

**Werner Heisenberg**  
**Physik und Philosophie**

ein Ullstein Buch

Ullstein Buch Nr. 249  
im Verlag Ullstein GmbH,  
Frankfurt/M – Berlin – Wien

Deutsche Originalausgabe

Umschlagentwurf: Kurt Weidemann

© 1959 by Werner Heisenberg

Alle Rechte, auch das der photomechanischen

Wiedergabe, vorbehalten

Printed in Germany 1977

Gesamtherstellung:

Eber, Ulm

ISBN 3 548 02249 9

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Einführung von Ruth Nanda Anshen.....	7
Vorwort.....	11
Kapitel I: Die Bedeutung der modernen Physik in unserer Zeit.....	13
Kapitel II: Die Geschichte der Quantentheorie.....	15
Kapitel III: Die Kopenhagener Deutung der Quanten- theorie.....	28
Kapitel IV: Die Quantentheorie und die Anfänge der Atomlehre.....	41
Kapitel V: Die Entwicklung der philosophischen Ideen seit Descartes im Vergleich zu der neuen Lage in der Quantentheorie.....	56
Kapitel VI: Die Beziehungen der Quantentheorie zu anderen Gebieten der modernen Natur- wissenschaft.....	72
Kapitel VII: Die Relativitätstheorie.....	87
Kapitel VIII: Kritik und Gegenvorschläge zur Kopen- hagener Deutung der Quantentheorie.....	104
Kapitel IX: Die Quantentheorie und die Struktur der Materie.....	119
Kapitel X: Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik.....	139
Kapitel XI: Die Rolle der modernen Physik in der gegenwärtigen Entwicklung des menschl- lichen Denkens.....	156
Einführung in die Probleme der Naturphilosophie von F. S. C. Northrop.....	175

kann. Mathematisch können wir sie durch die Forderung aussprechen, daß das grundlegende Naturgesetz für die Materie gegenüber gewissen Transformationsgruppen invariant sein sollte. Diese Transformationsgruppen sind der einfachste mathematische Ausdruck für die Symmetrieeigenschaften. Sie treten in der modernen Physik an die Stelle der Platonischen Körper. Die wichtigsten seien hier kurz aufgezählt:

Die Gruppe der sogenannten Lorentz-Transformationen charakterisiert die Struktur von Raum und Zeit, die in der speziellen Relativitätstheorie aufgedeckt worden ist.

Eine von Pauli und Gürsey untersuchte Gruppe entspricht in ihrer Struktur der Gruppe der dreidimensionalen räumlichen Drehungen — sie ist ihr isomorph, wie die Mathematiker sagen — und äußert sich im Auftreten einer Quantenzahl, die schon vor fünfundzwanzig Jahren empirisch an den Elementarteilchen entdeckt worden ist und den Namen »Isospin« erhalten hat.

Zwei weitere Gruppen, die sich formal wie die Gruppen der Drehungen um eine feste Achse verhalten, führen zu den Erhaltungssätzen für die Ladung, die Baryonenzahl und die Leptonenzahl.

Schließlich müssen die Naturgesetze noch invariant sein gegenüber gewissen Spiegelungsoperationen, die hier nicht im einzelnen aufgezählt werden sollen. Für diese Frage haben sich die Untersuchungen von Lee und Yang als ganz besonders wichtig und fruchtbar erwiesen, nach denen eine Größe, die man als Parität bezeichnet und für die man früher einen Erhaltungssatz angenommen hatte, in Wirklichkeit nicht erhalten bleibt.

Alle bisher bekannten Symmetrieeigenschaften lassen sich durch eine einfache Gleichung darstellen — damit ist gemeint: diese Gleichung ist gegenüber allen genannten Transformationsgruppen invariant —, und es ist daher denkbar, daß diese Gleichung schon die Naturgesetze für die Materie richtig darstellt. Aber die Entscheidung darüber ist noch nicht gefallen und wird erst im Laufe der Jahre durch eine genauere mathematische Analyse dieser Gleichung und durch den Vergleich mit dem in immer reicheren Maße gesammelten experimentellen Material gewonnen werden.

Aber auch abgesehen von dieser speziellen Möglichkeit wird man hoffen dürfen, durch das Zusammenwirken von Experimenten im Gebiet der Elementarteilchen höchster Energie mit der mathematischen Analyse eines Tages zu einem vollständigen Ver-

ständnis für die Einheit der Materie zu gelangen. Der Ausdruck »vollständiges Verständnis« würde bedeuten, daß die Formen der Materie — in dem Sinne, in dem etwa Aristoteles in seiner Philosophie diesen Terminus gebraucht hätte — als Ergebnisse, nämlich als Lösungen eines geschlossenen mathematischen Schemas erschienen, das die Naturgesetze für die Materie darstellt.

### Kapitel X

## SPRACHE UND WIRKLICHKEIT IN DER MODERNEN PHYSIK

Immer wieder in der Geschichte der Naturwissenschaften haben überraschende Entdeckungen und neue Ideen zu wissenschaftlichen Auseinandersetzungen geführt; sie haben polemische Veröffentlichungen entstehen lassen, die die neuen Ideen kritisieren, und solche Kritik ist oft für ihre Entwicklung durchaus nützlich gewesen. Aber diese Kontroversen haben fast nie vorher jenen Grad von Heftigkeit erreicht, den sie nach der Entdeckung der Relativitätstheorie, und in einem geringeren Grad auch nach der Quantentheorie, annahmen. In beiden Fällen sind die wissenschaftlichen Probleme schließlich sogar mit politischen Streitfragen verknüpft worden, und einige Physiker haben bei den politischen Methoden Zuflucht gesucht, um ihren Ansichten zum Sieg zu verhelfen. Diese heftige Reaktion auf die jüngste Entwicklung der modernen Physik kann man nur verstehen, wenn man erkennt, daß hier die Fundamente der Physik und vielleicht der Naturwissenschaft überhaupt in Bewegung geraten waren und daß diese Bewegung ein Gefühl hervorgerufen hat, als würde der Boden, auf dem die Naturwissenschaft steht, uns unter den Füßen weggezogen. Gleichzeitig bedeutete es aber doch wohl auch, daß man noch nicht die richtige Sprache gefunden hatte, in der man über die neue Situation sprechen konnte, und daß die ungenauen und zum Teil unkorrekten Behauptungen, die hier und dort in der Begeisterung über die neuen Entdeckungen veröffentlicht worden sind, alle Arten von Mißverständnissen hervorgerufen haben. Hier handelt es sich in der Tat um ein schwieriges, grund-

sätzliches Problem. Die verbesserte experimentelle Technik unserer Zeit bringt ganz neue Seiten der Natur in das Blickfeld der Naturwissenschaft, Seiten, die mit den Begriffen des täglichen Lebens oder auch nur der früheren Physik nicht beschrieben werden können. Aber in welcher Sprache sollten sie dann beschrieben werden?

Die erste Sprache, die aus dem Prozeß der wissenschaftlichen Klärung gewonnen wird, ist in der theoretischen Physik gewöhnlich eine mathematische Sprache; nämlich das mathematische Schema, das den Physikern erlaubt, die Resultate zukünftiger Experimente vorherzusagen. Der Physiker mag damit zufrieden sein, daß er das mathematische Schema besitzt und weiß, wie er es für die Deutung seiner Versuche anwenden kann. Aber er muß über seine Ergebnisse ja auch zu Nichtphysikern sprechen, die nicht zufriedenen sind, solange ihnen nicht eine Erklärung auch in der gewöhnlichen Sprache gegeben wird, in der Sprache, die von jedermann verstanden werden kann. Auch für den Physiker ist die Möglichkeit einer Beschreibung in der gewöhnlichen Sprache ein Kriterium für den Grad des Verständnisses, das in dem betreffenden Gebiet erreicht worden ist.

In welchem Umfange ist ein solche Beschreibung überhaupt möglich? Kann man z. B. über das Atom selbst sprechen? Das ist ebensowehr ein sprachliches wie ein physikalisches Problem, und daher müssen zunächst einige Bemerkungen über die Sprache im allgemeinen und insbesondere über die wissenschaftliche Sprache eingeschoben werden.

Die Sprache ist in einer prähistorischen Zeit von der menschlichen Rasse gebildet worden als ein Mittel zur Verständigung und als Grundlage für das Denken. Wir wissen wenig über die verschiedenen Schritte zu ihrer Bildung. Aber jedenfalls enthält die Sprache jetzt eine große Anzahl von Begriffen, die als ein zweckmäßiges Werkzeug für eine mehr oder weniger unzweideutige Verständigung über Vorgänge des täglichen Lebens betrachtet werden können. Diese Begriffe sind allmählich durch den Gebrauch der Sprache ohne kritische Analyse erworben worden, und wenn wir ein Wort hinreichend oft gebraucht haben, so glauben wir mehr oder weniger genau zu wissen, was es bedeutet. Natürlich ist es eine wohlbekannte Tatsache, daß die Wörter nicht so klar definiert sind, wie es im ersten Augenblick scheinen mag, und daß sie nur einen begrenzten Anwendungsbereich besitzen; z. B.

können wir über ein Stück Holz oder ein Stück Eisen sprechen, aber wir können nicht über ein Stück Wasser sprechen. Das Wort »Stück« läßt sich nicht auf flüssige Körper anwenden. Oder um ein anderes Beispiel zu erwähnen: In Erörterungen über die Begrenzung von Begriffen pflegt Bohr gern die folgende Geschichte zu erzählen: Ein kleiner Junge kommt in einen Kaufladen mit einem Pfennig in seiner Hand und fragt: »Könnte ich für einen Pfennig gemischte Bonbons bekommen?« Der Kaufmann nimmt zwei Bonbons aus seinem Kasten, gibt sie dem Jungen und sagt: »Mischen kannst du sie dir selber.« Ein etwas ernsthafteres Beispiel für die problematischste Beziehung zwischen den Worten und den Begriffen ist die Tatsache, daß die Wörter »rot« und »grün« auch von Leuten verwendet werden, die farbenblind sind, obwohl hier offensichtlich die Anwendungsgrenzen dieser Wörter für den Farbenblinden ganz anders verlaufen müssen als für andere Leute.

Diese prinzipielle Unsicherheit in der Bedeutung von Worten ist natürlich sehr früh erkannt worden und hat den Wunsch nach Definitionen hervorgerufen, d. h., wie das Wort »Definition« sagt, nach dem Festsetzen von Grenzen, die bestimmen, wo das Wort verwendet werden kann und wo nicht. Aber Definitionen können natürlich nur mit Hilfe anderer Begriffe gegeben werden, und schließlich muß man sich doch auf einige Begriffe verlassen, die genommen werden, so wie sie sind, unanalysiert und undefiniert.

In der griechischen Philosophie war das Problem der Begriffe in der Sprache eines der wichtigsten Themen seit Sokrates, dessen Leben, wenn wir Platons künstlerischer Darstellung in seinen Dialogen folgen können, eine ständige Diskussion über den Inhalt der sprachlichen Begriffe und über die Grenzen unserer Ausdrucksmittel war. Um eine feste Grundlage für das wissenschaftliche Denken zu schaffen, hat es Aristoteles in seiner »Logik« unternommen, die Formen der Sprache zu analysieren, die formale Struktur von Schlüssen und Ableitungen unabhängig von ihrem Inhalt zu untersuchen. In dieser Weise hat er einen Grad von Abstraktion und Genauigkeit erreicht, der bis dahin in der griechischen Philosophie unbekannt war, und er hat dadurch im höchsten Maße zur Klärung beigetragen, zur Aufrichtung einer gewissen Ordnung in unserer Methode des Denkens. Er hat tatsächlich die Grundlage für die wissenschaftliche Sprache geschaffen. Andererseits bringt die logische Analyse der Sprache auch die Gefahr einer zu großen Vereinfachung mit sich. In der Logik wird

die Aufmerksamkeit auf spezielle sprachliche Strukturen gerichtet, auf unzweideutige Verknüpfungen zwischen Voraussetzungen und Folgerungen, auf einfache Muster des Schließens; alle anderen sprachlichen Strukturen werden vernachlässigt. Diese anderen Strukturen können sich z. B. durch Assoziationen zwischen gewissen Nebenbedeutungen von Wörtern ergeben; so kann etwa die sekundäre Bedeutung eines Wortes, die nur gewissermaßen im Halbdunkel durch unser Bewußtsein gleitet, wenn das Wort erklingt, doch wesentlich zum Inhalt eines Satzes beitragen. Die Tatsache, daß jedes Wort viele nur halb bewußte Bewegungen in unserem Denken hervorrufen kann, mag dazu benützt werden, gewisse Seiten der Wirklichkeit deutlicher in der Sprache darzustellen, als es mit Hilfe der logischen Schlußverfahren möglich wäre. Daher haben sich die Dichter oft gegen diese übertriebene Betonung der logischen Schlußverfahren in Sprache und Denken gewandt, die dazu führen kann, daß die Sprache weniger geeignet wird für den Zweck, für den sie ursprünglich erdacht ist. Man kann hier z. B. an die bekannten Worte erinnern, die in Goethes »Faust« Mephistopheles an den Schüler richtet:

»Gebraucht der Zeit, sie geht so schnell von hinnen,  
Doch Ordnung lehrt Euch Zeit gewinnen.

Mein teurer Freund, ich rat' Euch drum.

Zuerst Collegium logicum.

Da wird der Geist Euch wohl dressiert,

In spanische Stiefeln eingeschnürt,

Daß er bedächtiger so fortan

Hinschleiche die Gedankenbahn,

Und nicht etwa, die Kreuz und Quer',

Irrlichteriere hin und her.

Dann lehret man Euch manchen Tag,

Daß was Ihr sonst auf einen Schlag

Getrieben, wie Essen und Trinken frei,

Eins! Zwei! Drei! dazu nötig sei.

Zwar ist's mit der Gedankenfabrik

Wie mit einem Weber-Meisterstück,

Wo ein Tritt tausend Fäden regt,

Die Schifflein herüber-hinüber schießen.

Die Fäden ungesehen fließen,

Ein Schlag tausend Verbindungen schlägt:

Der Philosoph, der tritt herein  
Und beweist Euch, es müßt' so sein:  
Das Erst' wär' so, das Zweite so;  
Und drum das Dritt' und Vierte so;  
Und wenn das Erst' und Zweit' nicht wär',  
Das Dritt' und Viert' wär' nimmermehr.  
Das preisen die Schüler allerorten,  
Sind aber keine Weber geworden.  
Wer will was Lebendigs erkennen und beschreiben,  
Sucht erst den Geist herauszutreiben,  
Dann hat er die Teile in seiner Hand,  
Fehlt, leider! nur das geistige Band.«

Diese Stelle enthält eine bewundernswerte Beschreibung der Struktur der Sprache und eine berechtigte Kritik an der Enge der einfachen logischen Schlußverfahren.

Andererseits muß die Naturwissenschaft ja auf die Sprache als das einzige Mittel zur Verständigung begründet werden, und daher müssen hier, wo das Problem der Unzweideutigkeit von der größten Wichtigkeit ist, die logischen Schlußverfahren ihre Rolle spielen. Die charakteristische Schwierigkeit an dieser Stelle kann vielleicht in der folgenden Weise beschrieben werden: In der Naturwissenschaft versuchen wir das Spezielle aus dem Allgemeinen abzuleiten; das Einzelphänomen soll als Folge einfacher, allgemeiner Gesetze verstanden werden. Die allgemeinen Gesetze können, wenn sie sprachlich formuliert werden, nur einige wenige Begriffe enthalten, denn sonst wäre das Gesetz nicht einfach und allgemein. Aus diesen Begriffen muß nun eine unendliche Vielfalt von möglichen Erscheinungen hergeleitet werden, und zwar nicht nur qualitativ und ungenau, sondern mit größter Genauigkeit hinsichtlich jeder Einzelfrage. Es ist unmittelbar einzusehen, daß die Begriffe der gewöhnlichen Sprache, ungenau und unscharf definiert, wie sie sind, niemals eine solche Ableitung zulassen könnten. Wenn aus gegebenen Voraussetzungen eine Kette von Schlüssen hergeleitet werden soll, so hängt die Anzahl der möglichen Glieder in der Kette von der Genauigkeit der Voraussetzungen ab. In der Naturwissenschaft müssen daher die Grundbegriffe in den allgemeinen Gesetzen mit äußerster Präzision definiert werden, und das ist nur mit Hilfe der mathematischen Abstraktion möglich.

Auch in anderen Wissenschaften kann sich eine ähnliche Lage

ergeben, es können auch dort genaue Definitionen notwendig sein; z. B. in der Jurisprudenz. Aber hier braucht die Anzahl der Glieder in einer Schlusskette niemals sehr groß zu sein; daher ist eine völlige Präzision nicht notwendig, und einigermaßen genaue Definitionen mit Hilfe der Begriffe der gewöhnlichen Sprache sind meistens ausreichend.

In der theoretischen Physik versuchen wir, Gruppen von Erscheinungen zu verstehen, indem wir mathematische Symbole einführen, die zu den Tatsachen, nämlich zu den Ergebnissen von Messungen, in Beziehung gesetzt werden können. Für die Symbole gebrauchen wir Namen, die ihre Beziehung zur Messung sichtbar machen. Auf diese Weise sind also die Symbole mit der gewöhnlichen Sprache verknüpft. Dann aber werden die Symbole untereinander durch ein strenges System von Definitionen und Axiomen verknüpft, und schließlich werden die Naturgesetze als Gleichungen zwischen den Symbolen ausgedrückt. Die unendliche Vielfalt von Lösungen dieser Gleichungen entspricht dann der unendlichen Vielfalt einzelner Erscheinungen, die in diesem Gebiet der Natur möglich sind. In solcher Weise stellt das mathematische Schema die betrachtete Gruppe von Erscheinungen dar, soweit eben die Beziehung zwischen den Symbolen und den Messungen reicht. Diese Beziehung erlaubt dann auch, die Naturgesetze selbst in Begriffen der gewöhnlichen Sprache auszudrücken, da unsere Versuche, die aus Handlungen und Beobachtungen bestehen, immer in der gewöhnlichen Sprache beschrieben werden können.

Allerdings: mit dem Prozeß der Erweiterung unserer wissenschaftlichen Kenntnisse erweitert sich auch die Sprache. Neue Begriffe werden eingeführt, und die alten werden in einem weiteren Gebiet oder anders angewendet als bei ihrem Gebrauch in der gewöhnlichen Sprache. Solche Wörter wie Energie, Elektrizität, Entropie sind bekannte Beispiele. In dieser Weise entwickeln wir eine wissenschaftliche Sprache, die als eine natürliche Erweiterung der gewöhnlichen Sprache angesehen werden kann, eine Erweiterung, die zu den gewonnenen wissenschaftlichen Gebieten paßt.

Im vergangenen Jahrhundert ist eine Anzahl neuer Begriffe in die Physik eingeführt worden, und in einigen Fällen hat es eine beträchtliche Zeit gebraucht, bevor die Physiker sich wirklich an den Gebrauch dieser neuen Begriffe gewöhnt haben. Der Begriff »elektromagnetisches Feld« z. B., der bis zu einem gewissen Grad schon in Faradays Arbeiten enthalten war und der später die

Grundlage für die Maxwell'sche Theorie bildete, kam erst allmählich in Gebrauch bei den Physikern, die vorher ihre Aufmerksamkeit in erster Linie auf die mechanische Bewegung der Materie gerichtet hatten. Die Einführung dieses Begriffes war eben mit einer Änderung der wissenschaftlichen Grundvorstellungen verknüpft, und solche Änderungen können nie leicht vollzogen werden.

Trotzdem bildeten alle die Begriffe, die bis zum Ende des vergangenen Jahrhunderts in die Physik eingeführt worden waren, ein in sich geschlossenes System, das auf ein weites Feld von Experimenten angewendet werden konnte, und bildeten zusammen mit den früheren Begriffen eine Sprache, die nicht nur von den Wissenschaftlern, sondern auch von den Technikern und Ingenieuren mit Erfolg bei ihrer Arbeit angewendet werden konnte. Zu den grundlegenden Vorstellungen dieser Sprache gehörten die Annahmen, daß die Reihenfolge von Vorgängen in der Zeit völlig unabhängig sei von ihrer Anordnung im Raum, daß die Euklidische Geometrie im wirklichen Raum gelte und daß die Vorgänge in Raum und Zeit geschehen unabhängig davon, ob sie beobachtet werden oder nicht. Es wurde natürlich nicht bestritten, daß jede Beobachtung einen gewissen Einfluß auf die Erscheinung ausübt, die beobachtet werden soll, aber es wurde allgemein angenommen, daß man durch eine hinreichend vorsichtige Ausführung der Experimente diesen Einfluß schließlich beliebig klein machen könnte. Dies erschien in der Tat als eine notwendige Bedingung für die Verwirklichung des Ideals von Objektivität, das als die Grundlage für alle Naturwissenschaft galt.

In diesen einigermaßen friedlichen Zustand der Physik brachen die Quantentheorie und die spezielle Relativitätstheorie ein als eine plötzliche, zunächst langsame und dann allmählich schneller werdende Bewegung in den Fundamenten der Naturwissenschaft. Die ersten heftigen Diskussionen entflammten sich an den Problemen von Raum und Zeit, die durch die Relativitätstheorie aufgeworfen worden waren. Wie sollte man über die neue Situation sprechen? Sollte man die Lorentz-Kontraktion bewegter Körper als ein wirkliche Kontraktion oder nur als eine scheinbare Kontraktion ansehen? Sollte man sagen, daß die Struktur von Raum und Zeit wirklich verschieden war von der, die man früher angenommen hatte, oder sollte man nur sagen, daß die experimentellen Ergebnisse bei ihrer theoretischen Deutung mathematisch in einer solchen Weise verknüpft werden sollten, wie es dieser

neuen Struktur entsprach, während Raum und Zeit als die allgemeinen Anschauungsformen, in denen wir die Welt wahrnehmen, bleiben, was sie immer gewesen sind. Das wirkliche Problem hinter diesen vielen strittigen Fragen war die Tatsache, daß es keine Sprache gab, in der man widerspruchsfrei über die neue Situation reden konnte. Die gewöhnliche Sprache beruhte ja auf den alten Begriffen von Raum und Zeit, und diese Sprache allein bildete das Mittel zu einer unzweideutigen Verständigung über die Anordnung und die Ergebnisse von Messungen. Gleichzeitig aber zeigten die Experimente, daß die alten Begriffe nicht überall angewendet werden konnten.

Der naturgegebene Ausgangspunkt für die Deutung der Relativitätstheorie war daher der Umstand, daß in dem Grenzfall sehr kleiner Geschwindigkeiten (Geschwindigkeiten, die klein sind im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit) die neue Theorie mit der früheren praktisch identisch war. Daher war es in diesem Teil der Theorie selbstverständlich, wie man die mathematischen Symbole zu interpretieren hatte, wie man sie in Beziehung setzen sollte zu den Versuchen und zu den Begriffen der gewöhnlichen Sprache. Tatsächlich war hier nur vermittelt dieser Beziehung die Lorentz-Transformation schon früher getunden worden. Es gab also in diesem Gebiet keine Unklarheit über die Bedeutung von Wörtern und Symbolen. Diese Beziehung reichte schon aus, um die Theorie auf das ganze experimentelle Gebiet anzuwenden, das mit dem Problem der Relativität verknüpft war. Daher hatten die strittigen Fragen über die »wirkliche« oder »scheinbare« Lorentz-Kontraktion oder über die Bedeutung des Wortes »gleichzeitig« usw. nichts mit den Tatsachen, sondern nur mit der Sprache zu tun.

Hinsichtlich der Sprache andererseits hat man im Laufe der Zeit erkannt, daß man vielleicht nicht zu streng auf bestimmten Prinzipien bestehen sollte. Es ist immer schwierig, allgemein überzeugende Kriterien dafür zu finden, welche Begriffe in der Sprache benutzt werden dürfen und wie man sie benutzen sollte. Es ist vielleicht richtiger und einfacher, auf die Entwicklung der Sprache zu warten, die sich nach einiger Zeit von selbst der neuen Situation anpaßt. Tatsächlich hat sich z. B. in der speziellen Relativitätstheorie diese Anpassung bereits in einem großen Ausmaß in den letzten fünfzig Jahren vollzogen. Z. B. ist die Unterscheidung zwischen »wirklicher« oder »scheinbarer« Lorentz-Kontraktion einfach verschwunden. Das Wort »gleichzeitig« wird im all-

gemeinen so benutzt, wie es der von Einstein seinerzeit gegebenen Definition entspricht, während für die etwas weitere Definition, die in einem früheren Kapitel dieses Buches erörtert wurde, der Ausdruck »in raumartigem Abstand« in Gebrauch ist usw.

In der allgemeinen Relativitätstheorie wurde der Gedanke an eine nichteuklidische Geometrie im wirklichen Raum durch einige Philosophen aufs heftigste bekämpft, da darauf hingewiesen werden konnte, daß schon die Art, wie wir unsere Experimente ausführen, die Euklidische Geometrie voraussetzt.

Wenn z. B. ein Mechaniker versucht, eine vollständig ebene Oberfläche herzustellen, so kann er das in der folgenden Weise tun: Er stellt zunächst drei solche Flächen her, ungefähr von gleicher Größe, die ungefähr eben sind. Dann legt er je zwei dieser Oberflächen in verschiedenen relativen Lagen aufeinander. Der Grad, bis zu dem nun eine Berührung an allen Stellen der Fläche möglich ist, kann als Maß für die Genauigkeit gelten, mit der die Flächen als eben betrachtet werden können. Der Mechaniker wird mit den drei Flächen nur dann zufrieden sein, wenn die Berührung zwischen je zweien von ihnen an allen Punkten gleichzeitig stattfindet. Wenn dies gelungen ist, so kann man mathematisch beweisen, daß auf den drei Ebenen die Euklidische Geometrie gelten muß. In dieser Weise, so wurde z. B. von Dingler argumentiert, wird schon durch unsere eigenen Maßnahmen dafür gesorgt, daß die Euklidische Geometrie gilt.

Vom Standpunkt der allgemeinen Relativitätstheorie aus kann man natürlich hier antworten, daß das erörterte Argument nur die Gültigkeit der Euklidischen Geometrie in kleinen Dimensionen beweist, nämlich in den Dimensionen unserer experimentellen Ausrüstung. Die Genauigkeit, mit der hier die Euklidische Geometrie gilt, ist in der Tat so hoch, daß der oben beschriebene Prozeß zur Herstellung ebener Oberflächen immer ausgeführt werden kann. Die außerordentlich kleinen Abweichungen von der Euklidischen Geometrie, die es auch in diesem Gebiet noch gibt, werden nicht bemerkt werden, da die Oberflächen aus einem Material gemacht sind, das nicht absolut starr ist, sondern kleine Deformationen zuläßt, und da auch der Begriff »Berührung« nicht mit vollständiger Genauigkeit definiert werden kann. Für Flächen von kosmischer Größenordnung würde der beschriebene Prozeß eben gar nicht ausgeführt werden können. Aber das ist auch nicht ein Problem der experimentellen Physik.

Der naturgegebene Ausgangspunkt für die physikalische Deutung des mathematischen Schemas der allgemeinen Relativitätstheorie ist wieder die Tatsache, daß die Geometrie in kleinen Dimensionen nahezu euklidisch ist. Die Theorie nähert sich der klassischen Theorie in diesem Gebiet an. Daher gibt es hier eine eindeutige Verbindung zwischen den mathematischen Symbolen, den Messungen und den Begriffen der gewöhnlichen Sprache. Trotzdem kann in ganz großen Dimensionen eine nichteuklidische Geometrie die physikalisch richtige sein. Tatsächlich ist schon lange Zeit, bevor die allgemeine Relativitätstheorie entwickelt wurde, die Möglichkeit einer nichteuklidischen Geometrie im wirklichen Raum bei den Mathematikern diskutiert worden, besonders von Gauß in Göttingen. Als Gauß sehr genaue geodätische Vermessungsarbeiten an einem Dreieck ausführte, das aus drei Bergen: dem Brocken im Harz, dem Inselberg in Thüringen und dem Hohen Hagen bei Göttingen gebildet wird, soll er auch sehr sorgfältig nachgeprüft haben, ob die Summe der drei Winkel im Dreieck tatsächlich 180 Grad beträgt; er hat eine Abweichung für möglich gehalten, die dann die Abweichung von der Euklidischen Geometrie bewiesen hätte. Tatsächlich konnte er aber innerhalb der Genauigkeit seiner Messungen keine Abweichungen finden.

In der allgemeinen Relativitätstheorie hat sich die Sprache, in der wir die allgemeinen Gesetze beschreiben, weitgehend der wissenschaftlichen Sprache der Mathematiker angepaßt, und für die Beschreibung der Versuche selbst verwendet man wie immer die gewöhnlichen Begriffe, da ja die Euklidische Geometrie in kleinen Dimensionen mit genügender Genauigkeit gilt.

Das schwierigste Problem hinsichtlich des Gebrauchs der Sprache wird aber durch die Quantentheorie gestellt. Hier gibt es zunächst keinen einfachen Leitfaden, der uns erlaubte, die mathematischen Symbole mit den Begriffen der gewöhnlichen Sprache zu verknüpfen. Das einzige, was man zu Beginn weiß, ist die Tatsache, daß unsere gewöhnlichen Begriffe auf die Struktur des Atoms nicht angewendet werden können. Wieder würde man als den naturgegebenen Ausgangspunkt für die physikalische Deutung des Formalismus die Tatsache ansehen können, daß das mathematische Schema der Quantenmechanik dem der klassischen Mechanik sich in Dimensionen annähert, die groß sind verglichen mit der Ausdehnung der Atome. Aber selbst diese Behauptung kann nur mit einigen Vorbehalten ausgesprochen werden. Auch in großen

Dimensionen gibt es viele Lösungen der quantentheoretischen Gleichungen, zu denen analoge Lösungen im Gebiet der klassischen Physik nicht gefunden werden können. In solchen quantentheoretischen Lösungen würde die früher besprochene Interferenz der Wahrscheinlichkeiten in Erscheinung treten, die es in der klassischen Physik gar nicht gibt. Deshalb ist selbst im Grenzfall sehr großer Dimensionen die Beziehung zwischen den mathematischen Symbolen auf der einen, den Messungen und den gewöhnlichen Begriffen auf der anderen Seite keineswegs trivial. Um zu einer solchen eindeutigen Beziehung zu gelangen, muß man noch einen zweiten Zug des Problems in Betracht ziehen. Man muß berücksichtigen, daß das System, das nach den Methoden der Quantenmechanik behandelt werden soll, in Wirklichkeit ein Teil eines sehr viel größeren Systems, eventuell der ganzen Welt ist. Es steht in Wechselwirkung mit diesem größeren System, und wir müssen hinzufügen, daß die mikroskopischen Eigenschaften des größeren Systems wenigstens in einem erheblichen Umfang unbekannt sind. Diese Formulierung beschreibt zweifellos die praktisch vorliegende Situation richtig; denn das System könnte gar nicht der Gegenstand von Messungen und theoretischen Untersuchungen sein, es würde tatsächlich überhaupt nicht zur Welt der Erscheinungen gehören, wenn keine Wechselwirkung es mit einem größeren System verbände, von dem der Beobachter ein Teil ist. Die Wechselwirkung mit diesem größeren System mit seinen weitgehend unbekanntem mikroskopischen Eigenschaften führt dann ein neues statistisches Element in die Beschreibung ein — und zwar sowohl in die quantentheoretische als auch in die klassische Beschreibung —, das bei dem betrachteten System berücksichtigt werden muß. Im Grenzfall großer Dimensionen zerstört dieses statistische Element die Wirkung der Interferenz der Wahrscheinlichkeit in einem solchen Maße, daß jetzt das quantenmechanische Schema sich wirklich dem der klassischen Physik annähert. An dieser Stelle kann man daher eine eindeutige Verbindung zwischen den mathematischen Symbolen der Quantentheorie und den Begriffen der gewöhnlichen Sprache herstellen, und diese Beziehung genügt auch tatsächlich für die Deutung der Versuche. Was übrig bleibt, sind Probleme, die wieder eher die Sprache als die Tatsachen betreffen, da es ja zu dem Begriff »Tatsache« gehört, daß sie in der gewöhnlichen Sprache beschrieben werden können.

Aber die Probleme der Sprache sind hier doch sehr ernsthafter



Natur. Wir wollen in irgendeiner Weise über die Struktur eines Atoms sprechen und nicht etwa nur über die Tatsachen — zu denen etwa schwarze Punkte auf einer photographischen Platte oder Was-sertröpfchen in einer Nebelkammer gehören. Aber wir können in der gewöhnlichen Sprache nicht über die Atome selbst reden.

Die Analyse kann nun in zwei ganz entgegengesetzten Richtungen fortgesetzt werden. Man kann entweder fragen, welche Spreidweise über die Atome sich in den dreißig Jahren seit der Formulierung der Quantenmechanik tatsächlich unter den Physikern eingebürgert hat. Oder man kann die Versuche zur Definition einer präzisen wissenschaftlichen Sprache beschreiben, die dem mathematischen Schema der Quantentheorie entspricht.

Als Antwort auf die erste Frage kann man hervorheben, daß der Begriff der Komplementarität, der von Bohr in die Deutung der Quantentheorie eingeführt worden ist, die Physiker dazu ermutigt hat, lieber eine zweideutige, statt eine eindeutige Sprache zu benutzen; also die klassischen Begriffe in einer etwas ungenauen Art zu gebrauchen, die zu den Unbestimmtheitsrelationen paßt, abwechselnd verschiedene klassische Begriffe zu verwenden, die zu Widersprüchen führen würden, wenn man sie gleichzeitig anwenden wollte. So spricht man etwa über Elektronenbahnen, über Materiewellen und Ladungsdichte, über Energie und Impuls usw., bleibt sich dabei aber immer der Tatsache bewußt, daß diese Begriffe nur einen sehr begrenzten Anwendungsbereich besitzen. Sobald dieser vage und unsystematische Gebrauch der Sprache zu Schwierigkeiten führt, muß sich der Physiker in das mathematische Schema zurückziehen und dessen eindeutige Verknüpfung mit den experimentellen Tatsachen benutzen.

Diese Verwendung der Sprache ist in mancherlei Weise recht befriedigend, da sie uns an einen ähnlichen Gebrauch der Sprache im täglichen Leben oder in der Dichtung erinnert. Wir stellen fest, daß die Situation der Komplementarität keineswegs auf die Welt der Atome beschränkt ist. Wir treffen sie etwa an, wenn wir über eine Entscheidung und über die Motive für unsere Entscheidung reflektieren oder wenn wir etwa die Wahl haben zwischen dem Gebrauch von Musik und der Analyse ihrer Struktur. Andererseits, wenn man die klassischen Begriffe in dieser Weise verwendet, so behalten sie immer eine gewisse Unbestimmtheit, sie erwerben in ihrer Beziehung zur Wirklichkeit nur dieselbe statistische Bedeutung wie etwa die Begriffe der klassischen Wärmelehre in ihrer statisti-

schen Interpretation. Deshalb mag hier eine kurze Diskussion der statistischen Begriffe der Thermodynamik nützlich sein.

Der Begriff »Temperatur« in der klassischen Wärmelehre scheint einen objektiven Zug der Wirklichkeit zu beschreiben, eine objektive Eigenschaft der Materie. Im täglichen Leben ist es ganz leicht, mit Hilfe eines Thermometers zu definieren, was wir mit der Behauptung meinen, daß ein Stück Materie eine gewisse Temperatur habe. Aber wenn wir definieren wollen, was die Temperatur eines Atoms bedeuten könnte, so sind wir, selbst, wenn wir hierbei von der klassischen Physik ausgehen, in einer sehr viel schwierigeren Lage. Tatsächlich können wir diesen Begriff »Temperatur des Atoms« nicht mit irgendeiner wohldefinierten Eigenschaft des Atoms in Verbindung bringen; sondern wir müssen ihn bis zu einem gewissen Grade mit unserer unzureichenden Kenntnis des Atoms verknüpfen. Wir können den Wert der Temperatur zu gewissen statistischen Erwartungswerten über die Eigenschaften des Atoms in Beziehung setzen, aber man wird zweifeln können, ob ein solcher Erwartungswert objektiv genannt werden sollte. Der Begriff »Temperatur des Atoms« ist nicht viel besser definiert als der Begriff »mischen« in der Geschichte über den kleinen Jungen, der gemischte Bonbons kaufte.

In ähnlicher Weise sind in der Quantentheorie alle klassischen Begriffe, wenn man sie auf das Atom anwendet, ebensowohl und ebensowenig definiert wie die »Temperatur des Atoms«, sie sind mit statistischen Erwartungen verknüpft; nur in seltenen Fällen können die Erwartungen nahezu an Sicherheit grenzen. Wieder ist es ähnlich wie in der klassischen Wärmelehre schwierig, die Erwartung objektiv zu nennen. Man mag sie eine objektive Tendenz oder Möglichkeit nennen, eine »Potentia« im Sinne der Aristotelischen Philosophie. In der Tat glaube ich, daß die Sprache, die bei den Physikern gebräuchlich ist, wenn sie über Atomvorgänge sprechen, in ihrem Denken ähnliche Vorstellungen hervorruft wie der Begriff »Potentia«. So haben sich die Physiker allmählich wirklich daran gewöhnt, die Elektronenbahnen und ähnliche Begriffe nicht als eine Wirklichkeit, sondern eher als eine Art von »Potentia« zu betrachten. Die Sprache hat sich, wenigstens in einem gewissen Ausmaße, schon an die wirkliche Lage angepaßt. Aber es ist nicht eine präzise Sprache, in der man die normalen logischen Schlussverfahren benutzen könnte; es ist eine Sprache, die Bilder in unserem Denken hervorruft, aber zugleich mit ihnen doch auch

das Gefühl, daß die Bilder nur eine unklare Verbindung mit der Wirklichkeit besitzen, daß sie nur die Tendenz zu einer Wirklichkeit darstellen.

Die in ihrem Wesen begründete Ungenauigkeit dieser bei den Physikern gebräuchlichen Sprache hat daher zu Versuchen geführt, eine davon verschiedene, präzise Sprache zu definieren, die wohldefinierte logische Schlußweisen zuläßt und dem mathematischen Schema der Quantentheorie genau entspricht. Aus diesen Versuchen, die früher von Birkhoff und von Neumann und neuerdings noch ausführlicher von von Weizsäcker unternommen worden sind, hat sich ergeben, daß das mathematische Schema der Quantentheorie als eine Erweiterung oder Modifikation der klassischen Logik gedeutet werden kann. Es ist insbesondere ein Grundaxiom der klassischen Logik, das offenbar abgeändert werden muß. In der klassischen Logik wird angenommen, daß, sofern eine Behauptung überhaupt einen Sinn hat, entweder die Behauptung oder die Negation der Behauptung korrekt sein muß. Von den beiden Aussagen »hier ist ein Tisch« oder »hier ist kein Tisch« muß entweder die erste oder die zweite Behauptung richtig sein. »Tertium non datur«, eine dritte Möglichkeit existiert nicht. Es mag vorkommen, daß wir nicht wissen, ob die Behauptung oder ihre Negation korrekt ist, aber »in Wirklichkeit« ist nur eine von beiden richtig.

In der Quantentheorie muß offenbar dieses Gesetz »tertium non datur« abgeändert werden. Gegen jede Abänderung dieses Grundaxioms kann natürlich sofort eingewandt werden, daß es in der gewöhnlichen Sprache gilt und daß wir zumindest über eine eventuelle Abänderung der Logik eben in dieser Sprache sprechen müssen. Daher würde ein innerer Widerspruch entstehen, wenn man in der gewöhnlichen Sprache ein logisches Schema beschreiben wollte, das nicht auf die gewöhnliche Sprache Anwendung findet. An dieser Stelle aber setzt von Weizsäcker auseinander, daß man verschiedene Stufen der Sprache unterscheiden kann.

Eine erste Stufe handelt von den Objekten, z. B. von den Atomen oder den Elektronen. Eine zweite Stufe bezieht sich auf Aussagen über die Objekte. Eine dritte mag sich beziehen auf Aussagen über Aussagen über Objekte usw. Es wäre dann möglich, verschiedene logische Schlußverfahren in den verschiedenen Stufen zu benutzen. Allerdings wird man schließlich auf die gewöhnliche Sprache und damit auf die klassische Logik zurückkommen müssen. Aber von Weizsäcker schlägt vor, die klassische Logik in ähn-

licher Weise als »a priori« zur Quantenlogik zu betrachten, wie die klassische Physik ein a priori für die Quantentheorie darstellt. Die klassische Logik würde dann als eine Art Grenzfall in der Quantenlogik enthalten sein, aber die letztere würde doch das allgemeinere logische Schema darstellen.

Bei der möglichen Abänderung der klassischen Logik soll es sich also zunächst um die erste Stufe der Sprache handeln, die sich mit den Objekten selbst befaßt. Betrachten wir etwa ein Atom, das sich in einem geschlossenen Kasten bewegt, der durch eine Wand in zwei gleiche Teile geteilt sei. In der Wand sei ein kleines Loch, so daß das Atom gelegentlich hindurchfliegen kann. Nach der klassischen Logik kann dann das Atom entweder in der linken oder in der rechten Hälfte des Kastens sein. Es gibt keine dritte Möglichkeit; »tertium non datur«. In der Quantentheorie aber müssen wir zugeben, sofern wir die Wörter »Atom« und »Kasten« überhaupt verwenden wollen, daß es noch andere Möglichkeiten gibt, die in einer merkwürdigen Weise Mischungen aus den beiden früheren Möglichkeiten darstellen. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse unserer Versuche zu erklären. Wir könnten z. B. Licht beobachten, das von dem Atom gestreut worden ist. Wir könnten etwa drei Versuche ausführen. Im ersten ist das Atom (z. B. dadurch, daß das Loch in der Wand geschlossen wird) auf die linke Hälfte des Kastens beschränkt, und die Intensitätsverteilung des Streulichtes wird gemessen. Im zweiten wird das Atom auf die rechte Hälfte des Kastens beschränkt und wieder das Streulicht gemessen. Schließlich im dritten kann sich das Atom frei im ganzen Kasten hin und her bewegen, und wieder wird die Intensitätsverteilung des Streulichtes messend untersucht. Wenn das Atom nun immer entweder in der linken oder in der rechten Hälfte des Kastens gewesen wäre, so müßte die Intensitätsverteilung im dritten Versuch eine Mischung (je nach dem Bruchteil der Zeit, der vom Atom in der einen der beiden Hälften verbracht wird) der beiden früheren Intensitätsverteilungen sein. Aber das ist nach den Experimenten im allgemeinen nicht richtig. Die wirkliche Intensitätsverteilung wird durch die Interferenz der Wahrscheinlichkeiten verändert, die früher besprochen worden ist.

Um über diese Situation sprechen zu können, hat von Weizsäcker den Begriff »Wahrheitswert« eingeführt. Für jede einfache Aussage bezüglich einer Alternative wie »Das Atom ist in der linken (oder in der rechten) Hälfte des Kastens« wird eine komplexe Zahl

als ein Maß für ihren »Wahrheitswert« eingeführt. Wenn die Zahl 1 ist, so bedeutet dies, daß die Aussage richtig ist. Ist die Zahl 0, so bedeutet es, daß die Aussage falsch ist. Aber andere Werte sind möglich. Das Absolut-Quadrat der komplexen Zahl gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß die Aussage richtig ist. Die Summe der beiden Wahrscheinlichkeiten, die sich auf die beiden Teile der Alternative beziehen (entweder links oder rechts in unserem Fall), muß 1 sein. Aber jedes Paar von komplexen Zahlen, das sich auf die beiden Teile der Alternative bezieht, stellt nach der Definition von Weizsäckers eine Aussage dar, die sicher wahr ist, wenn diese Zahlen eben diese Werte haben; die beiden Zahlen würden z. B. ausreichen, um in dem beschriebenen Experiment die Intensitätsverteilung des Streulichtes zu bestimmen. Wenn man das Wort »Aussage« in dieser Weise verwendet, so kann man den Begriff »Komplementarität« durch die folgende Definition einführen: Jede Aussage, die nicht identisch ist mit einer der beiden alternativen Aussagen — in unserem speziellen Fall mit den Aussagen »Das Atom befindet sich in der linken Hälfte« oder »Das Atom befindet sich in der rechten Hälfte des Kastens« —, wird komplementär zu diesen Aussagen genannt. Für jede komplementäre Aussage ist die Frage, ob sich das Atom links oder rechts befindet, unentschieden. Aber der Ausdruck »unentschieden« ist keineswegs äquivalent zu dem Ausdruck »unbekannt«. »Unbekannt« würde bedeuten, daß das Atom in Wirklichkeit links oder rechts ist, daß wir nur nicht wissen, wo es ist. Aber »unentschieden« deutet eine davon verschiedene Situation an, die nur durch eine komplementäre Aussage dargestellt werden kann.

Dieses allgemeine logische Schema, dessen Einzelheiten hier nicht dargestellt werden können, entspricht genau dem mathematischen Formalismus der Quantentheorie. Es bildet die Grundlage für eine präzise Sprache, die man benutzen kann, um die Struktur des Atoms zu beschreiben. Aber die Anwendung einer solchen Sprache wirft doch eine Anzahl schwieriger Probleme auf, von denen wir nur zwei hier erwähnen wollen: Die Beziehung zwischen den verschiedenen Stufen der Sprache und die Konsequenzen für die zugrunde liegende Ontologie.

In der klassischen Logik ist die Beziehung zwischen den verschiedenen Stufen der Sprache die einer eindeutigen Entsprechung. Die beiden Aussagen: »Das Atom befindet sich in der linken Hälfte« oder »Es ist wahr, daß das Atom in der linken Hälfte ist«

gehören logisch zu verschiedenen Stufen. In der klassischen Logik sind diese Aussagen aber völlig äquivalent, d. h., sie sind entweder beide richtig oder beide falsch. Es ist nicht möglich, daß die eine richtig ist und die andere falsch. Aber in dem logischen Schema der Komplementarität ist diese Beziehung verwickelter. Die Richtigkeit oder Falschheit der ersten Aussage schließt in der Tat die Richtigkeit oder Falschheit der zweiten Aussage ein. Aber die Falschheit der zweiten Aussage schließt nicht die Falschheit der ersten Aussage ein. Wenn die zweite Aussage falsch ist, so kann es noch unentschieden sein, ob das Atom sich in der linken Hälfte befindet. Das Atom muß nicht unbedingt in der rechten Hälfte sein. Es besteht noch völlige Äquivalenz der beiden Stufen der Sprache hinsichtlich der Richtigkeit einer Aussage, aber nicht mehr hinsichtlich der Falschheit einer Aussage. Von hier aus kann man jenes Verhalten verstehen, das man die »Persistenz der klassischen Gesetze in der Quantentheorie« genannt hat: Wo immer bei einem gegebenen Experiment die Anwendung der klassischen physikalischen Gesetze zu einem bestimmten Schluß führt, wird das gleiche Ergebnis auch aus der Quantentheorie folgen, und es wird sich auch experimentell so verhalten.

Ein weiteres Ziel des von Weizsäckerschen Versuchs ist es, die veränderten logischen Schlußweisen auch in den höheren Stufen der Sprache anzuwenden, aber diese Fragen sollen hier nicht weiter verfolgt werden.

Das zweite Problem, das hier kurz erörtert werden soll, betrifft die Ontologie, die dem modifizierten logischen Schema zugrunde liegt. Wenn das Paar von komplexen Zahlen eine Aussage in dem eben besprochenen Sinne darstellt, so sollte es einen Zustand oder eine Situation in der Natur geben, in der die Aussage richtig ist. Wir wollen in diesem Zusammenhang das Wort »Zustand« verwenden. Die »Zustände«, die komplementären Aussagen entsprechen, werden dann durch von Weizsäcker »koexistierende Zustände« genannt. Dieser Ausdruck »koexistierend« beschreibt die Situation korrekt; es wäre in der Tat schwierig, sie etwa »verschiedene Zustände« zu nennen, denn jeder Zustand enthält bis zu einem gewissen Grad auch die anderen »koexistierenden Zustände«. Dieser »Zustands«begriff würde dann hinsichtlich einer Ontologie der Quantentheorie eine erste Definition bilden. Man erkennt sofort, daß dieser Gebrauch des Wortes »Zustand«, besonders des Ausdrucks »koexistierender Zustand«, so verschieden ist von dem der

gewöhnlichen materialistischen Ontologie, daß man zweifeln kann, ob man hier noch eine zweckmäßige Terminologie benutzt. Wenn man andererseits das Wort »Zustand« so auffaßt, daß es eher eine Möglichkeit als eine Wirklichkeit bezeichnet — man kann sogar einfach das Wort »Zustand« durch das Wort »Möglichkeit« ersetzen —, so ist der Begriff von »koexistierenden Möglichkeiten« ganz plausibel, da eine Möglichkeit eine andere einschließen oder sich mit anderen Möglichkeiten überschneiden kann.

Alle diese schwierigen Definitionen und Unterscheidungen können vermieden werden, wenn man die Sprache auf die Beschreibung von Tatsachen, d. h. in unserem Fall von experimentellen Resultaten beschränkt. Wenn man aber über die atomaren Teilchen selbst sprechen will, so muß man entweder das mathematische Schema allein als Ergänzung zu der gewöhnlichen Sprache benutzen, oder man muß es kombinieren mit einer Sprache, die sich einer abgeänderten Logik oder überhaupt keiner wohldefinierten Logik bedient.

In den Experimenten über Atomvorgänge haben wir mit Dingen und Tatsachen zu tun, mit Erscheinungen, die ebenso wirklich sind wie irgendwelche Erscheinungen im täglichen Leben. Aber die Atome oder die Elementarteilchen sind nicht ebenso wirklich. Sie bilden eher eine Welt von Tendenzen oder Möglichkeiten als eine von Dingen und Tatsachen.

## Kapitel XI

### DIE ROLLE DER MODERNEN PHYSIK IN DER GEGENWÄRTIGEN ENTWICKLUNG DES MENSCHLICHEN DENKENS

Die philosophischen Konsequenzen der modernen Physik sind in den verschiedenen Abschnitten dieses Buches erörtert worden, um zu zeigen, daß dieser modernste Teil der Naturwissenschaft an vielen Stellen sehr alte Denkwege berührt, daß er sich einigen der ältesten Probleme von einer neuen Richtung her annähert. Wahrscheinlich darf man ganz allgemein sagen, daß sich in der Geschichte des menschlichen Denkens oft die fruchtbarsten Entwick-

lungen dort ergeben haben, wo zwei verschiedene Arten des Denkens sich getroffen haben. Diese verschiedenen Arten des Denkens mögen ihre Wurzeln in verschiedenen Gebieten der menschlichen Kultur haben oder in verschiedenen Zeiten, in verschiedenen kulturellen Umgebungen oder verschiedenen religiösen Traditionen. Wenn sie sich nur wirklich treffen, d. h., wenn sie wenigstens so weit zueinander in Beziehung treten, daß eine echte Wechselwirkung stattfindet, dann kann man darauf hoffen, daß neue und interessante Entwicklungen folgen. Die Atomphysik als ein Teil der modernen Naturwissenschaft dringt nun in unserer Zeit in sehr verschiedene Kulturgebiete ein. Sie wird nicht nur in Europa und den westlichen Ländern gelehrt, wo sie zu der schon von früher her überlieferten naturwissenschaftlich-technischen Aktivität gehört, sondern sie wird auch im Fernen Osten studiert, in Ländern wie Japan, China und Indien mit ihrem so völlig verschiedenen kulturellen Hintergrund, und in Rußland, wo seit etwa vierzig Jahren eine neue Art des Denkens versucht wird, die sowohl mit besonderen wissenschaftlichen Entwicklungen im Europa des 19. Jahrhunderts als auch mit völlig andersartigen Überlieferungen aus Rußland selbst verbunden ist. Es kann sicher nicht das Ziel der folgenden Erörterungen sein, Voraussagen über das wahrscheinliche Endergebnis dieses Treffens zwischen den Ideen der modernen Physik und den älteren Überlieferungen zu machen. Aber vielleicht kann man die Stellen bezeichnen, von denen die Wechselwirkung zwischen den verschiedenartigen Ideen ausgehen kann.

Wenn man diesen Prozeß der Ausbreitung der modernen Physik ins Auge faßt, so kann man ihn sicherlich nicht von der weltweiten Ausbreitung der Naturwissenschaften, der Technik, der Medizin usw., d. h. ganz allgemein der modernen Zivilisation trennen. Die moderne Physik ist nur ein Glied in einer langen Kette von Vorgängen, die mit dem Werk von Bacon, Galilei und Kepler und mit der praktischen Anwendung der Naturwissenschaft im 17. und 18. Jahrhundert begonnen hat. Die Beziehung zwischen Naturwissenschaft und Technik ist von Anfang an die einer gegenseitigen Unterstützung gewesen. Die Fortschritte der Technik, die Verbesserung der Werkzeuge, die Erfindung neuer Meß- und Beobachtungsapparate haben die Grundlage für erweitertes und genaueres empirisches Wissen über die Natur geschaffen. Die Fortschritte im Verständnis der Natur und schließlich die mathema-