine nicht geringe Rolle. So hat die Vergleichung der Bewegung eines Elektrons um den Atomkern mit der Bewegung eines Planeten um die Sonne zur Frage nach der Lage und nach der Geschwindigkeit eines Elektrons Anlaß gegeben, während die spätere Forschung gezeigt hat, daß diese Fragen gar nicht gleichzeitig beantwortet werden können. Auch an diesem Beispiel sehen wir wieder, wie bedenklich es ist, Begriffe und Sätze, die sich in einem Wissenschaftsgebiet bewährt haben, auf andere Gebiete zu übertragen und wie vorsichtig man daher in der Formulierung und Prüfung einer neuen Idee sein muß.



Aber die Sache hat auch ihre prinzipielle Kehrseite, und von dieser zu sprechen, wird es jetzt hohe Zeit. Würden wir eine neue wissenschaftliche Idee erst dann zulassen, wenn sie ihre Berechtigung schon endgültig erwiesen hat, ja würden wir auch nur verlangen, daß ihr von vornherein ein deutlich faßbarer Sinn innewohnt, so würden wir dem Fortschritt der Wissenschaft unter Umständen einen schweren Schaden zufügen. Denn wir dürfen nicht vergessen, daß oft gerade Ideen ohne deutlichen Sinn es waren, von denen die Wissenschaft die stärksten Antriebe zu ihrer Aufwärtsentwicklung empfangen hat. Aus der Idee des Lebenselixiers bzw. der Goldfabrikation, entstand die Wissenschaft der Chemie; aus der Idee des perpetuum mobile erwuchs das Verständnis für den Begriff der Energie; aus der Idee der absoluten Geschwindigkeit der Erde stammt die Anregung zur Aufstellung der Relativitätstheorie; aus der Idee der Planetenbewegung der Elektronen entsprang die Atomphysik. Das sind Tatsachen, die sich nicht weginterpretieren lassen und die jedenfalls allerlei zu denken geben; sie zeigen deutlich, daß auch in der Wissenschaft der Satz gilt: Nur wer wagt, hat Aussicht zu gewinnen. Es ist eine allgemeine Wahrheit, daß man, um Erfolg zu haben, wohl daran tut, die Ziele etwas höher zu stecken, als sie schließlich erreichbar sind.

Im Lichte dieser Betrachtung erscheinen uns die wissenschaftlichen Ideen von einer ganz neuen Seite. Wir sehen, daß die Bedeutung einer wissenschaftlichen Idee häufig nicht sowohl in ihrem Wahrheitsgehalt, als vielmehr in ihrem Wertgehalt liegt. Das gilt zum Beispiel auch für die Idee von der Realität der Außenwelt oder für die Idee der Kausalität. Auch bei diesen beiden Ideen heißt es nicht: wahr oder falsch? sondern: wertvoll oder wertlos? Bedenken wir, daß der Wertbegriff gerade einer so objektiven Wissenschaft wie der Physik von vornherein gänzlich wesensfremd ist, so muß dieser Umstand besonders auffallend erscheinen, und es erhebt

sich die Frage, wie es zu verstehen ist, daß die Bedeutung einer physikalischen Idee erst bei Berücksichtigung ihres Wertgehaltes voll erschöpft werden kann.

Hier bietet sich, wie ich meine, nur wieder der Weg, den wir schon oben in dem speziellen Fall des optischen Problems beschritten haben — und das gilt nicht nur für die Physik, sondern ebenso für jedes andere Wissenschaftsgebiet —, daß wir nämlich auf die Quelle zurückgehen, der alle Wissenschaft entspringt, indem wir bedenken, daß zu jeder Wissenschaft jemand gehört, der die Wissenschaft aufbaut und der sie andern mitteilt. Das bedeutet wieder die Einführung des Begriffs der Ganzheit.

Wie ein physikalischer Vorgang sich prinzipiell nicht trennen läßt von dem Meßinstrument oder dem Sinnesorgan, von dem er wahrgenommen wird, so läßt sich eine Wissenschaft prinzipiell nicht trennen von den Forschern, welche sie betreiben. Und ebenso wie der Physiker, welcher einen atomistischen Vorgang experimentell untersucht, dessen Ablauf mit seinem Instrumentarium um so stärker beeinflußt, je tiefer er in seine Einzelheiten eindringt, oder wie der Physiologe, welcher einen lebenden Organismus in seine feinsten Teile zerlegt, denselben schädigt oder gar abtötet, gerade so hemmt der Philosoph, der eine neue wissenschaftliche Idee nur daraufhin prüft, inwieweit sich ihr Sinn von vornherein handgreiflich aufzeigen läßt, den Trieb der Wissenschaft zur weiteren Entwicklung. Daher ist der Positivismus, welcher jede transzendentale Idee ablehnt, nicht weniger einseitig als die Metaphysik, welche jede Einzelerfahrung gering schätzt. Beide Betrachtungsweisen haben ihre Berechtigung und lassen sich konsequent durchführen. Aber in ihrer extremen Ausbildung wirken sie beide auf den Fortschritt der Wissenschaft dadurch lähmend ein, daß sie gewisse prinzipielle Fragen von vornherein verbieten, freilich aus entgegengesetzten Gründen: der Positivismus, weil die Fragen keinen Sinn haben, die Metaphysik, weil sie bereits beantwortet sind. Der Wettkampf der beiden Richtungen wird nie zugunsten der einen oder der andern Partei entschieden werden. In der Tat hat er im Lauf der Zeit beständig hin und her geschwankt. Vor hundert Jahren beanspruchte die Metaphysik die Alleinherrschaft, bis ein kläglicher Zusammenbruch erfolgte. Heute greift der Positivismus nach der Krone; sie wird ihm ebensowenig gereicht werden.



Niemand hat diesen steten Antagonismus tiefer empfunden als Goethe, der ihn durch sein ganzes Leben mit sich herumtrug und ihm in den verschiedensten Formen unübertrefflichen Ausdruck verlieh. Seine Überwindung suchte er durch den Emporstieg zum Begriff der Ganzheit, dessen Einführung beiden Auffassungen Rechnung zu tragen erlaubt. Freilich war auch Goethes umfassender Geist zeitbedingt. Da er von einer Trennung der Lichtstrahlen im Außenraum von der Lichtempfindung im Bewußtsein nichts wissen wollte, so vermochte er es nicht, den damaligen glänzenden Fortschritten der physikalischen Optik gerecht zu werden. Aber heute würde er doch die Einordnung der Ganzheitsidee in die Physik als eine prinzipielle Bestätigung seiner physikalischen Denkweise deuten können.

So zeigt uns die Wissenschaft, wie uns das schon oben gelegentlich entgegengetreten ist, im tiefsten Innern einen irrationalen Kern, der sich durch keinen Scharfsinn auflösen oder, wie das jetzt wieder häufig versucht wird, durch keine passende Einschränkung der Aufgaben der Wissenschaft wegdefinieren läßt. Wem das verwunderlich oder unbefriedigend vorkommen sollte, der möge bedenken, daß es eigentlich gar nicht anders sein kann. Denn bei näherer Betrachtung ist unschwer einzusehen, daß eine jede Wissenschaft, ob Naturoder Geisteswissenschaft, ihre Aufgabe genau genommen gar nicht am Anfang, sondern sozusagen in der Mitte angreift, und daß sie sich von da aus erst mehr oder weniger mühsam zum Anfang hintasten muß, ohne die Aussicht, ihn jemals vollständig zu erreichen. Die Wissenschaft findet ja die Begriffe, mit denen sie arbeitet, nicht fertig vor, sondern sie muß sie sich erst künstlich schaffen und kann sie nur allmählich vervollkommnen. Sie schöpft aus dem Leben und sie wirkt wieder zurück auf das Leben. Und sie empfängt ihren Antrieb, ihren Zusammenhalt und ihr Gedeihen aus den Ideen, die in ihr herrschen. Die Ideen sind es, welche dem Forscher die Probleme stellen, welche ihn unablässig zur Arbeit treiben und welche ihm die Augen öffnen, um die

gefundenen Resultate richtig zu deuten. Ohne Ideen wird die Forschung planlos, und die auf sie gewendete Energie verpufft ins Leere. Erst die Ideen machen den Experimentator zum Physiker, den Chronisten zum Historiker, den Handschriftenexperten zum Philologen. Dabei kommt es, wie wir gesehen haben, nicht immer allein auf die Frage an, ob eine Idee wahr oder falsch ist, ja ob sie überhaupt einen deutlich angebbaren Sinn besitzt, sondern vielmehr darauf, daß sie fruchtbare Arbeit erzeugt. Denn die Arbeit ist, wie auf allen Gebieten der Kulturentwicklung, so auch auf dem der Wissenschaft, das einzige untrügliche Kriterium für die Gesundheit und den Erfolg, sowohl im Leben des einzelnen als auch in dem der Gesamtheit. Solange unser deutsches Volk an der Arbeit ist, aber auch nur dann, brauchen wir trotz aller Nöte der Gegenwart an einer besseren Zukunft nicht zu zweifeln. Darum möchte ich unsere Betrachtungen über den Ursprung und die Auswirkung wissenschaftlicher Ideen ausklingen lassen in ein Wort, das den Segen der Arbeit an der Wissenschaft preist, ein Wort, das auch der Verein Deutscher Ingenieure in weiser Würdigung seiner prinzipiellen und praktischen Bedeutung als Wahlspruch auf seine Fahne geschrieben hat, das Wort: „Forschung tut not."

DRUCK DER SPAMER A.-G. IN LEIPZIG

*MAX PLANCK*

**EINFÜHRUNG**
**IN DIE THEORETISCHE PHYSIK**

*Zum Gebrauch bei Vorträgen sowie zum Selbstunterricht*
*Jeder Band mit einem Verzeichnis der Definitionen*
*und wichtigsten Sätze*

*I. Band:* Einführung in die allgemeine Mechanik
4. Auflage. 1928. VIII, 226 Seiten mit 43 Figuren. 8°.
Broschiert RM. 6.—, Leinen RM. 8.—

*II. Band:* Einführung in die Mechanik deformierbarer Körper.
3. Auflage. 1931. VI, 194 Seiten mit 12 Figuren. 8°.
Broschiert RM. 6.—, Leinen RM. 8.—

*III. Band:* Einführung in die Theorie der Elektrizität und des Magnetismus.
2. Auflage. 1928. VI, 210 Seiten mit 12 Figuren. 8°.
Broschiert RM. 6.—, Leinen RM. 8.—

*IV. Band:* Einführung in die theoretische Optik.
2. Auflage. 1931. VIII, 184 Seiten mit 24 Figuren. 8°.
Broschiert RM. 6.—, Leinen RM. 8.—

*V. Band:* Einführung in die Theorie der Wärme.
VIII, 251 Seiten mit 7 Figuren. 8°. 1930. Broschiert RM. 8.—, Leinen RM. 10.—

*Die Naturwissenschaften:* Ein Buch wie dieses, das von dem berühmten Meister auf dem behandelten Gebiet geschrieben wurde, bedarf nur der Anzeige, aber keiner empfehlenden Besprechung. Dem Referenten erscheint es als ein Fundamentalwerk, in dem in knapper Form unser heutiges Wissen von diesem Fach dargestellt wird.

*Ein ausführlicher Prospekt steht zur Verfügung*

VERLAG VON S. HIRZEL IN LEIPZIG

## Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie

Von Prof. Dr. W. HEISENBERG

VIII, 117 Seiten mit 22 Abbildungen. 8°. 1930. Br. RM. 6.30, Leinen RM. 7.60

*Max Born, Göttingen:* Wer bereits in die Elemente eingedrungen ist, wird aus Heisenbergs Buch außerordentlich viel lernen können. Einzelne Abschnitte sind kleine Kunstwerke der gedanklichen Durchdringung physikalischer Zusammenhänge.

*Deutsche Literaturzeitung:* Heisenbergs Buch gehört zu denjenigen „klassischen" Werken, welche die Denkweise einer ganzen Generation neu gestalten oder wenigstens in ihrer Neuartigkeit niederlegen.

## Die Prinzipien der Quantenmechanik

Von Prof. Dr. P. A. M. DIRAC. Deutsch von Dr. W. Bloch.

VIII, 280 Seiten. Gr.-8°. 1930. Br. RM. 16.20, Leinen RM. 18.—

*Erwin Fues, Hannover:* Die Diracschen Arbeiten zur Quantenmechanik sind im höchsten Maße befruchtend gewesen. Der wesentliche Kern der neuen Ideen tritt durch seine überlegene Urteils- und Darstellungskraft mit zwingender Klarheit hervor. Das Studium des Buches wird durch eine großartige Schau über die Anwendungen der Quantenmechanik belohnt. Die verständnisvolle Übersetzung hat den eigenartig abstrakten und fließenden Stil sinngetreu bewahrt. Manche Freiheiten der Übertragung und kleine Anmerkungen erleichtern dem deutschen Leser das Verständnis. Zusammen mit den Büchern von Heisenberg und Weyl ist dieses Werk z. Zt. der bedeutungsvollste Niederschlag der jüngsten physikalischen Entwicklung.

## Gruppentheorie und Quantenmechanik

Von Prof. Dr. H. WEYL

2. Aufl. 366 Seiten. Gr.-8°. 1931. Br. RM. 21.60, Leinen RM. 23.40

*W. Heisenberg, Leipzig, in der Deutschen Literaturzeitung:* Die Quantenmechanik der Mehrkörperprobleme führte die Physiker zu mathematischen Schwierigkeiten, die nur mit Hilfe der Gruppentheorie zu überwinden waren. Die klare und formal oft außerordentlich elegante Behandlung des schwierigen und für Mathematiker wie Physiker ja einigermaßen neuen Gegenstandes zeugt von souveräner Beherrschung der mathematischen wie der physikalischen Seite der diskutierten Probleme: die Darstellung ist meisterhaft. Die zweite Auflage unterscheidet sich von der ersten durch die Erweiterung und Umarbeitung der drei letzten Kapitel, die unter dem Gesichtspunkt vorgenommen wurde, das Studium der abstrakten gruppentheoretischen Zusammenhänge zu erleichtern und dem Verständnis des Physikers näherzubringen.

*Ausführlicher Prospekt steht zur Verfügung*

VERLAG VON S. HIRZEL IN LEIPZIG

## Elektrolyte

Von Prof. Dr. H. FALKENHAGEN

346 Seiten mit 104 Abbild. Gr.-8°. Herbst 1932. Br. RM. 23.—, Leinen RM. 24.80

*Prof. Dr. P. Debye:* Es ist offenbar der Zeitpunkt gekommen, die bisherige Entwicklung der Elektrolytforschung im Zusammenhange und von einem einheitlichen Standpunkte aus darzustellen. Das ist in der vorliegenden Monographie geschehen, und ich begrüße es dankbar, daß ein Kenner wie Falkenhagen, der selbst so wertvolle Beiträge zum Ausbau der Theorie lieferte, sich dieser nicht geringen Mühe unterzogen hat.

## Leipziger Vorträge 1933: Magnetismus

Herausgegeben von Prof. Dr. P. DEBYE

Unter Mitwirkung von Prof. Dr. P. Kapitza (Cambridge), Prof. Dr. W. Gerlach (München), Privatdozent Dr. H. Sack (Leipzig), Prof. Dr. O. Stern (Hamburg), Prof. Dr. H. Kramers (Utrecht), Prof. Dr. W. J. de Haas (Leiden), Prof Dr. H. Bethe (Tübingen), Prof. Dr. R. Becker (Berlin), Prof. Dr. R. Gans (Königsberg).

## Der Bau des Atomkerns und die Radioaktivität

Von Dr. G. GAMOW. Deutsch von C. und F. Houtermans.

148 Seiten, 41 Figuren, 37 Tabellen, 1 Tafel. 8°. Herbst 1931. Kart. RM. 10.—

*Physikalische Zeitschrift, 1932, Heft 3:* Das Erscheinen des Gamowschen Buches wird jeder, der sich mit Kernphysik beschäftigt, mit Freude begrüßen, denn es ist die erste theoretische Darstellung derjenigen Fragen der Kernphysik, die in den letzten Jahren einer Klärung zugeführt werden konnten.

## Elementare Einführung in die physikalische Statistik

### insbesondere in die Theorie des metallischen Zustandes

Von Dr. K. K. DARROW. Deutsch von Dr. E. Rabinowitsch.

112 Seiten mit 3 Abbildungen. 8°. 1931. Kart. RM. 6.—

*Max Born, Göttingen:* Ich kann das Studium dieses Büchleins aufs wärmste empfehlen. Die Grundgedanken, welche die neuen statistischen Theorien von der sogenannten klassischen unterscheiden, kommen prägnant zum Ausdruck, ohne daß ein großer mathematischer Apparat in Bewegung gesetzt wird. Im Mittelpunkt steht die Anwendung der statistischen Methoden auf die Elektronentheorie der Metalle, und in der Tat ist ja die Bedeutung der Metalle und ihrer elektrischen Eigenschaften für Physik, Chemie und Technik ungeheuer.

VERLAG VON S. HIRZEL IN LEIPZIG

## Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften

Von Prof. Dr. BERNHARD BAVINK

5. Auflage 1933. 628 Seiten, 88 Abbildungen, 1 Tafel. Gr.-8°. Broschiert RM. 15.—, Ganzleinen RM. 16.80

I. Kraft und Stoff. II. Weltall und Erde. III. Materie und Leben. IV. Natur und Mensch.

*Kolloid-Zeitschrift:* Mit dem Gefühl reichsten Beschenktseins lege ich Bavinks Werk endlich beiseite — jedoch so, daß es immer gleich greifbar ist. Der Verfasser ist gleich stark als Physiker, Chemiker, Astronom, Biologe und manches andere. Er schreibt klar und knapp und so spannend, daß ich das Recht des Kritikers, hier und da Seiten zu überschlagen, im Abschnitt über „Kraft und Stoff" nicht ausnutzen konnte. Bisher hatte ich nicht geahnt, daß sich die letzten Fortschritte der Elektrotechnik, der Bohrschen Spektraltheorie, der Wellenmechanik usw. so fast ganz ohne Mathematik darstellen lassen würden. Wo ist nun die Grenze zwischen Physik und Philosophie? Auch dort, wo der Verfasser ausgesprochen philosophisches Gebiet betrat, mußte ich mit. An seiner Philosophie der Kolloidchemie im ersten Abschnitt habe ich durchaus nichts auszusetzen. Nicht reden kann ich in einer kurzen Besprechung über sein Rassenproblem, die Eugenik, die Philosophie der Technik und manches andere. Ich stehe auch zu stark unter dem Eindruck der ersten Abschnitte.

R. E. Liesegang

## Philosophische Gegenwartsfragen

Von Prof. Dr. HANS DRIESCH

184 Seiten. 8°. 1933. Brosch. RM. 5.—, Ganzleinen RM. 6.80

I. Intuition und Positivismus; mit einem Anhang: Die Phänomenologie und ihre Vieldeutigkeit. — II. Studien über Ganzheit; mit einem Kapitel: Ganzheit und Kausalität. — III. Logische Probleme: 1. Die Basis der Erkenntnistheorie. 2. Das „Sein". 3. Zum Freiheitsproblem. 4. Wissen und Handeln.

---

VERLAG VON S. HIRZEL IN LEIPZIG