

Glückliche Fahrt

*Die Nebel zerreißen,
Der Himmel ist helle,
Und Aeolus löset
Das ängstliche Band.
Es säuseln die Winde,
Es rührt sich der Schiffer,
Geschwinde! Geschwinde!
Es teilt sich die Welle,
Es naht sich die Ferne,
Schon seh' ich das Land!*

Goethe

A. S. Eddington

Das Weltbild der Physik

und ein Versuch seiner philosophischen Deutung

(The nature of the physical world)



Aus dem Englischen übersetzt von
Marie Freifrau Rausch v. Traubenberg
und H. Diesselhorst

Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig 1931

ISBN 978-3-322-98165-3 ISBN 978-3-322-98832-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-98832-4

Alle Rechte vorbehalten

Einbandentwurf Günther Clausen, Braunschweig

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1931

VORWORT

Dieses Buch bringt im wesentlichen den Inhalt der Gifford-Vorträge, die ich von Januar bis März 1927 an der Universität Edinburg gehalten habe. Es behandelt die philosophische Auswirkung der großen Veränderungen, denen unser naturwissenschaftliches Denken im Laufe der letzten Jahrzehnte unterworfen gewesen ist. Relativitätstheorie und Quantentheorie haben zu fremdartigen neuen Vorstellungen über das Wesen der physikalischen Welt geführt, und die Weiterentwicklung der Prinzipien der Thermodynamik hat eine zwar allmählichere, aber darum nicht weniger tiefgreifende Veränderung hervorgerufen. Die ersten elf Kapitel befassen sich in der Hauptsache mit den neuen physikalischen Theorien, mit den Gründen, die zu ihrer Aufstellung und Anerkennung geführt haben, und vor allem mit den Begriffen, die ihre Grundlage zu bilden scheinen. Das Ziel ist, das physikalische Weltbild zu beschreiben, wie es sich heute darstellt, und, soweit es noch unvollständig ist, die Richtung zu beurteilen, nach der die modernen Ideen zu deuten scheinen. In den letzten vier Kapiteln werde ich die Stellung untersuchen, welche dieser naturwissenschaftlichen Auffassung im Rahmen allgemeiner Weltanschauung, einschließlich der Religion, zukommt. In welchem Geist diese Betrachtungen verstanden sein wollen, habe ich im Schlußabsatz der Einleitung (S. 7) näher erörtert.

Ich hoffe, die Kapitel naturwissenschaftlichen Inhalts werden, auch abgesehen von ihrer Beziehung zu dem letzten Teil des Buches, das Interesse des Lesers finden, doch sind sie nicht ganz so geschrieben, wie es in einer unabhängigen Darstellung geschehen wäre. In diesem Zusammenhang konnte mir eine leichte Einführung in die Anfangsgründe der Relativitäts- und Quantentheorie nicht genügen, denn es ist für meine Zwecke wesentlich, daß auch die neueren und tieferegreifenden Untersuchungen berührt werden, da sie zu Begriffen von größter philosophischer Tragweite führen.

Zwar wird sich ein großer Teil des Buches leicht lesen lassen, doch müssen hin und wieder auch ziemlich schwierige Beweisführungen in Kauf genommen werden.

Ich wollte vor allem zeigen, daß diese physikalischen Untersuchungen den Philosophen neues Material liefern; indessen bin ich über dieses Ziel hinausgegangen und habe angegeben, wie ich mir die philosophische Ausdeutung dieses Materials ungefähr denke. Dabei bin ich mir aber wohl bewußt, daß die hier vorgebrachten philosophischen Ansichten nur insoweit Anspruch auf Beachtung erheben können, als sie die direkte Auswirkung des eingehenden Studiums der neueren physikalischen Arbeiten sind. Allgemeine Ideen über die Natur der Dinge, die ich mir nebenher ohne diesen besonderen physikalischen Ansporn gebildet habe, sind für jeden, außer mir selbst, von geringer Bedeutung. Aber obgleich ich mir dieser beiden Quellen meiner Gedanken deutlich bewußt war, als ich mit der Ausarbeitung meiner Vorlesungen begann, sind sie mir doch bei dem Bestreben, einen umfassenden Standpunkt zu erreichen und gegen etwaige Kritik zu verteidigen, ununterscheidbar zusammengefloßen. Aus diesem Grunde möchte ich besonders betonen, daß gerade die idealistische Färbung meiner Auffassung von der physikalischen Welt auf meine mathematischen Untersuchungen über Relativitätstheorie zurückzuführen ist, denn insoweit ich schon vorher philosophische Ansichten besaß, waren sie von völlig anderer Beschaffenheit.

Von Anfang an bin ich zweifelhaft gewesen, ob es für einen Naturwissenschaftler wünschenswert sei, sich so weit auf ein außerhalb der Naturwissenschaft liegendes Gebiet vorzuwagen. Die Hauptrechtfertigung für einen solchen Abstecher wird wohl sein, daß er den Blick schärft für das eigene Forschungsgebiet. Im mündlichen Vortrag schien es keinen groben Übergriff zu bedeuten, wenn ich frei über die verschiedenen philosophischen Ideen, die ich mir gebildet hatte, sprach. Aber die Entscheidung fiel mir schwer, ob es erlaubt sei, diesen Vermutungen im Rahmen eines Buches eine fest umrissene Form und damit eine gewisse Dauer zu verleihen. Ich habe große Scheu vor der Kritik der Fachphilosophen, doch erfüllt mich eine noch weit größere Furcht bei dem Gedanken an solche Leser, die die Glaubwürdigkeit meines Buches nach der Übereinstimmung mit ihren religiösen Dogmen beurteilen. Während des Jahres, das seit der Abhaltung der Vorträge verstrichen ist, habe ich an der

Abfassung einzelner Teile dieses Buches viel gefeilt. Trotzdem schicke ich es mit weit größerem Zagen in die Welt als alle meine früheren Bücher.

Obgleich im allgemeinen der Unterhaltungston des Vortragssaales für ein so umfangreiches Buch ungeeignet scheinen mag, habe ich mich doch dazu entschlossen, ihn unverändert beizubehalten. Ein Physiker, der in seinem Buche vollkommen auf die Verwendung seines natürlichsten und klarsten Ausdrucksmittels, der mathematischen Formel, verzichtet, darf vielleicht dafür auch seinerseits einige Nachsicht vom Leser beanspruchen. Manches, was ich zu sagen habe, ist seiner inneren Natur nach so schwierig, daß ich nur dann einige Hoffnung verstanden zu werden habe, wenn ich diese Stellen so auseinandersetze, als ob ich mich meinem Leser Auge in Auge gegenüber befände.

Im August 1928.

A. S. E.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	V
Einleitung	1
Erstes Kapitel: Der Sturz der klassischen Physik	9
Zweites Kapitel: Relativität	27
Drittes Kapitel: Die Zeit	42
Viertes Kapitel: Der Ablauf des Weltgeschehens	67
Fünftes Kapitel: „Werden“	91
Sechstes Kapitel: Die Gravitation und ihr Gesetz	114
Siebentes Kapitel: Die Gravitation und ihre Erklärung	141
Achstes Kapitel: Die Stellung des Menschen im Weltall	164
Neuntes Kapitel: Die Quantentheorie	180
Zehntes Kapitel: Die neue Quantentheorie	200
Elftes Kapitel: Weltbau	228
Zwölftes Kapitel: Zeigerstellungen	244
Dreizehntes Kapitel: Realität	268
Vierzehntes Kapitel: Verursachung	287
Fünfzehntes Kapitel: Wissenschaft und Mystizismus	310
Schlußwort	336
Register	347

EINLEITUNG

Ich will mit der Niederschrift dieser Vorträge beginnen und rücke meine Stühle an meine beiden Tische. Zwei Tische? Ja, denn jeder Gegenstand meiner Umgebung hat einen Doppelgänger — also zwei Tische, zwei Stühle, zwei Federn . . .

Sie werden dies nicht gerade für einen tiefsinnigen Anfang einer Reihe von Vorträgen halten, die bis zu den transzendenten Höhen philosophischer Erkenntnis führen sollen. Aber man kann nicht gleich ins Innere dringen, sondern muß vorher ein bißchen an der Oberfläche der Dinge kratzen. Und wenn ich damit beginne, so stoße ich zuerst auf — meine beiden Tische.

Der eine von ihnen ist mir seit frühester Kindheit vertraut. Er ist ein gewöhnlicher Gegenstand meiner Umgebung, die ich Welt nenne. Wie soll ich ihn beschreiben? Er hat Ausdehnung, eine gewisse Dauer, Farbe, und vor allem, er ist *s u b s t a n z h a f t*. Mit substanzhaft meine ich nicht einfach, daß er unter mir nicht zusammenbricht. Ich meine damit, daß er aus Substanz besteht, und ich versuche, Ihnen durch dieses Wort eine Vorstellung von seiner inneren Natur zu vermitteln. Er ist ein *D i n g*; ungleich dem Raum, der eine bloße Negation ist; auch ungleich der Zeit, die eine — weiß der Himmel was ist! Aber diese Erklärung hilft Ihnen nicht viel, denn es ist ja gerade die charakteristische Eigenschaft von einem „Ding“, substanzhaft zu sein. Und so glaube ich Ihnen Substanzhaftigkeit am besten zu beschreiben, wenn ich sage, daß ein gewöhnlicher Tisch das beste Beispiel dafür gibt. So drehen wir uns im Kreise und beschreiben den Tisch durch die Substanz und die Substanz durch den Tisch. Aber schließlich, wenn Sie ein einfacher Mensch mit gesundem Menschenverstand sind, der nicht zu viel von wissenschaftlichen Skrupeln geplagt wird, so werden Sie nicht im Zweifel sein, daß Sie das Wesen eines gewöhnlichen Tisches richtig erfassen. Es gibt sogar einfache Menschen, die glauben, daß sie das Mysterium ihrer eigenen Natur besser verstehen

würden, wenn die Gelehrten es ihnen in so leicht verständlichen Ausdrücken wie „Tisch“ erklären würden.

Tisch Nr. 2 ist mein wissenschaftlicher Tisch. Meine Bekanntschaft mit ihm ist jüngerer Datums, auch stehe ich mit ihm nicht auf ganz so vertrautem Fuße wie mit Tisch Nr. 1. Er gehört nicht zu der Welt, von der ich oben sprach — jener Welt, die unmittelbar rings um mich erscheint, sobald ich meine Augen öffne, von der ich indessen hier nicht untersuchen will, wieviel davon objektiv und wieviel subjektiv ist. Er ist Teil einer Welt, die meine Aufmerksamkeit mehr mittelbar auf sich gezogen hat. Mein wissenschaftlicher Tisch besteht zum größten Teil aus Leere. Spärlich eingestreut in diese Leere sind zahlreiche elektrische Ladungen, die mit großer Geschwindigkeit hin und her sausen; spärlich, denn ihr Gesamtvolumen beträgt weniger als den billionsten Teil von dem Volumen des ganzen Tisches. Trotz dieser merkwürdigen Zusammensetzung ergibt es sich nun, daß auch Nr. 2 als Tisch vollkommen seine Pflicht erfüllt. Er trägt mein Schreibpapier genau so zur Zufriedenheit wie Tisch Nr. 1, denn wenn ich das Papier auf ihn lege, so stoßen die kleinen elektrischen Partikelchen in ihrer ungestümen Hast unaufhörlich gegen die Unterseite des Blattes, so daß es wie bei einem Federballspiel dauernd ungefähr auf gleicher Höhe gehalten wird. Wenn ich mich auf meinen wissenschaftlichen Tisch stütze, werde ich nicht hindurchfallen; oder, um mich exakt auszudrücken: die Wahrscheinlichkeit, daß mein wissenschaftlicher Ellbogen durch meinen wissenschaftlichen Tisch hindurchdringt, ist so außerordentlich gering, daß sie praktisch vernachlässigt werden kann. Wenn ich also die Eigenschaften der beiden Tische eine nach der anderen durchgehe, so scheinen sie, solange es sich nur um die Erfüllung ihrer gewöhnlichen Aufgabe handelt, einander völlig gleichwertig zu sein. Sobald aber ungewöhnliche Ereignisse eintreten, zeigt mein wissenschaftlicher Tisch seine Überlegenheit. Bricht z. B. Feuer aus, so löst sich mein wissenschaftlicher Tisch auf ganz natürliche Weise in wissenschaftlichen Rauch auf, während mein gewöhnlicher Tisch eine Verwandlung seiner substanzhaften Natur durchmacht, die man nur als Wunder bezeichnen kann.

An meinem zweiten Tische ist nichts Substanzhaftes. Er besteht fast ganz aus leerem Raum — allerdings aus einem Raum, der von Kraftfeldern durchsetzt ist. Aber Kraftfelder sind keine „Dinge“; sie gehören der Kategorie der „Wirkungen“

an. Auch auf den ganz minimalen Teil, der nicht leer ist, darf nicht der Begriff Substanz in seiner ursprünglichen Bedeutung angewendet werden. Indem wir die Materie in elektrische Ladungen zerlegten, haben wir uns so weit von dem Bilde entfernt, das ursprünglich zur Formulierung des Substanzbegriffes geführt hat, daß uns der Sinn dieses Begriffes — falls überhaupt einer vorhanden war — dabei verlorengegangen ist. Die Betrachtungsweise moderner Naturwissenschaft zielt dahin, mit der Einteilung in einzelne Kategorien wie „Dinge“, „Wirkungen“, „geometrische Formen“ usw. zu brechen und einen gemeinsamen Hintergrund aller Erfahrung anzunehmen. Ob wir einen materiellen Gegenstand untersuchen, ein magnetisches Feld, eine geometrische Figur oder eine Zeitdauer, alles, was wir durch die Wissenschaft erfahren, besteht in einer Summe von Messungen. Aber weder die Meßinstrumente noch die Art ihrer Anwendung geben zu der Vermutung Anlaß, daß es sich bei all diesen Problemen um etwas wesentlich Verschiedenes handelt. Es ergibt sich also aus den Messungen selbst keinerlei Grund für eine Einteilung in Kategorien. Wir fühlen die Notwendigkeit, den Messungen einen Hintergrund zuzuordnen — eine Außenwelt, aber die Eigenschaften dieser Welt, sofern sie sich nicht in den Messungen widerspiegeln, entziehen sich jeder wissenschaftlichen Erforschung. Darum will die Naturwissenschaft nicht länger das exakte Wissen, das in ihren Messungen enthalten ist, mit jener traditionellen Bildergalerie von Vorstellungen verknüpfen, die keinerlei zuverlässigen Aufschluß über den Hintergrund vermittelt und dem wissenschaftlichen System nur fremde Bestandteile aufdrängt.

Wir brauchen hier nicht weiter auseinanderzusetzen, daß Elektronen keine Substanz besitzen, denn dies ist für unseren Gedankengang kaum von Belang. Geben Sie den Elektronen so viel Substanz, wie Sie wollen, es bleibt doch ein ungeheurer Unterschied zwischen meinem wissenschaftlichen Tische, dessen Substanz (wenn er überhaupt eine hat) als winzige Teilchen in einem fast leeren Gebiet verstreut ist, und meinem alltäglichen Tisch, der für uns das Sinnbild solider Wirklichkeit darstellt — ein verkörperter Protest gegen Berkeleyschen Subjektivismus. Allen Unterschied in der Welt macht es aus, ob dieses Papier vor mir gleichsam auf einem Fliegenschwarm ruht, indem es wie ein Federball durch zahllose kleine Stöße schwebend erhalten wird, oder ob es

durch die darunter befindliche Substanz getragen wird, weil deren Wesen darin besteht, Raum zu erfüllen und für andere Substanz undurchdringlich zu sein; allen Unterschied wenigstens für die Vorstellung, aber keinen Unterschied für meine praktische Aufgabe, auf dem Papier zu schreiben.

Ich brauche wohl kaum zu sagen, daß die moderne Physik mit ihren empfindlichen Prüfmethode und ihrer unbarmherzigen Logik mir versichert, daß mein zweiter, wissenschaftlicher Tisch der einzige ist, der wirklich da ist, wo immer dieses „da“ auch sein mag. Aber ebenso selbstverständlich ist es, daß es der modernen Physik trotzdem niemals gelingen wird, den ersten Tisch zu verbannen — jenes merkwürdige Gemisch von Außenwelt, Einbildungskraft und ererbtem Vorurteil, das sichtbar und greifbar vor mir steht. Doch müssen wir ihm für den Augenblick Lebewohl sagen, denn wir wollen jetzt die gewohnte Welt des täglichen Lebens verlassen und uns der wissenschaftlichen Welt zuwenden, die von der Physik entdeckt wurde und die ganz und gar eine Außenwelt, oder jedenfalls als solche gedacht ist.

„Es ist paradox, von zwei Welten zu sprechen. Handelt es sich nicht in Wirklichkeit nur um zwei verschiedene Seiten oder Auslegungen ein und derselben Welt?“

Ja, zweifellos wird es schließlich zur Identifizierung beider Welten kommen. Aber der Prozeß, durch den die physikalische Außenwelt in die dem Bewußtsein vertraute Welt des täglichen Lebens übergeht, liegt außerhalb des Bereiches der physikalischen Forschung. Infolgedessen muß die Welt, die nach den Methoden der Physik erforscht wird, so lange von der Welt unseres täglichen Lebens getrennt bleiben, bis der Physiker seine Arbeit abgeschlossen hat. Wir müssen also vorläufig den Tisch, der Objekt physikalischer Forschung ist, völlig gesondert von unserem gewohnten Tische betrachten, ohne irgend etwas über die Frage ihrer schließlichen Identifizierung vorauszusetzen. Wohl ist es wahr, daß jede wissenschaftliche Forschung ursprünglich von der Welt des täglichen Lebens ausgeht und am Ende auch zu ihr zurückkehren muß, aber der Teil des Weges, auf dem der Physiker uns leitet, führt durch fremdes Gebiet.

Bis vor kurzem waren die beiden Welten viel enger verbunden. Der Physiker entnahm das Rohmaterial zum Aufbau seiner Welt der Welt des täglichen Lebens, aber er tut dies nicht länger. Sein Rohmaterial sind Äther, Elektronen,

Quanten, Potentiale, Hamiltonsche Funktionen usw., und er ist heute ängstlich bemüht, diese physikalischen Gegebenheiten vor einer Vermengung mit Vorstellungen, die der anderen Welt entlehnt sind, zu bewahren. Es gibt zwar im täglichen Leben einen Tisch, der die Parallele zu dem Tische der Physik bildet, aber wir finden dort keinerlei Parallele zu den Elektronen, Quanten und Potentialen der Physik. Wir streben auch gar nicht danach, solche vertrauten Gegenstände künstlich herzustellen und dadurch, wie man sagt, das Elektron zu „erklären“. Wenn der Physiker mit seinem „Weltbauen“ fertig ist, dann freilich ist eine Verbindung oder Identifizierung erlaubt. Aber verfrühte Versuche, einen Zusammenhang herzustellen, haben sich als verfehlt und schädlich erwiesen.

Es ist das Ziel der Physik, eine Welt zu konstruieren, die der Welt unserer gewöhnlichen Erfahrung symbolisch entspricht. Aber dabei muß nicht jedem Symbol, das die Physik verwendet, etwas Bestimmtes in unserer gewöhnlichen Erfahrung entsprechen, ja es ist nicht einmal notwendig, daß sich jedes solche Symbol in der Sprache unserer gewöhnlichen Erfahrung erklären läßt. Der Mann der Praxis stellt immer diese Forderung nach einer konkreten Erklärung aller Dinge, von denen ihm die Wissenschaft erzählt, doch muß er hierin notwendig enttäuscht werden. Wenn wir lesen lernen, machen wir die gleiche Erfahrung. Der Inhalt eines Buches entspricht symbolisch einer Geschichte des wirklichen Lebens, und der Zweck des Buches ist, daß der Leser bestimmten Symbolen, z. B. dem Worte Brot, ganz bestimmte Vorstellungen des täglichen Lebens zuordnen lernt. Doch auch hier ist es mißlich, diese Zuordnung verfrüht vorzunehmen, bevor sich die Buchstaben zu Worten und die Worte zu Sätzen aneinandergereiht haben. Dem Symbol A entspricht nichts in unserem gewöhnlichen Leben. Dem Kinde wird der Buchstabe A schrecklich abstrakt vorkommen. Daher lehrt man anfangs das Kind, die Buchstaben mit gewissen vertrauten Vorstellungen zu verbinden. „A ist ein Apfel.“ Diese Methode hilft zwar über die augenblickliche Schwierigkeit hinweg, aber das Kind wird niemals wirkliche Fortschritte im Zusammensetzen der Buchstaben zu Worten machen, solange Äpfel, Birnen und andere Dinge um die Buchstaben herumtanzen. Die Buchstaben sind abstrakte Symbole; früher oder später muß das eingesehen werden. In der Physik sind wir den Apfel- und Birnendefinitionen der

Fundamentalsymbole entwachsen. Auf die Frage, was denn ein Elektron in Wirklichkeit sei, können wir nur antworten: „Es ist ein Stück vom ABC der Physik“.

Auf diese Weise ist die physikalische Welt eine Welt der Schatten geworden. Indem wir die Trugbilder unserer Phantasie verbannten, haben wir zugleich auch die Substanz ausgeschlossen, jenes mächtigste Gebilde unserer Einbildungskraft. Später werden wir vielleicht untersuchen müssen, ob wir in unserem Eifer, alles Nicht-Wirkliche auszumerzen, das Messer nicht zu unbarmherzig angesetzt haben. Es ist in der Tat möglich, daß die Wirklichkeit einem Kinde ähnelt, das nur in seinen Kinderphantasien leben kann. Mag es so sein; für den Physiker ist das kaum von Belang, denn der hat gute und hinreichende Gründe, seine Untersuchungen in der Welt der Schatten fortzuführen, und ist zufrieden, wenn er die Beantwortung der Frage nach dem Wirklichkeitsgrad dem Philosophen überläßt. In der Welt der Physik betrachten wir das Drama des Lebens im Schattenspiel. Das Schattenbild meines Ellbogens ruht auf einem schattenhaften Tisch, und meine Schattentinte fließt über schattenhaftes Papier. Es ist eine symbolische Welt, und als Symbol läßt sie uns der Physiker zurück. Dann betritt der Zauberer Geist die Bühne und verwandelt die Symbole. Die spärlich verstreuten Kerne elektrischer Kraft werden zu einem greifbaren festen Körper, ihre nimmer ruhende Bewegung wandelt sich in sommerliche Wärme, die Oktave der Ätherschwingungen wird zum schimmernden Regenbogen. Aber nicht genug, neue Bedeutungen entstehen in der gewandelten Welt, für die in der Welt der Symbole schwerlich ein Bild zu finden ist. Es entsteht eine Welt der Schönheit und des Zweckes — aber ach, sie ist auch eine Welt des Bösen und des Leidens.

Das offene Eingeständnis, daß die Physik sich mit einer Welt der Schatten befaßt, ist einer der bezeichnendsten Fortschritte der neueren Zeit. Damit meine ich jedoch nicht, daß die philosophischen Folgen dieser Tatsache den Physiker irgendwie weitgehend beschäftigen. Von seinem Standpunkt aus handelt es sich nicht so sehr um das Aufgeben unhaltbar gewordener Ansprüche wie um die Gewähr der Freiheit für eine selbständige Entwicklung. Es ist auch gar nicht die philosophische Tragweite, die mich veranlaßt, an dieser Stelle den symbolischen und schattenhaften Charakter der physikalischen Welt besonders hervorzuheben, vielmehr kommt es mir hier darauf an, die Losgelöstheit von

den uns vertrauten Vorstellungen zu betonen, die bei der nachfolgenden Beschreibung moderner physikalischer Theorien deutlich zutage treten wird. Denn wenn Sie nicht darauf vorbereitet sind, auf solche Vorstellungen verzichten zu müssen, werden Sie wahrscheinlich nur wenig Sympathie für die neuen Theorien aufbringen können und sie möglicherweise sogar als lächerlich empfinden, wie dies, glaube ich, manchmal geschieht.

Es ist schwierig, sich daran zu gewöhnen, die physikalische Welt als rein symbolisch aufzufassen. Immer wieder verfallen wir in die alte Gewohnheit, ihre Symbole mit Vorstellungen aus der Welt des Bewußtseins zu vermengen. Nicht belehrt durch lange Erfahrung strecken wir die Hand aus, den Schatten zu fassen, anstatt seine schattenhafte Natur als gegeben hinzunehmen. In der Tat, wenn man sich nicht auf einen rein mathematischen Symbolismus beschränken will, so läßt es sich schwer vermeiden, die physikalischen Symbole in trügerische Gewandung zu hüllen. Wenn ich z. B. an ein Elektron denke, entsteht in meinem Geiste das Bild eines winzigen harten roten Kügelchens; das Proton hingegen sehe ich in einem neutralen Grau. Natürlich ist die Farbvorstellung Unsinn — wenn auch vielleicht nicht unsinniger als das übrige Bild —, aber ich bin unverbesserlich. Ich kann durchaus verstehen, daß jüngere Köpfe diese Bilder zu konkret finden und danach streben, die Welt aus Hamiltonschen Funktionen und anderen Symbolen aufzubauen, die so weit ab von jeder Anschauung liegen, daß sie nicht einmal mehr den Gesetzen der orthodoxen Arithmetik gehorchen. Ich für meinen Teil finde es einigermaßen schwierig, mich zu der Höhe dieser Gedanken aufzuschwingen. Doch bin ich überzeugt, daß diese Entwicklung weiter geht.

In diesen Vorträgen möchte ich einige Ergebnisse moderner Untersuchungen über die physikalische Welt erörtern, die dem philosophischen Denken reiche Nahrung geben. Es wird sich dabei sowohl um neue wissenschaftliche Begriffe als um neuen Wissensstoff handeln. In beiden Hinsichten werden wir ganz anders über das materielle Weltall denken lernen, als man das gegen Ende des vorigen Jahrhunderts zu tun pflegte. Auch werde ich nicht das weitere Ziel aus dem Auge verlieren, das jedem Gifford-Vortragenden gesteckt ist: diese rein physikalischen Entdeckungen zu solchen Seiten unserer menschlichen Natur in Beziehung zu setzen, die allgemeineres Interesse haben. Diese Beziehung

muß sich notwendig ebenfalls gewandelt haben, da ja unsere gesamte Auffassung der physikalischen Welt sich von Grund auf geändert hat. Es ist meine Überzeugung, daß die richtige Würdigung des physikalischen Weltbildes, wie wir es heute verstehen, ein Gefühl des Aufgeschlossenseins mit sich bringen muß für eine weit höhere Bedeutung, als sie physikalischen Messungen zukommen kann, ein Gefühl, das der vorigen Generation unlogisch erschienen sein möchte. In den letzten Vorträgen werde ich versuchen, dieses Gefühl zu erfassen, und werde, so gut ich das als Laie kann, herauszufinden suchen, wohin es führt. Doch käme es mir als Unstreue gegen die Wissenschaft vor, würde ich nicht gleichzeitig betonen, daß die Hingabe an die Wissenschaft ihren Zweck in sich selber trägt. Der Pfad der Wissenschaft muß um seiner selbst willen beschritten werden und nicht, weil er vielleicht Ausblicke in eine weitere Landschaft eröffnen mag. In diesem Sinne wollen wir unseren Weg verfolgen, mag er nun zum Hügel der Erleuchtung führen oder in die Höhle der Finsternis. Bis wir zum Ende dieses Buches vorgedrungen sein werden, müssen Sie sich also damit zufrieden geben, mir auf dem von der Wissenschaft gebahnten Pfade zu folgen, und mich nicht schelten, wenn ich auch manchmal an den Blumen am Wegesrand verweile. Soll diese Abmachung zwischen uns gelten und wollen Sie mit mir den Weg antreten?

DER STURZ DER KLASSISCHEN PHYSIK

Die Struktur des Atoms. In den Jahren 1905—1908 hat unsere Vorstellung von Raum und Zeit durch Einstein und Minkowski einen fundamentalen Umschwung erfahren. Kurze Zeit darauf rief Rutherford in unserer Auffassung von der Struktur der Materie die größte Wandlung hervor, die seit den Tagen des Demokrit jemals stattgefunden hat. Diese beiden großen Veränderungen wurden merkwürdig verschieden aufgenommen. Die neuen Ideen über Raum und Zeit wurden allgemein als revolutionär empfunden; von den einen wurden sie mit begeisterter Zustimmung begrüßt, von den anderen mit erbittertem Widerspruch bekämpft. Die neue Idee über den Aufbau der Materie dagegen traf das gewöhnliche Schicksal wissenschaftlicher Entdeckungen. Schritt für Schritt mehrten sich die Beweise für ihren Wert, und als sie unwiderstehlich überzeugten, rückten sie in aller Stille die neue Auffassung an den Platz der alten Theorie, ohne daß eine besondere Erschütterung verspürt worden wäre. Und doch, wenn ich heute Ausdrücke der Empörung über den Bolschewismus moderner Naturwissenschaft und der Sehnsucht nach der alten wohlgegründeten Ordnung vernehme, kann ich mich des Gedankens nicht erwehren, daß der wahre Schuldige Rutherford heißt und nicht Einstein. Vergleichen wir das Weltbild der modernen Physik mit der Vorstellung, die wir uns bisher von der Welt gebildet hatten, so besteht der größte Wandel nicht in der Umordnung von Raum und Zeit, sondern in der Auflösung alles dessen, was wir als durch und durch fest angesehen hatten, in winzige Teilchen, die im Leeren schweben. Dieses Erkenntnis muß jeden in die größte Verwirrung stürzen, der da glaubt, die Dinge seien mehr oder weniger das, was sie scheinen. Die Offenbarung der modernen Physik über die Leere im Atom rüttelt die Geister noch stärker auf, als die Offenbarung der Astronomie über die ungeheure Leere der Sternenwelt.

Das Atom ist so wenig stoffgefüllt wie das Sonnensystem. Wenn wir alle Protonen und Elektronen, die den Körper eines Menschen aufbauen, zu einer dichten Masse ohne leeren Zwischenraum zusammenpressen würden, so bliebe nichts übrig als ein winzig kleines Pünktchen, das unter einem Mikroskop gerade noch wahrgenommen werden könnte.

Dieser lose Bau der Materie war von der Atomtheorie nicht vorausgesehen worden. Wohl war bekannt, daß in einem Gase wie Luft die Atome durch leeren Raum weit voneinander getrennt sind, doch war schließlich zu erwarten, daß in einem luftartigen Gebilde relativ wenig Substanz enthalten sein würde. In festen Körpern jedoch glaubte man die Atome dicht aneinandergedrängt, so daß die alte Atomtheorie mit unserer gewöhnlichen Vorstellung darin übereinstimmte, feste Körper als im wesentlichen lückenlos substanzgefüllt anzusehen.

Diese Auffassung wurde zunächst auch von der elektrischen Theorie der Materie, die gegen Ende des 19. Jahrhunderts entstand, unverändert beibehalten. Es war bekannt, daß die negative Elektrizität auf Einheitsladungen von äußerst geringem Volumen verdichtet ist. Doch stellte man sich den anderen Baustein der Materie, den Träger der positiven Elektrizität, als eine gallertartige Kugel von denselben Ausmaßen wie das Atom selbst vor und die winzigen negativen Teilchen darin eingebettet. Somit war der Raum innerhalb eines festen Körpers auch weiterhin wesentlich substanzgefüllt.

Im Jahre 1911 aber zeigte Rutherford, daß auch die positive Elektrizität zu winzigen kleinen Teilchen verdichtet ist. Seine Untersuchung über die Zerstreung von α -Strahlen beim Durchgang durch Materie bewies, daß das Atom imstande ist, große elektrische Kräfte auszuüben, was nur möglich ist, wenn die positive Ladung als außerordentlich konzentrierte Kraftquelle wirkt. Sie muß in einem Kern zusammengedrängt sein, der sogar gegen die Abmessungen des Atoms noch klein ist.

So wurde zum ersten Male der Hauptteil des Atomvolumens als leer angesehen¹, und ein „Sonnensystem“ trat an die Stelle des früheren massiven „Billardballes“.

Zwei Jahre später entwickelte Niels Bohr, gestützt auf das Rutherfordsche Atommodell, seine berühmte Atom-

theorie, und seitdem hat eine außerordentlich schnelle Entwicklung eingesetzt. Aber mögen auch noch so große Veränderungen unserer physikalischen Auffassung bevorstehen, eine Rückkehr zu dem alten massiven Atom ist undenkbar geworden.

Gegenwärtig ist es allgemein anerkannte Tatsache, daß sich jede Art der Materie aus zwei elementaren Bausteinen zusammensetzt: aus Protonen und Elektronen. Elektrisch betrachtet bilden diese beiden Bausteine der Materie rein polare Gegensätze. Das Proton ist die Einheitsladung positiver Elektrizität, das Elektron die Einheitsladung negativer Elektrizität. In anderer Beziehung jedoch sind ihre Eigenschaften ganz verschiedenartig. Die Masse des Protons ist 1840mal größer als die Masse des Elektrons, so daß fast die gesamte Masse der Materie von den sie aufbauenden Protonen herrührt. Ein einfaches Proton kommt nur im Wasserstoff vor, dessen Atom aus einem Proton und einem Elektron besteht und somit die einfachste Form der Materie darstellt. Bei allen anderen Atomen sind eine gewisse Anzahl Protonen und eine geringere Anzahl Elektronen zu einem Kern verschweißt, während die übrigen zur elektrischen Neutralisation erforderlichen Elektronen als Satelliten des Kernes im Atom verstreut sind. Diese Elektronen können sich sogar vollständig aus dem Atomverbande lösen und frei durch den betreffenden Stoff wandern. Der Durchmesser eines Elektrons ist ungefähr $\frac{1}{50\,000}$ des Atomdurchmessers, der Durchmesser des Kernes kaum größer, und ein einzelnes Proton vermutlich viel kleiner.

Vor 30 Jahren ist viel über die Existenz eines Ätherwindes gestritten worden, d. h. darüber, ob die Erde auf ihrem Lauf um die Sonne den Äther mitnimmt. Zu dieser Zeit stand es noch außer Frage, daß man sich die Atome als feste massive Kugeln vorzustellen hatte, und es war schwer, zu glauben, daß ein Körper seinen Weg durch den Äther nehmen könne, ohne ihn zu beeinflussen. So war es überraschend und verwirrend, daß das Experiment keinerlei Mitführung des Äthers ergab. Aber jetzt, im Besitze der Erkenntnis, daß der Äther ebenso leicht durch Atome dringen kann wie durch das Sonnensystem, müssen wir gerade dies als Ergebnis des Experimentes erwarten.

Wir werden auf das „Sonnensystem=Atom“ in späteren Kapiteln näher eingehen. An dieser Stelle brauchen wir nur z w e i seiner Eigenschaften für das Folgende festzustellen:

Erstens die außerordentliche Leere des Atoms, und zweitens seinen Aufbau aus elektrischen Ladungen.

Rutherfords Kerntheorie wird für gewöhnlich nicht zu den wissenschaftlichen Revolutionen dieses Jahrhunderts gerechnet. Sie ist eine Entdeckung von außerordentlicher Tragweite, aber immerhin eine Entdeckung, die noch im Rahmen der klassischen Physik liegt. Wesen und Bedeutung dieser Theorie ließen sich in unmittelbar verständlichen Sätzen ausdrücken, unter Benutzung von Begriffen, die bereits zum allgemeinen Bestand der Wissenschaft gehörten. Das Beiwort „revolutionär“ wird im allgemeinen zwei großen modernen Entwicklungen vorbehalten: der Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Diese beiden Theorien bedeuten nämlich nicht nur Neuentdeckungen in bezug auf den Inhalt der Welt, sondern sie bedingen gleichzeitig eine völlige Umwandlung unserer Denkweise über diesen Inhalt. Sie lassen sich nicht unmittelbar in verständlichen Sätzen ausdrücken, denn vorher müssen wir uns vollkommen neue Begriffe zu eigen machen, von denen sich die klassische Physik niemals hat träumen lassen.

Ich weiß nicht, ob die Bezeichnung „klassische Physik“ jemals genau definiert worden ist. Aber man verbindet damit wohl allgemein die Vorstellung, daß das von Newton in seinen „Prinzipien“ aufgestellte Schema der Naturgesetze einen Rahmen bilde, dem jede weitere Entwicklung sich fügen werde. In der Tat waren innerhalb dieses Rahmens große Umwälzungen möglich. Die Wellentheorie des Lichts verdrängte die Korpuskulartheorie, Wärme wandelte sich aus einem Stoff in Energie der Bewegung, Elektrizität aus einem kontinuierlichen Fluidum in Spannungsknoten des Äthers.

Doch alle diese Veränderungen ließen sich noch dem elastischen Rahmen des ursprünglichen Schemas einfügen. Wellen, kinetische Energie und Spannung waren der klassischen Physik wohlbekannte Begriffe, und die Möglichkeit ihrer Anwendung auf einen größeren Bereich von Erscheinungen war nur ein neuer Beweis für die umfassende Weite von Newtons wissenschaftlichem Scharfblick. Lassen Sie uns nun sehen, wie das klassische Schema niederbrach.

Die Fitz Gerald-Kontraktion². Die Tatsache, von der wir ausgehen, ist folgende: Ein Stab bewege sich mit sehr großer Geschwindigkeit. Zuerst möge er quer zur Bewegungsrichtung stehen. Dann drehen wir ihn um einen

rechten Winkel in die Bewegungsrichtung hinein, und der Stab zieht sich zusammen! Er ist kürzer, wenn er in der Bewegungsrichtung liegt, als wenn er quer dazu steht.

Die Verkürzung, bekannt als Fitz Gerald-Kontraktion, ist unter gewöhnlichen Bedingungen außerordentlich gering. Sie hängt in keiner Weise von der Beschaffenheit des Stabes ab, sondern einzig und allein von der Größe seiner Geschwindigkeit. Zum Beispiel bei einer Geschwindigkeit von 30 Kilometern in der Sekunde — das ist die Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne — beträgt die Längenkontraktion 1 zu 200 000 000, oder $6\frac{1}{4}$ cm für den Durchmesser der Erde.

Die Verkürzung wurde durch eine Anzahl verschiedenartiger Experimente bewiesen, von denen das erste und berühmteste der Michelson-Morley-Versuch vom Jahre 1887 ist. Der Versuch wurde 1905 von Morley und Miller exakter wiederholt und ebenso von verschiedenen Forschern innerhalb der letzten Jahre. Ohne hier näher auf die Einzelheiten dieser Experimente einzugehen, will ich nur erwähnen, daß die bequemste Art, dem Stabe eine große Geschwindigkeit zu erteilen, einfach darin besteht, ihn von der Erde auf ihrem schnellen Lauf um die Sonne mitführen zu lassen. Auch will ich nicht untersuchen, wie vollständig der Beweis ist, den all diese Experimente liefern. Viel wichtiger ist es, Ihnen zu zeigen, daß eine solche Verkürzung gerade das ist, was unser neues Wissen vom Aufbau der Materie erwarten läßt.

Sie sind erstaunt, daß ein bewegter Stab seine Länge ändert, nur weil er in eine andere Richtung weist? Sie hätten erwartet, daß seine Länge unverändert bleibt? Aber an was für einen Stab haben Sie gedacht? (Sie erinnern sich meiner beiden Tische!) Wenn Sie an eine einheitliche Substanz denken, die im Raume ausgedehnt ist, weil es das Wesen jeder Substanz ist, Raum zu erfüllen, dann scheint allerdings keine wesentliche Ursache für eine Gestaltveränderung vorzuliegen. Aber der wissenschaftliche Stab ist ein Schwarm von sich bewegenden Teilchen, die durch weite Abstände voneinander getrennt sind. Das Wunder scheint mir eher darin zu liegen, daß ein derartiges Gebilde überhaupt das Bestreben zeigt, eine fest umrissene Gestalt beizubehalten. Die Teilchen bewahren einen bestimmten mittleren Abstand, so daß das Gesamtvolumen des Schwarmes praktisch unverändert bleibt. Sie üben elektrische Kräfte aufeinander aus, und die Größe des von ihnen erfüllten Raumes ist das

Ergebnis eines Gleichgewichtes zwischen diesen anziehenden Kräften und dem Bestreben der Teilchen, infolge ihrer verschiedenen Bewegung auseinanderzufliegen. Wenn nun der Stab in Bewegung gesetzt wird, ändern sich die elektrischen Kräfte. Bewegte Elektrizität bildet einen elektrischen Strom, und dieser wiederum läßt Kräfte einer anderen Art entstehen, als sie von einer ruhenden Elektrizitätsmenge ausgehen, nämlich magnetische Kräfte. Daß aber die Größe solcher Kräfte, die durch Bewegung elektrischer Ladungen hervorgerufen werden, in Richtung der Bewegung eine andere ist, als senkrecht dazu, ist nur natürlich.

Wenn wir den Stab mit allen seinen kleinen elektrischen Ladungen in Bewegung setzen, rufen wir neue magnetische Kräfte zwischen den einzelnen Partikelchen hervor. Selbstverständlich wird dadurch der ursprüngliche Gleichgewichtszustand gestört. Der mittlere Abstand der Teilchen muß sich so lange ändern, bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Und so hat sich die Gesamtausdehnung des Schwarmes elektrischer Teilchen — die Länge des Stabes — geändert.

Es ist wirklich gar nichts Geheimnisvolles an der Fitz Gerald-Kontraktion. Eine unnatürliche Eigenschaft wäre sie nur für einen Stab, der dem alten Bilde einer einheitlichen Substanz entspricht und vermöge dieser Substanzhaftigkeit Raum erfüllt. Vollkommen natürlich aber ergibt sich die Kontraktion für einen Schwarm von Teilchen, die durch elektromagnetische Kräfte in leicht störbarem Gleichgewicht gehalten werden und nur insofern einen bestimmten Raum innehaben, als sie alles, was einzudringen versucht, fortstoßen. Wir können die Sache auch so betrachten: Ihre Erwartung, der Stab werde seine ursprüngliche Länge behalten, beruht auf der stillschweigenden Voraussetzung, daß der Stab sanft behandelt und keinerlei neuen Kräften ausgesetzt werde. Auf einen bewegten Stab wirken aber durchaus neue Kräfte ein, wenn diese auch nicht auf einen groben äußeren Eingriff zurückzuführen sind, sondern die natürliche Folge seines eigenen elektrischen Aufbaues darstellen. Unter der Einwirkung dieser magnetischen Kräfte findet die Verkürzung statt. „Ja“, denken Sie vielleicht, „wenn der Stab nur fest genug wäre, so könnte er doch wohl den zusammenpressenden Kräften standhalten.“ Das ist nicht richtig. Die Fitz Gerald-Kontraktion hat den gleichen

Betrag für einen Stab aus Stahl und für einen Stab aus Gummi, denn die Kräfte, die die Verkürzung bewirken, sind derart mit dem inneren Aufbau des Stabes verknüpft, daß sie in demselben Maße zunehmen wie seine Festigkeit. Wir müssen uns von der Vorstellung befreien, die Unfähigkeit des Stabes, eine konstante Länge zu bewahren, beruhe auf einer Unvollkommenheit. Der Stab erscheint Ihnen nur unvollkommen im Vergleich mit einem imaginären „Etwas“, das nicht diese elektrische Struktur besitzt — infolgedessen aber auch gar keine Materie ist. Die Fitz Gerald-Kontraktion ist keine Unvollkommenheit, sondern eine ebensowohl bestimmte charakteristische Eigenschaft der Materie wie die Trägheit.

Wir haben auf Grund der elektrischen Struktur der Materie eine rein qualitative Schlußfolgerung gezogen. Aufgabe des Mathematikers ist es, den Effekt auch quantitativ zu bestimmen. Im Jahre 1900 haben Lorentz und Larmor diese Berechnung ausgeführt und die Veränderung des mittleren Abstandes der Partikelchen bestimmt, die zur Wiederherstellung des durch die auftretenden magnetischen Kräfte gestörten Gleichgewichtes erforderlich ist. Die Berechnung ergab den genauen Wert der Fitz Gerald-Kontraktion, d. h. denselben Betrag, auf den man bereits aus den Ergebnissen der oben erwähnten Experimente geschlossen hatte. Unsere Behauptung steht daher auf zwei Füßen. Mancher wird den Ergebnissen deswegen Vertrauen entgegenbringen, weil sie durch exakte Experimente gestützt erscheinen. Andere werden sich leichter durch die Tatsache überzeugen lassen, daß die Fitz Gerald-Kontraktion die notwendige Folge der seit Maxwell allgemein als richtig anerkannten elektromagnetischen Gesetze ist. Experiment sowohl wie Theorie sind manchmal Irrtümern unterworfen. So ist es immerhin gut, sich auf beide stützen zu können.

Folgen der Fitz Gerald-Kontraktion. Dies eine Resultat von der Längenänderung eines bewegten Stabes wird zwar kaum jemanden die Notwendigkeit der Relativitätstheorie erkennen lassen, aber es sollte doch genügen, gegen die unbedingte Geltung der klassischen Physik einiges Mißtrauen zu erwecken. Der Physiker, der eine Länge messen will — und dies wird bei jedem Experiment in irgendeiner Form nötig sein —, nimmt einen Maßstab und legt ihn in der betreffenden Richtung an. Niemals ist es ihm in den Sinn

gekommen, daß ungeachtet der größten Vorsichtsmaßregeln der Stab hierbei seine Länge verändern würde. Und doch muß eine solche Veränderung eintreten, solange die Erde nicht in ihrer Bewegung innehält. Die Unveränderlichkeit eines Maßstabes ist der Fels, auf dem das Gebäude der Physik errichtet wurde. Und dieser Fels ist zerbröckelt! Sie werden vielleicht glauben, die Längenänderung kann nicht so bedeutend sein, sonst hätte sie unseren Physikern unmöglich so lange Zeit verborgen bleiben können. Wir wollen gleich sehen, wie es sich damit verhält, und uns darum einige von den Folgen der Fitz Gerald-Kontraktion etwas genauer ansehen.

Nehmen wir zunächst einen Fall, der ziemlich phantastisch erscheinen mag. Denken Sie, Sie wohnen auf einem Planeten, der mit der außerordentlichen Geschwindigkeit von 260 000 Kilometern in der Sekunde seine Bahn beschreibt. Für diese Geschwindigkeit beträgt die Fitz Gerald-Kontraktion ein Halb. Jeder feste Körper zieht sich um die Hälfte seiner Länge zusammen, wenn man ihn aus einer Lage senkrecht zur Bewegungsrichtung in eine solche parallel zur Bewegungsrichtung dreht. Eine Eisenbahnfahrt zwischen zwei Städten, die am Mittag 100 km betrug, ist abends, wenn der Planet sich um einen rechten Winkel gedreht hat, auf 50 km abgekürzt. Die Bewohner scheinen einem Trickfilm entsprungen zu sein. Sie strecken sich lang und schieben sich wieder zusammen wie ein Taschenfernrohr.

Mir ist allerdings kein Planet bekannt, der seine Bahn mit der hohen Geschwindigkeit von 260 000 km/sec beschreibt, aber immerhin könnte ich auf einen Spiralnebel verweisen, weit draußen im Weltenraum, der 1600 Kilometer in der Sekunde zurücklegt. Es ist durchaus möglich, daß der Nebel einen Planeten enthält, und (unwissenschaftlich gesprochen) gehe ich vielleicht auch nicht zu weit, wenn ich diesen Planeten gleich unserer Erde mit vernunftbegabten Wesen bevölkere. Bei einer Geschwindigkeit von 1600 km/sec reicht zwar die Kontraktion nicht aus, um sich im täglichen Leben bemerkbar zu machen, aber sie ist doch groß genug, um bei wissenschaftlichen Beobachtungen oder sogar bei Messungen von nur technischer Genauigkeit bemerkbar zu sein. Das Messen von Längen mit Hilfe eines beweglichen Maßstabes gehört zu den fundamentalsten Verrichtungen beim physikalischen Experimentieren. Man kann

sich also den Schrecken der Physiker auf diesem Planeten vorstellen, wenn sie plötzlich erkennen, daß die Voraussetzung, ihr Maßstab stelle ein unveränderliches Längenmaß dar, falsch ist. Welche ungeheure Mühe, alle je gemachten Experimente revidieren zu müssen, die notwendige Korrektur entsprechend der damaligen Orientierung des Maßstabes vorzunehmen, alle aus den Beobachtungen abgeleiteten Schlußfolgerungen zu überprüfen und auf Grund der verbesserten Resultate das gesamte System der Physik neu aufzubauen! Wie dankbar müssen unsere Physiker sein, daß sie nicht auf jenem Ausreißer von Spiralnebel, sondern auf der langsam und gesittet sich bewegenden Erde leben!

Aber halt! Ist es so sicher, daß die Erde sich langsam bewegt? Ich sehe im Geiste die Astronomen auf jenem Nebel, wie sie weit draußen im Weltenraum einen unbedeutenden Stern beobachten, der von einem ganz untergeordneten Planeten begleitet wird, Erde genannt. Sie beobachten auch, daß sich dieser Planet mit der außerordentlichen Geschwindigkeit von 1600 km/sec bewegt. Natürlich! Wenn wir beobachten, daß jene sich von uns mit einer Geschwindigkeit von 1600 km/sec fortbewegen, so stellen sie ihrerseits fest, daß wir uns von ihnen mit derselben Geschwindigkeit entfernen! „Eintausendsechshundert Kilometer in der Sekunde!“ rufen die Nebelphysiker aus. „Die unglücklichen Physiker auf der Erde! Die Fitz Gerald-Kontraktion muß ja bei ihnen eine ganz deutlich wahrnehmbare Größe haben, und alle ihre Messungen mit Maßstäben müssen beträchtlich falsch sein. Die werden merkwürdige Naturgesetze abgeleitet haben, falls ihnen dieser Umstand entgangen ist!“

Man kann durch keinerlei Mittel entscheiden, wer recht hat, wem die beobachtete relative Geschwindigkeit von 1600 km/sec in Wirklichkeit zugeschrieben werden muß. Vom Standpunkt des Astronomen scheint das Milchstraßensystem, zu dem die Erde gehört, um nichts wichtiger oder zentraler gelegen als der Nebel. Der Anspruch, daß gerade wir uns angenähert in einem Zustand der Ruhe befinden, entbehrt jeder Begründung. Er ist reine Selbstüberhebung.

„Aber“, werden Sie einwenden, „wenn diese starken Längenänderungen auf der Erde stattfinden würden, so hätten wir sie bei unseren Messungen längst bemerken müssen!“ Damit sind wir beim springenden Punkt angelangt: Wir könnten die Längenänderungen durch keinerlei Mes-

sungen feststellen. Es ist möglich, daß sie eintreten und sich trotzdem der Beobachtung entziehen. Lassen Sie mich versuchen, Ihnen diesen merkwürdigen Sachverhalt verständlich zu machen.

Unser Zimmer bewegt sich, sagen wir, mit einer Geschwindigkeit von 260 000 km/sec senkrecht nach oben. Wenigstens stelle ich diese Behauptung auf, und an Ihnen ist es, sie zu widerlegen. Ich hebe meinen Arm aus einer wagerechten Haltung in eine senkrechte, und er zieht sich auf die Hälfte seiner ursprünglichen Länge zusammen. Sie glauben mir nicht? Schön. Bringen Sie ein Metermaß und messen Sie nach. Zuerst wagerecht, das Ergebnis ist 75 Zentimeter, nun senkrecht, das Ergebnis ist 75 Halb-Zentimeter. Denn Sie dürfen die Tatsache nicht außer acht lassen, daß auch jedes Zentimeterstückchen des Maßstabes sich auf einen halben Zentimeter zusammengezogen hat, sobald Sie den Maßstab in eine senkrechte Lage gebracht haben.

„Aber wir sehen doch, daß Ihr Arm nicht kürzer wird. Können wir denn unseren eigenen Augen nicht trauen?“

Sicher nicht. Es sei denn, Sie ziehen in Betracht, daß auch Ihre Netzhaut, als Sie heute morgen aufstanden, sich in vertikaler Richtung auf die Hälfte ihrer ursprünglichen Ausdehnung zusammengezogen hat. Infolgedessen sieht sie jetzt Abstände in vertikaler Richtung doppelt so groß wie in horizontaler.

„Schön“, sagen Sie, „dann bleibe ich einfach liegen und beobachte Ihre Bewegungen in einem geneigten Spiegel. Meine Netzhaut bleibt wie sie ist, und ich weiß sicher, ich werde trotzdem keinerlei Verkürzung beobachten.“

Aber ein bewegter Spiegel liefert kein unverzerrtes Bild der Erscheinungen. Der Reflexionswinkel wird durch die Bewegung des Spiegels geändert, genau so, wie der Winkel, unter dem ein Billardball abprallt, geändert würde, falls die Bande sich bewegte. Wenn Sie nach den gewöhnlichen optischen Gesetzen die Veränderung berechnen, die eine Bewegung des Spiegels von 260 000 km/sec hervorruft, werden Sie finden, daß die entstandene Verzerrung des Bildes die Fitz Gerald-Kontraktion meines Armes gerade wieder ausgleicht, so daß die Verkürzung nicht beobachtet werden kann. Und so wird es mit jedem Beweis sein, den Sie mir vorschlagen. Sie können meine Behauptung nicht widerlegen, und ich kann sie nicht beweisen. Ebensogut

hätte ich eine andere Geschwindigkeit voraussetzen und diese verteidigen können. Wie aber ist es dann möglich, daß die Fitz Gerald-Kontraktion durch den Michelson-Morley-Versuch und andere Experimente bewiesen und sogar gemessen werden konnte? Dies ist darauf zurückzuführen, daß alle diese Versuche sogenannte Null-Experimente sind; genau so, wie Ihr Versuch, die Verkürzung meines Armes in einem geneigten Spiegel zu beobachten, ein Null-Experiment war. Man erwartete gewisse optische oder elektrische Wirkungen der Erdbewegung von derselben Art wie die Verzerrung der Bilder in einem bewegten Spiegel. Diese hätten sich müssen beobachten lassen, oder es mußte eine Kontraktion eingetreten sein gerade von dem rechten Betrag, um sie zu kompensieren. Die Wirkungen wurden nicht beobachtet, also mußte die kompensierende Kontraktion eingetreten sein. Allerdings blieb noch die Möglichkeit, daß die wahre Geschwindigkeit der Erde durch den Weltraum im Augenblick des Experimentes gerade gleich Null war. Auch das wurde ausgeschlossen, als man die Versuche sechs Monate später mit dem gleichen Resultat wiederholte; denn die Geschwindigkeit der Erde konnte nicht beidemal Null gewesen sein. Auf diese Weise wurde die Fitz Gerald-Kontraktion experimentell nachgewiesen und das Gesetz ihrer Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bestätigt gefunden. Der wahre Betrag der Kontraktion war aber bei beiden Versuchen unbekannt, da die wahre Geschwindigkeit der Erde (nicht ihre Bahngeschwindigkeit um die Sonne) unbekannt war. Und sie wird auch unbekannt bleiben, weil die optischen und elektrischen Effekte, durch die wir hoffen könnten, die Geschwindigkeit zu bestimmen, infolge der Kontraktion immer gerade aufgehoben werden.

Ich habe gesagt, daß die Unveränderlichkeit der Maßstäbe der Fels ist, auf dem das Gebäude der Physik errichtet wurde. Nun benutzt man statt eines materiellen Maßstabes oft auch elektrische und optische Meßmethoden zur Ermittlung von Längen, so daß der Bau gewissermaßen noch von Hilfsstützen getragen wird. Es erweist sich jedoch, daß alle diese Hilfsmittel sich gegen uns verschworen haben. Der Fels ist zerbröckelt und zugleich sind alle übrigen Stützen zusammengebrochen.

Raumgerüste. Wir können nun zu der Streitfrage zwischen den Nebelphysikern und den Erdphysikern zurück-

kehren. Der Fall lag so: Eine der beiden Parteien hat eine große Geschwindigkeit und ihre Messungen werden durch das Zusammenschrumpfen ihrer Maßstäbe ernstlich gestört. Für jede Partei hat es bisher außer Frage gestanden, daß natürlich nicht sie, sondern die andere ihre Sache falsch mache. Der Streit kann durch keinerlei experimentelle Entscheidung geschlichtet werden, weil jedes Experiment notwendig zwei Fehlerquellen in sich trägt, die sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben.

Das ist ein merkwürdiger Fehler, der immer seine eigene Kompensation mit sich führt! Aber vergessen Sie nicht, daß die Kompensation nur die wirklich beobachteten oder beobachtbaren Vorgänge betrifft. Sie betrifft nicht das Zwischenstück unserer Beweisführung — jenes System von Schlüssen, die aus Beobachtungen gezogen sind und die klassische physikalische Theorie des Universums bilden.

Angenommen, sowohl wir als auch die Nebelphysiker untersuchen die Welt, d. h. wir ordnen den uns umgebenden Dingen ihren entsprechenden Platz im Raume zu. Die eine Partei, sagen wir die Nebelphysiker, habe eine große Geschwindigkeit. Ihr Metermaß wird sich verkürzen und weniger als einen Meter messen, wenn sie es in einer bestimmten Richtung anlegen. Infolgedessen werden sie für alle Entfernungen in dieser Richtung eine zu große Meterzahl ansetzen. Es macht keinen Unterschied, ob sie einen Maßstab oder einen Theodoliten benutzen, oder ob sie sich nur nach ihrem Augenmaß richten: Alle ihre Meßmethoden müssen miteinander übereinstimmen. Könnte eine Nichtübereinstimmung irgendwelcher Art durch Bewegung hervorgerufen werden, so würde uns ihr Betrag ein Maß für die Größe der Bewegung geben. Es führen aber, wie wir gesehen haben, Theorie und Beobachtung übereinstimmend zu dem Ergebnis, daß vollkommene Kompensation stattfindet. Wenn die Physiker auf jenem Sternnebel ein Quadrat konstruieren wollen, so wird es in der Bewegungsrichtung verkürzt sein, aber kein Versuch kann ihnen jemals enthüllen, daß es kein Quadrat ist. Handelt es sich um besonders fortschrittliche Gelehrte, so werden sie vielleicht einsehen, daß es Leute auf einer andern Welt gibt, die es sich in den Kopf gesetzt haben, ihr Quadrat sei kein Quadrat. Vielleicht sind sie sogar vorurteilsfrei genug, zuzugeben, daß diese Ansicht, so absurd sie auch scheinen mag, ebenso berechtigt ist wie ihre eigene. Es ist klar, daß

ihre gesamte Raumanschauung, mit der unsrigen verglichen, verzerrt ist, und ebenso ist unsere Raumanschauung verzerrt im Vergleich zu der ihrigen. Wir betrachten das gleiche Weltall, aber wir ordnen es nicht dem gleichen Raume ein. Unsere ursprüngliche Streitfrage, welcher von uns beiden sich mit einer Geschwindigkeit von 1600 km/sec bewegt, hat eine so große Kluft zwischen uns aufgetan, daß wir nicht einmal den gleichen Raum verwenden können.

Raum und Zeit sind Worte, die mehr als eine Bedeutung vermitteln. Raum ist eine unermeßliche Leere, oder eine so und so große Anzahl von Metern, Quadratmetern, Kubikmetern. Zeit ist ein seit je und je fließender Strom, oder auch etwas, das uns durch drahtlose Zeichen übermittelt werden kann. Der Physiker kann keine unbestimmten Begriffe gebrauchen. Er hat sie wohl manchmal, leider!, aber er hat keine Verwendung dafür. Wenn er von Raum spricht, so sind es immer die Meter und Kubikmeter, die er im Sinne hat. Das ist der Gesichtspunkt, von dem aus unser Raum und der Raum des Nebelphysikers verschiedene Räume sind. Unsere Messungen in Metern und Kubikmetern sind verschieden. Um Mißverständnissen vorzubeugen, ist es vielleicht besser, zu sagen, daß wir verschiedene „Raumgerüste“ haben — verschiedene Gerüste, auf die wir die Lagenangabe der Dinge beziehen. Glauben Sie nun bitte nicht, so ein „Raumgerüst“ sei für unser Bewußtsein etwas Künstliches. Das Raumgerüst³ entsteht gleichzeitig mit unseren ersten räumlichen Wahrnehmungen in unserer Vorstellung. Um das zu erkennen, braucht man nur nochmals den extremen Fall zu betrachten, daß die Fitz Gerald-Kontraktion ein halb beträgt. Wenn jemand ein Rechteck mit dem Seitenverhältnis 2:1 für ein Quadrat hält, so ist es klar, daß sich ihm von Anfang an der Raum in ganz anderer Weise dargeboten haben muß als uns.

Das Raumgerüst oder Bezugssystem, das ein Beobachter benutzt, hängt nur von seiner Bewegung ab. Beobachter auf verschiedenen Himmelskörpern von gleicher Geschwindigkeit (also der Relativgeschwindigkeit Null) werden in ganz derselben Weise die Lagebestimmung der Dinge im Weltenraum vornehmen. Aber Beobachter auf Himmelskörpern verschiedener Geschwindigkeit haben verschiedene Bezugssysteme. Sie fragen vielleicht, wie ich mit solcher Sicherheit über die Art und Weise berichten kann, in der diese Phantasiewesen ihre Beobachtungen auslegen. Wenn

Sie daraus einen Einwand machen, so werde ich mich nicht verteidigen. Aber wer eine Abneigung gegen meine Phantasiewesen hat, muß bereit sein, einer Beweisführung in mathematischen Formeln und Symbolen zu folgen. Es ist der Zweck dieser Betrachtungen gewesen, Ihnen in gemeinverständlicher Form gewisse Schlußfolgerungen zu vermitteln, die ursprünglich aus irdischen Experimenten und Berechnungen über die Wirkung von Bewegungen auf elektrische, optische und metrische Erscheinungen abgeleitet worden sind. So viel Sorgfalt und Mühe ist auf diese Untersuchungen verwandt worden, daß die Wissenschaft die Folgen überblicken kann, die sich ergeben, wenn man Messungen mit äußerst schnell bewegten Instrumenten macht, seien es nun technische Meßinstrumente oder auch eine menschliche Netzhaut. Nur in einer Beziehung gilt mir der Beobachter auf meinem Nebelplaneten mehr als ein Teil eines Registrierapparates; ich nehme an, daß auch er die allgemeine menschliche Schwäche hat, es für ausgemacht zu halten, daß Gott, als er das Weltall schuf, vor allem an seinen Planeten dachte. Infolgedessen ist er (wie vielleicht auch mein Leser?) nicht sehr geneigt, die Raumanschauungen von Leuten ernst zu nehmen, die das Unglück haben, sich mit einer Geschwindigkeit von 1600 km/sec relativ zu seinem heimischen Kirchturm zu bewegen.

Ein ganz ungewöhnlich bescheidener Beobachter wäre vielleicht gern bereit, statt seines eigenen irgendeinen anderen Planeten als Ruhe-Standard zu nehmen. Dann würde er alle seine Messungen gemäß der Fitz Gerald-Kontraktion, die seiner eigenen Bewegung relativ zu diesem Standard-Planeten entspricht, zu korrigieren haben. Die korrigierten Maße würden das Raumgerüst des Standard-Planeten ergeben, wie die ursprünglichen das seines eigenen Planeten lieferten. Aber das Dilemma würde für ihn nur noch schlimmer, denn es gibt kein Zeichen, das ihn bei der Wahl des Standard-Planeten leiten könnte. Hat er sich erst einmal von dem naiven Vorurteil befreit, daß sein eigenes Raumgerüst das allein in Frage kommende und einzig richtige Bezugssystem sei, so steht er vor der Frage: Welches von den unzähligen anderen Bezugssystemen ist dann das richtige? Da gibt es keine Antwort und so weit wir sehen können auch keine Möglichkeit einer Antwort. Inzwischen müssen alle seine Messungen unausgewertet warten, da die Korrekturen, die er anbringen muß, von der Antwort abhängen.

Ich fürchte, unser bescheidener Freund wird gegenüber seinen weniger demütigen Kollegen ins Hintertreffen geraten.

Die Schwierigkeit, in der wir uns befinden, besteht nicht darin, daß wir etwas notwendig Falsches durch die Benutzung unseres bisherigen Bezugsgerüsts gefunden hätten; es haben sich keine experimentellen Widersprüche ergeben. Nur das haben wir an unserem Bezugssystem als „falsch“ erkannt, daß es nicht das einzige ist. Hätte sich herausgestellt, daß unser Raumgerüst unzureichend und ein anderes vorzuziehen wäre, so hätte dies keine große Revolution in unserer Denkweise hervorgerufen. Aber die Entdeckung, daß unser System nur eines unter vielen gleichberechtigten Systemen ist, bedingt eine vollkommene Umwandlung unserer Auffassung von der Bedeutung eines Bezugssystems überhaupt.

Einwände des „gesunden Menschenverstandes“. Bevor ich weitergehe, möchte ich jenem stets vorhandenen Kritiker erwidern, der sich im Namen des gesunden Menschenverstandes erhebt. Der Raum — s e i n Raum — ist ihm so anschaulich vertraut. „Dies Ding, das ist doch klar, ist hier und jenes dort. Ich weiß das einfach. Und keine noch so paradoxen wissenschaftlichen Enthüllungen über verkürzte Maßstäbe werden mich irre machen.“

Wir haben über die Einordnung der Dinge im Raum ganz bestimmte vorgefaßte Meinungen, die schon von den Zeiten auf uns überkommen sind, wo unsere Urväter noch große Ähnlichkeit mit Affen hatten. Diese Anschauungen sind so tief mit unserer ganzen Art zu denken verwurzelt, daß es schwer ist, sie einer vorurteilslosen Kritik zu unterziehen und uns bewußt zu werden, wie unsicher der Boden ist, auf dem sie ruhen. Wir setzen allgemein voraus, daß jedes Ding unserer Umgebung eine ganz bestimmte Lage im Raume hat, und daß wir seine richtige Lage wahrnehmen. Die Dinge in meinem Arbeitszimmer befinden sich tatsächlich an den Orten, an denen ich sie „wahrnehme“. Und wenn ein Beobachter (auf einem andern Stern) mein Zimmer mit Hilfe von Maßstäben und anderen Instrumenten ausmißt und behauptet, die Anordnung der Gegenstände sei ganz anders, so sind das wissenschaftliche Hirngespinnste, welche die wirkliche Lagebestimmung, die dem gesunden Menschenverstand ohne weiteres einleuchtet, nicht erschüttern können. Wer diese Einstellung hat, weist die Frage:

Wie werde ich die Einordnung der Dinge im Raume gewahr? mit Verachtung von sich. Wenn eine Lagebestimmung mit Hilfe wissenschaftlicher Messungen unter Anwendung der größten Vorsicht ausgeführt wurde, sind wir gleich bei der Hand, alle Wege aufzustöbern, auf denen die Apparate doch vielleicht ihre Tücke hätten zeigen können. Aber wenn die Kenntnis ohne Vorsicht erlangt ist, wenn sie uns ganz ungesucht kommt, dann ist sie augenscheinlich wahr und jeder Zweifel würde dem gesunden Menschenverstand ins Gesicht schlagen. Es kommt uns ungefähr so vor (obgleich wir das nicht gern zugeben), als ob der Verstand einen Fühler in den Raum ausstreckte und sich direkt von der Lage jedes wohlvertrauten Gegenstandes vergewisserte. Das ist Unsinn. Auf diese Weise macht der gesunde Menschenverstand seine Erfahrungen nicht. Unsere Kenntnis von der Lage der Dinge im Raume beruht überhaupt weder auf einer Erkenntnis des Verstandes noch des gesunden Menschenverstandes, sondern auf Sinneswahrnehmung. Zum Teil wird sie durch unmittelbare Berührung und durch Veränderung unseres Standortes erworben (dieser oder jener Gegenstand ist eine Armlänge oder einige Schritte weit entfernt), zum andern Teil durch Anvisieren mit dem Auge. Ist da irgendein wesentlicher Unterschied — abgesehen von der gröberen Art der Durchführung — zwischen diesen Methoden und wissenschaftlichen Messungen mit einem Maßstab oder einem Theodoliten? Unsere übliche Kenntnis von der Lage der Dinge im Raume ist keine mysteriöse Offenbarung einer unantastbaren Autorität, sondern sie kommt durch Beobachtungen von derselben Art — nur in roherer Ausführung — zustande, wie man sie bei einer wissenschaftlichen Messung macht. Innerhalb seiner Genauigkeitsgrenzen ist der Einordnungsplan der Dinge, den ich so von selbst „wahrnehme“, der nämliche wie mein wissenschaftlicher Einordnungsplan oder mein „Raumgerüst“.

Wenn wir statt der Linse und der Netzhaut unseres Auges eine mit größter Sorgfalt hergestellte Fernrohrlinse und eine lichtempfindliche Platte benutzen, so steigern wir die Genauigkeit unserer Erforschung des Raumes, ändern aber nichts an ihrem Wesen. Mit Hilfe der verfeinerten Beobachtungsmethoden wurden wir gewisser charakteristischer Eigenschaften des Raumes gewahr, die unserem affenähnlichen Vorfahren unbekannt waren, als er die allgemeinen Raumschauungen begründete, die er uns überliefert hat.

Der von ihm überkommene Einordnungsplan arbeitet so lange widerspruchsfrei, als keine wesentlichen Änderungen des Bewegungszustandes eintreten (einige Kilometer mehr oder weniger in der Sekunde machen dabei noch nichts aus). Aber eine große Änderung der Bewegung bedingt den Übergang zu einem neuen Einordnungsplan, der zwar ebenfalls in sich widerspruchsfrei ist, jedoch in Widerspruch zu dem ursprünglichen Plan steht. Hat man erst einmal mehrere von diesen Einordnungsplänen, so kann man nicht länger behaupten, daß jeder von ihnen anzeigt, „wo die Dinge in Wirklichkeit sind“. Die Einordnung der Dinge im Raume ist nicht das Ergebnis einer übernatürlichen Offenbarung, sondern eine gewisse, auf Herkommen beruhende Zusammenfassung solcher Eigenschaften und Beziehungen der Objekte, die bestimmte Gesichts- und Tastempfindungen bedingen.

Zeigt dies nicht, daß der „richtigen“ Anordnung im Raume bei weitem nicht die fundamentale Bedeutung zukommt, die ihr in dem Newtonschen System zugesprochen wird? Die verschiedenen Beobachter können recht willkürlich damit umspringen, ohne daß es etwas schadet.

Wenn wir annehmen, daß die Anordnung der Gegenstände im Raume, ich will nicht direkt sagen eine Fabel, jedenfalls aber keine so wohldefinierte Sache ist, wie es die klassische Physik als sicher voraussetzt, wenn wir annehmen, daß Newtons Vorstellung von der Lage eines Objektes ein gut Teil lautere Wahrheit und ein gut Teil unechtes Beiwerk enthält, und daß unsere beiden Beobachter nicht über die darin enthaltene Wahrheit, sondern über das Beiwerk im Streit liegen, so würde das viel zur Klärung beitragen. Es würde u. a. die Frage eine natürliche Lösung finden, warum alle Naturkräfte sich verschworen zu haben scheinen, uns an der Entdeckung der genauen Lage eines Gegenstandes, d. h. an der Feststellung seines Platzes im „richtigen“ Raumgerüst zu verhindern. Natürlich läßt sich dieser Platz nicht entdecken, wenn es das „richtige“ Raumgerüst gar nicht gibt.

Wir werden diesen Gedankengang im nächsten Kapitel weiter verfolgen. Vorher aber wollen wir uns das Beweismaterial nochmals vor Augen halten, das zu der vorliegenden Situation geführt hat. Die Schwierigkeit entstand dadurch, daß sich unser Glaube an die Unveränderlichkeit eines materiellen Maßstabes als irrig erwiesen hat, eine Erkenntnis, die sich sowohl auf Grund gewichtiger experimenteller

Beweise, als auch einfacher als logische Folge unserer Theorie von der elektrischen Struktur der Materie zwangsläufig ergab. Dieses unvorhergesehene Verhalten des Maßstabes beruht auf einer universellen Eigenschaft aller Materie und erstreckt sich sogar auch auf optische und elektrische Meßmethoden. Durch Anwendung der üblichen Meßmethoden kann sich somit niemals eine Diskrepanz ergeben, die uns den Fehler in unseren Messungen offenbaren würde. Doch tritt eine solche Diskrepanz sofort deutlich zutage, wenn wir die Standardbewegung ändern, auf welche wir die Bewegung der Meßanordnung beziehen, indem wir z. B. von einem irdischen Beobachter gemessene Abstände und Längen mit denen vergleichen, die ein Beobachter auf einem Planeten von anderer Geschwindigkeit messen würde. Vorläufig wollen wir gemessene Längen, welche diese Diskrepanz enthalten, „fiktive Längen“ nennen.

Gemäß dem Newtonschen System ist die Länge wohl bestimmt und es gibt immer nur eine einzige; jeder Beobachter sollte die nötigen Korrekturen anbringen (die von seiner Bewegung abhängen), um seine fiktiven Längen auf die eine Newtonsche Länge zu reduzieren. Doch dagegen läßt sich zweierlei einwenden: Erstens sind die Korrekturen unbestimmt. Wir kennen wohl die Korrekturen, mit denen unsere eigenen fiktiven Längen auf diejenigen umzurechnen sind, die ein anderer Beobachter mit beliebig vorgeschriebenem Bewegungszustand gemessen hat. Aber kein Kriterium kann uns zeigen, welches System das einzig wahre im Sinne Newtons ist. Zweitens ist der gesamte Besitzstand der heutigen Physik auf unkorrigierten irdischen Längenmessungen begründet. Während sich also alle Aussagen anscheinend auf Newtonsche Längen beziehen, sind sie in Wirklichkeit für fiktive Längen bewiesen worden.

Die Fitz Gerald-Kontraktion mag eine zu geringfügige Ursache scheinen, um das ganze Gebäude der klassischen Physik zu Fall zu bringen. In der Tat aber würden unter den Experimenten, die für unsere naturwissenschaftliche Erkenntnis wesentlich sind, nur ganz wenige unangetastet bleiben, wenn unsere Methoden der Längenmessung an der Wurzel krank wären. Nun finden wir, daß es keine Gewähr dafür gibt, daß sie nicht einem systematischen Fehler unterworfen sind. Und was noch schlimmer ist, wir wissen nicht einmal, ob der Fehler vorhanden ist oder nicht, und wir haben allen Grund anzunehmen, daß es unmöglich ist, es zu wissen.

RELATIVITÄT

Das Einsteinsche Prinzip. Der bescheidene Beobachter aus dem ersten Kapitel sah sich der Aufgabe gegenüber, zwischen einer Anzahl von Raumgerüsten zu wählen, ohne irgendeinen leitenden Gesichtspunkt zu haben. Diese Raumgerüste sind insofern verschieden, als sie die materiellen Objekte der Welt einschließlich des Beobachters in verschiedener Weise räumlich ordnen, aber sie sind ununterscheidbar, insofern die Welt genau den gleichen Gesetzen gehorcht, unabhängig davon, welchem Gerüst sie eingeordnet ist. Zufällig auf einem bestimmten Planeten geboren, hat der Beobachter bis jetzt ohne Überlegen das an diesen geheftete gewählt. Nun aber wird er sich bewußt, daß die Zufälligkeit seiner Geburt kein Grund für die hartnäckige Behauptung ist, dieses Gerüst sei das richtige. Welches aber ist das richtige?

An diesem kritischen Punkt setzt Einstein mit der Frage an:

„Ihr sucht ein Gerüst des Raumes, das Ihr das ‚richtige‘ nennt. Worin besteht denn diese R i c h t i g k e i t?“

Sie stehen mit einem Zettel in der Hand vor einer Reihe vollkommen gleicher Pakete und sind beunruhigt, weil Sie keine Möglichkeit haben zu entscheiden, an welchem der Pakete er befestigt werden soll. Sehen Sie nach, was auf dem Zettel geschrieben steht. Nichts.

„Richtig“ angewendet auf ein Raumgerüst ist so ein leerer Zettel. Es wird dabei irgendeine Eigenschaft vorausgesetzt, die das richtige Gerüst von einem falschen unterscheidet. Aber wenn wir fragen, welches denn diese Eigenschaft des richtigen Raumgerüstes sei, erhalten wir immer nur die eine Antwort: „seine Richtigkeit“, und das macht das Problem nicht klarer, noch überzeugt es uns, daß überhaupt ein Sinn darin liegt. Ich bin bereit, die Möglichkeit zuzulassen, daß Raumgerüste — trotz ihrer im Augenblick augenscheinlichen Gleichartigkeit — sich doch in Zukunft als nicht gänzlich

ununterscheidbar erweisen. (Ich halte es für unwahrscheinlich, aber ich schließe es keineswegs aus.) Ein künftiger Physiker mag vielleicht entdecken, daß das — sagen wir — zum Arkturus gehörige Gerüst einzigartig in bezug auf irgendeine der Wissenschaft bisher unbekannte Eigenschaft ist. Dann — da gibt es keinen Zweifel — wird unser Freund mit dem Zettel ihn sofort ankleben. „Hab ich's nicht gesagt? Ich wußte ja, daß es so etwas geben müsse, als ich von einem richtigen Raumgerüst sprach.“ Dennoch scheint es mir ein unfruchtbares Beginnen, noch weiter davon zu reden, nur auf die entfernte Möglichkeit hin, daß vielleicht einmal die Nachwelt einen Sinn darin entdecken könne.

In der Einsteinschen Theorie ist die Lage so, daß die Frage nach einem einzigen richtigen Raumgerüst überhaupt nicht auftritt. Da gibt es ein Raumgerüst, bezogen auf einen irdischen Beobachter, ein anderes bezogen auf die „Nebel-Beobachter“, und wieder andere bezogen auf andere Sterne. Raumgerüste sind immer auf etwas bezogen, sie sind „relativ“, wie der Physiker sagt. Entfernungen, Längen, Volumina — alle räumlichen Maßgrößen, die sich auf die Gerüste beziehen — sind gleichfalls relativ. Eine Entfernung, wie sie der eine Beobachter von dem einen Stern aus rechnet, ist so gut, wie die, die ein anderer Beobachter von einem andern Stern aus rechnet. Wir dürfen nur nicht erwarten, daß sie übereinstimmen, denn einmal handelt es sich um eine Entfernung bezogen auf das eine Gerüst, das andere Mal um eine Entfernung bezogen auf ein anderes Gerüst. Absolute Entfernung, nicht bezogen auf ein bestimmtes Gerüst, ist sinnlos.

Des weiteren muß man beachten, daß auch die andern physikalischen Größen an das Raumgerüst gebunden sind, so daß sie ebenfalls relativ sind. Sie alle haben wohl schon „Dimensions“-Tabellen gesehen, auf denen die physikalischen Größen durch Länge, Zeit und Masse ausgedrückt sind. Wenn Sie hier die Länge anders rechnen, so rechnen Sie auch die andern physikalischen Größen anders.

Betrachten wir einen elektrisch geladenen Körper, der sich auf der Erde in Ruhe befindet, und infolgedessen zwar ein elektrisches Feld, aber kein Magnetfeld besitzt. Für den „Nebel-Physiker“ bewegt er sich mit der Geschwindigkeit von 1600 Kilometer in der Sekunde und bildet somit einen elektrischen Strom, der gemäß den Gesetzen des Elektromagnetismus ein Magnetfeld erzeugt. Wie kann derselbe Körper gleichzeitig ein Magnetfeld erzeugen und dies nicht

tun? Vom Standpunkt der klassischen Physik aus müßte das eine dieser Resultate als Täuschung angesehen werden. (Das geht zwar ohne Schwierigkeit. Man hat nur keinen Anhalt, welches der beiden Resultate man wegerklären soll.) Die Relativitätstheorie läßt beide Resultate gelten. Magnetische Felder sind relativ. Es ist ein Magnetfeld da relativ zum Raumgerüst des Nebels, und es ist kein Magnetfeld da relativ zum Raumgerüst der Erde. Die Instrumente auf dem Nebel werden in aller Form ein Magnetfeld anzeigen, obgleich unsere Instrumente kein Magnetfeld anzeigen. Der Grund hierfür liegt darin, daß der Nebel-Physiker Instrumente benutzt, die auf seinem Planeten ruhen, und wir Instrumente benutzen, die auf der Erde ruhen; oder wenigstens werden die Beobachtungen so berichtet, daß sie mit den Angaben von Instrumenten übereinstimmen, die in den beiderseitigen Raumgerüsten ruhen.

Ist nun das Magnetfeld wirklich vorhanden oder nicht? Dies ist ebenso wie bei der Frage mit dem Quadrat und dem Rechteck. Es gibt eine Beschreibung des Magnetfeldes relativ zu dem einen Planeten, und eine andere Beschreibung relativ zu dem andern, aber es gibt keine absolute Beschreibung.

Es ist nicht ganz richtig zu sagen, daß alle physikalischen Größen relativ, d. h. auf Raumgerüste bezogen sind. Durch Multiplizieren, Dividieren usw. können wir neue physikalische Größen bilden. Multiplizieren wir eine Masse und eine Geschwindigkeit, so gibt das einen Impuls. Dividieren wir eine Energie durch eine Zeit, so erhalten wir eine Anzahl Pferdekräfte. Man kann sich das mathematische Problem stellen, auf diese Weise invariante Größen zu finden, d. h. Größen, die für alle Raumgerüste den gleichen Betrag haben. Ein oder zwei dieser Invarianten erweisen sich als Größen, die man schon in der prärelativistischen Physik aufgefunden hatte; „Wirkungsgröße“ und „Entropie“ sind die bekanntesten. Solche Invarianten sind für die Relativitäts-Physik von besonderer Wichtigkeit, und sie hat noch einige mehr aufgezeigt und benannt. Es ist ein weit verbreiteter Irrtum, zu glauben, daß die Einsteinsche Relativitätstheorie alles als relativ ansähe. In Wahrheit sagt sie folgendes: „Es gibt absolute Dinge in der Welt, aber man muß tief danach schürfen. Die Dinge, die sich zuerst darbieten, stellen sich meistens als relativ heraus.“

Relative und absolute Größen. Ich will versuchen, Ihnen den Unterschied zwischen relativen und absoluten Größen klarzumachen. Eine Anzahl (von diskreten Einzeldingen) ist absolut. Sie wird durch Zählen erhalten, und Zählen ist eine absolute Operation. Wenn zwei Menschen die Anzahl der Leute in diesem Raume zählen, und sie gelangen zu zwei verschiedenen Ergebnissen, so ist notwendigerweise eines falsch.

Das Messen von Entfernungen ist keine absolute Operation. Es ist möglich, daß zwei Menschen beim Messen einer Entfernung verschiedene Resultate erhalten, ohne daß einer von ihnen sich geirrt hat.

Ich zeichne zwei Punkte an die Tafel und bitte zwei Studenten, mit äußerster Genauigkeit den Abstand zwischen den Punkten zu messen. Damit ja kein Zweifel darüber entstehen kann, was ich darunter verstehe, gebe ich ihnen ausführliche Anweisungen über den Maßstab, den sie benutzen sollen, und was für Vorsichtsmaßregeln sie anwenden müssen, um ein genaues Resultat zu erhalten. Trotzdem bringen sie mir Ergebnisse, die voneinander abweichen. Auf meine Bitte, ihre Aufzeichnungen zu vergleichen, um herauszufinden, welcher von beiden sich geirrt hat, kommen sie sofort zurück und sagen: „Es ist Ihr eigener Fehler, denn Ihre Anweisungen waren nicht ausführlich genug. Sie haben ja gar nicht erwähnt, was für eine Bewegung der Maßstab haben soll, während wir ihn benutzen.“ Der eine von ihnen hatte, ohne viel nachzudenken, seinen Maßstab relativ zur Erde in Ruhe gehalten. Der andere aber hatte in Betracht gezogen, daß die Erde nur ein ganz unbedeutender Planet sei, von dem der Professor weiter keine hohe Meinung hatte. Er dachte, es würde nur vernünftig sein, einen imposanteren Himmelskörper auszuwählen, um nach ihm die Bewegung des Maßstabes einzustellen, und so hatte er ihm eine Bewegung erteilt, die mit der des Riesensternes Beteigeuze übereinstimmte. Natürlich ist die Fitz Gerald-Kontraktion an der Verschiedenheit ihrer Meßresultate schuld gewesen.

Ich bin aber nicht geneigt, diese Entschuldigung gelten zu lassen und sage streng: „Was hat das mit der Erde oder mit dem Beteigeuze zu tun? Wozu brauchen Sie einen Standardkörper außerhalb Ihres Problems? Ich habe Ihnen gesagt, Sie sollen den Abstand zweier Punkte auf der Tafel messen, da hätten Sie eben die Bewegung Ihres Maßstabes mit der Bewegung der Tafel in Übereinstimmung bringen

sollen. Selbstverständlich verlangt der gesunde Menschenverstand, daß Meßinstrument und zu messender Gegenstand dieselbe Geschwindigkeit haben. Denken Sie bitte das nächste Mal daran.“

Einige Tage später stelle ich denselben Studenten die Aufgabe, die Wellenlänge von Natriumlicht zu messen, d. h. den Abstand zwischen zwei Wellenbergen der Lichtwellen. Sie tun es und kommen in triumphierendem Einverständnis zu mir zurück: „Die Wellenlänge ist unendlich.“ Ich bedeute ihnen, daß dies mit dem Wert von 0,000 059 cm, der im Buch angegeben ist, nicht gerade übereinstimmt. „Ja“, sagen sie, „das haben wir auch bemerkt, aber der Mann im Buch hat es nicht richtig gemacht. Sie haben gesagt, wir sollen immer die Geschwindigkeit von Meßinstrumenten und zu messendem Gegenstand in Übereinstimmung bringen. So haben wir keine noch so großen Mühen und Kosten gescheut und unsere Maßstäbe mit der Geschwindigkeit des Lichtes durch das Laboratorium gejagt.“ Bei dieser Geschwindigkeit wird aber die Fitz Gerald-Kontraktion unendlich, die Maßstäbe schrumpfen zu nichts zusammen und so braucht man unendlich viele, um das Intervall zwischen Wellenberg und Wellenberg auszufüllen.

Meine Hilfsregel war in einer Beziehung ganz gut gewesen, denn auf diese Weise würden die beiden Studenten immer etwas Absolutes erhalten — etwas, bei dem ihre Messungen unbedingt in gegenseitiger Übereinstimmung bleiben würden. Nur will es das Unglück, daß es keine Längen und Entfernungen mehr sind, die sie erhalten. Wenn wir untersuchen wollen, ob Entfernung etwas Absolutes oder Relatives ist, dürfen wir nicht von vornherein entschlossen sein, unbedingt etwas Absolutes zu finden und die übliche Bedeutung des Begriffes so lange abändern, bis dies der Fall ist.

Auch können wir unsere Vorfahren nicht deswegen tadeln, daß sie dummerweise das Wort Entfernung für etwas Relatives geprägt haben, während sie damit ebensogut ein absolutes und unzweideutiges Resultat räumlicher Messung hätten bezeichnen können. Die von mir den Studenten vorgeschlagene Hilfsregel hat nämlich ihre Schattenseite. Oft betrachten wir Systeme, die eine Anzahl von Körpern in verschiedenen Bewegungszuständen enthalten. Es würde recht unbequem sein, jeden dieser Körper mit Instrumenten in anderem Bewegungszustande zu messen, und wir würden

in einen hoffnungslosen Wirrwarr geraten, wenn wir versuchten, die verschiedenen Messungen zu vereinigen. Unsere Vorfahren waren sehr weise, als sie alle Entfernungen auf ein einziges Raumgerüst bezogen, wenn auch ihre Erwartung, diese Entfernungen seien absolut, nicht in Erfüllung gegangen ist.

Was nun die absolute Größe betrifft, die wir durch meine Hilfsregel erhalten haben, so können wir sie den Entfernungen relativ zur Erde, oder relativ zum Beteigeuze zur Seite stellen, als eine Größe, deren Untersuchung durchaus von Interesse ist, nämlich die „Eigenlänge“. Vielleicht fühlen Sie sich erleichtert, endlich etwas Absolutes in Händen zu halten und wollen den Gedankengang weiter verfolgen. Ausgezeichnet. Aber Sie müssen bedenken, daß Sie sich damit von dem Schema der klassischen Physik entfernen, welche relative Längen zur Grundlage ihres Gebäudes gewählt hat. Die Frage nach dem Absoluten führt in die vierdimensionale Welt.

Ein bekannteres Beispiel für eine relative Größe ist die „Richtung“ eines Objekts. Für einen Kraftfahrer in Edinburgh ist die Richtung von Cambridge eine andere als für einen Kraftfahrer in London. Niemals ist es uns in den Sinn gekommen, hierin einen Widersinn zu sehen oder anzunehmen, es müsse eine absolute Richtung von Cambridge geben, die nur zurzeit noch unbekannt ist. Und doch enthält der Gedanke, daß es eine absolute Entfernung zwischen zwei Punkten geben müsse, einen Trugschluß der gleichen Art. Natürlich ist ein Unterschied zwischen den beiden Fällen vorhanden, doch bezieht er sich nur auf einen Nebenumstand: Richtung ist relativ zu einer besonderen Stellung des Beobachters, Entfernung relativ zu einer besonderen Geschwindigkeit desselben. Während wir nun unsere Stellung frei ändern und somit willkürlich große Richtungsänderungen hervorrufen können, sind wir nicht imstande, große Änderungen unserer Geschwindigkeit zu bewirken, denn die 500 Kilometer in der Stunde, die mit dem Aufgebot aller technischen Hilfsmittel heute allenfalls erreicht werden können, sind viel zu wenig, um hier zu zählen. Daher ist die Relativität der Entfernung kein Gegenstand der täglichen Erfahrung geworden, wie es die Relativität der Richtung tatsächlich ist. So ist es unglücklicherweise gekommen, daß das Vorurteil, Entfernung müsse etwas Absolutes sein, so tief in unserm Denken verwurzelt ist.

Ein anderes, uns leider nur allzu vertrautes Beispiel für die Relativität einer Größe haben wir im Geld. Was auch immer die theoretische Auffassung gewesen sein mag, der gewöhnliche Mann hielt noch vor gar nicht so langer Zeit ein Pfund Sterling für einen absoluten Betrag an Reichtum. Aber traurige Erfahrung hat uns von seiner Relativität überzeugt. Zuerst konnte man sich auch hier nicht von der Vorstellung losmachen, daß es ein absolutes Pfund geben müsse, und bemühte sich, den Sachverhalt durch paradoxe Behauptungen auszudrücken: Das Pfund Sterling betrage jetzt in Wirklichkeit $7\frac{1}{2}$ Schilling. Dann aber gewöhnte man sich an die Sachlage und rechnete den Reichtum in Pfund wie vorher. Nur wissen wir jetzt, daß das Pfund eine relative Größe ist und infolgedessen nicht die Eigenschaften haben kann, die wir ihm in dem Glauben, es sei absolut, zuschrieben.

Wenn Sie sich die Veränderung in der Geldwirtschaft vor Augen halten, die durch die Erkenntnis des relativen Wertes des Geldes hervorgerufen wurde, können Sie sich eine Vorstellung bilden von dem tiefgreifenden Unterschied in der Auffassung aller Physik vor und nach der Schaffung der Relativitätstheorie durch Einstein. In ruhigen Zeiten wirken sich die praktischen Folgen der Relativität des Geldwertes nur in den leisen Schwankungen fremder Valuta aus und sind den winzigen Längenänderungen vergleichbar, die sich nur bei ganz empfindlichen Versuchen, wie dem Michelson-Morley-Experiment, bemerkbar machen. Aber gelegentlich werden die Folgen fühlbarer: die Mark fällt auf ein Billionstel des Friedenswertes, bei einem β -Teilchen hoher Geschwindigkeit schrumpft der Radius auf ein Drittel zusammen. Doch sind es nicht diese gelegentlichen praktischen Auswirkungen, auf die das Hauptgewicht gelegt werden muß. Es ist klar, daß ein Nationalökonom, der an den absoluten Wert des Pfunds glaubt, sich noch nicht einmal die Anfangsgründe seines Faches zu eigen gemacht hat. Und wenn wir glauben, die Welt sei wirklich aus jenen Entfernungen, Kräften und Massen aufgebaut, die sich doch nur auf unser spezielles Bezugsgerüst beziehen, so sind wir weit von einem richtigen Verständnis der Natur der Dinge entfernt.

Der Bauplan der Natur. Kehren wir nun zu dem Beobachter zurück, der so ängstlich bemüht war, das „richtige“

Bezugsgerüst des Raumes zu finden. Was er im Grunde zu entdecken hoffte, war wohl der Natur ureigenes Gerüst, das Gerüst, das sie ihren Rechnungen zugrunde legte, als sie die Planeten unter dem Gesetz der Schwere in ihre Bahnen brachte, oder ihren Symmetrieansätzen, als sie die Elektronen auf ihrer Drehbank drechselte. Die Natur hat ihn jedoch überlistet; keine Spur verrät das Gerüst, das sie benutzte. Oder vielleicht hat sie es gar nicht so listig verheimlicht, sondern ihr Werk vollendet ohne Gerüst? Lassen Sie mich ein Gleichnis erzählen:

Es lebte einst ein Archäologe, der die Gepflogenheit hatte, die Entstehungszeit alter Tempel aus der Himmelsrichtung zu berechnen, in welche ihre Längsachse wies. Er hatte nämlich herausgefunden, daß die Tempel immer in Richtung des Aufgangs bestimmter Sterne erbaut waren. Gemäß der Präzessionsbewegung des Sternes war sein Aufgangspunkt inzwischen vorgerückt, doch ließ sich leicht der Zeitpunkt bestimmen, zu dem er in Richtung der Längsachse lag, und somit auch das Alter des Tempels. Doch bei einem Volksstamm versagte diese Methode, denn dieser errichtete nur kreisförmige Gotteshäuser. Dem Archäologen erschien das als Beweis einer außerordentlichen Spitzfindigkeit, mit der dieses Volk bestrebt war, die Entstehungszeit seiner Tempel zu verheimlichen. Ein kritischer Kopf jedoch stellte die unziemliche Vermutung auf, daß sich dieser Stamm vielleicht nur nicht besonders für Astronomie interessiert habe.

Mir geht es wie jenem Kritiker. Ich glaube nicht, daß die Natur so außerordentlichen Scharfsinn darauf verwendet habe, uns das Raumgerüst zu verheimlichen, das sie bevorzugte. Sie interessiert sich einfach nicht für Raumgerüste. Für unsere Rechnungsweise hat sich die Verwendung von Bezugssystemen als sehr nützlich erwiesen, aber sie spielen keine Rolle beim Aufbau des Weltalls. Der Gedanke ist absurd, daß die Welt nach einem Plan erbaut sein soll mit dem gleichzeitigen Zweck, diesen zu verheimlichen. Dies würde dem Vorhaben des weißen Ritters ⁴ gleichen:

Doch ich ersann mir diesen Plan:
Ich färbe meinen Bart,
Nehm' einen großen Fächer dann,
Daß niemand es gewahrt.

Ist diese Überlegung richtig, so müssen wir zunächst alle Raumgerüste beseitigen, wenn es uns gelingen soll, den Bauplan der Natur in seiner wahren Bedeutung zu erschauen. Sie selbst hat sich um keine Gerüste gekümmert, die nur die Einfachheit ihres Planes verdunkeln könnten. Ich verlange nicht etwa einen Neuaufbau der gesamten Physik unter Ausschaltung jedes Bezugssystems und aller auf ein solches bezogenen Größen. Es harren viele Aufgaben ihrer Lösung durch die Wissenschaft, welche außerhalb unseres Strebens nach Einsicht in den inneren Aufbau der Welt liegen. Für den aber, der sich dieses Ziel gesteckt hat, für den muß der erste Schritt in der Befreiung von dem überflüssigen Ballast bestehen.

Dieser Schritt aber ist gleichbedeutend mit einer scharfen Trennung vom Boden der klassischen Physik, und es werden sich aus unserer veränderten Einstellung wichtige Folgerungen ergeben. Um ein Beispiel zu nennen: Bekanntlich zeigen sowohl Schwere wie elektrische Kraft ungefähre Proportionalität mit dem umgekehrten Quadrate der Entfernung. Es ist besonders seine große Einfachheit, welche von Anfang an für die Gültigkeit dieses Gesetzes zu sprechen scheint. Diese kommt nicht nur in seiner mathematisch einfachen Formulierung zum Ausdruck, sondern vor allem in dem durchsichtigen Zusammenhang mit der Schwächung jedes Effektes durch Ausbreitung nach drei Dimensionen. Die Vermutung liegt daher nahe, daß wir in dieser Form tatsächlich das exakte Gesetz für Schwerfelder und elektrische Felder erfaßt haben. Aber „einfach“ für unsere Betrachtungsweise braucht nicht auch „einfach“ im Sinne der Natur zu sein. Entfernungen sind auf ein Raumgerüst bezogen und sind verschieden, je nach der Wahl des Gerüsts. Wenn wir kein Raumgerüst festgesetzt haben, so hat das Gesetz vom umgekehrten Entfernungsquadrat gar keinen Sinn; aber die Natur hat kein Raumgerüst festgesetzt. Die Bindung an ein Bezugssystem kann also niemals zur Einsicht in den wirklichen Vorgang führen, selbst wenn das Gesetz durch irgendeine Selbst-Kompensation zufällig für alle Systeme übereinstimmende Werte ergeben würde (was jedoch nicht der Fall ist). Wir werden im sechsten Kapitel versuchen, eine tiefere Einsicht in das Gesetz zu gewinnen, für das in allen praktischen Fällen die Proportionalität mit dem umgekehrten Quadrat der Entfernung eine so gute Annäherung darstellt, und zu einer Vorstellung von seiner

Wirkungsweise gelangen, die nicht so ein Raumgerüst mit-schleppt, das gar nicht dazugehört. Die Anerkennung der Relativität führt uns dahin, einen neuen Weg zu suchen, um die Vielfältigkeit der Naturerscheinungen zu entwirren.

Geschwindigkeit gegen den Äther. Es besteht offensichtlich ein Zusammenhang zwischen der Relativitätstheorie und der Unmöglichkeit, eine absolute Geschwindigkeit nachzuweisen. Hätte in unserem Streit mit dem Nebel-Physiker eine Partei mit Recht den Zustand absoluter Ruhe für sich in Anspruch nehmen können, so würde dies durchaus ein hinreichender Grund zur Bevorzugung des entsprechenden Bezugssystems gewesen sein. Vom philosophischen Standpunkt aus war es längst bekannt, daß Bewegung notwendig relativ sein muß: Bewegung ist Veränderung der Lage relativ zu e t w a s. Versucht man die Vorstellung eines Lagewechsels relativ zu n i c h t s zu fassen, so fällt der ganze Begriff in sich zusammen. Mit dieser philosophischen Einsicht erledigt sich jedoch nicht gleichzeitig das physikalische Problem. Wir Physiker sind nicht ganz so vorsichtig im Gebrauch des Wortes „absolut“. Wir würden eine Bewegung, die in bezug auf den Äther oder irgendein anderes ausgezeichnetes Bezugssystem nachgewiesen werden könnte, bereits absolut nennen.

Ein Bezugssystem, das relativ zum Äther ruht, hat niemand entdecken können. Bewegung kann nur relativ zu den Markierungen festgestellt werden, welche die in der Welt verstreute Materie bildet. Bewegung relativ zu dem Weltmeere des Äthers entzieht sich der Beobachtung. Wir sagen wohl, V sei die Geschwindigkeit eines Körpers gegen den Äther, und setzen für das betreffende Problem die elektromagnetischen Gleichungen an, in denen V dann mehrfach auftritt. Setzt man nun aber die beobachteten Größen ein und versucht, V zu berechnen, indem man alle anderen Unbekannten eliminiert, so scheint zwar zunächst alles ganz glatt zu gehen; doch ach!, mit der letzten Unbekannten verschwindet auch V und uns bleibt nichts als die zwar unwiderlegliche, aber nichtssagende Gleichung:

$$0 = 0.$$

Diese Identität ist die beliebte Zuflucht, hinter die sich mathematische Gleichungen verschanzen, wenn wir törichte Fragen stellen. Wollten wir versuchen, geographische Länge

und Breite eines Punktes nordöstlich vom Nordpol zu bestimmen, wahrscheinlich würden wir dieselbe mathematische Antwort erhalten. „Geschwindigkeit gegen den Äther“ ist so sinnlos wie „nordöstlich vom Nordpol“.

Diese Ausführungen sollen aber nicht etwa eine Abschaffung des Äthers bedeuten. Im Gegenteil, der Physiker braucht den Begriff des Äthers. Die physikalische Welt kann nicht in isolierte Partikelchen von Materie oder Elektrizität zerlegt werden mit einem eigenschaftslosen Zwischenraum. Letzterem müssen ebenso charakteristische Eigenschaften zugeschrieben werden wie den Partikelchen. Die heutige Physik läßt eine ganze Armee von Symbolen auffahren, um die Vorgänge in diesem Zwischenraume zu beschreiben. Wir fordern den Äther als Träger für die Eigenschaften des Zwischenraumes in demselben Sinne, wie wir Materie oder Elektrizität als Träger für die Eigenschaften der Partikelchen postulieren. Ein Philosoph könnte vielleicht die Frage aufwerfen, ob es möglich sei, nur die Eigenschaften allein gelten zu lassen, ohne sie einem Träger zuzuordnen, und somit Äther und Materie mit einem Schlage abzutun. Aber das liegt außerhalb des Rahmens unserer Betrachtungen.

Im vorigen Jahrhundert wurde allgemein angenommen, daß der Äther eine Art Materie sei, begabt mit Eigenschaften der Materie wie Masse, Festigkeit, Bewegung. Der Zeitpunkt, zu dem mit dieser Anschauung endgültig gebrochen wurde, dürfte schwer zu bestimmen sein. In England hat sie wohl noch länger herumgespukt als in anderen Ländern, aber anerkannte orthodoxe Ansicht ist sie auch hier schon einige Jahre vor Entstehung der Relativitätstheorie nicht mehr gewesen. Logisch betrachtet, bedeutet eigentlich schon die Vorstellung mehrerer Forscher des 19. Jahrhunderts, welche die Materie als Wirbel oder Knoten im Äther auffaßten, einen Bruch mit dieser Anschauung, denn natürlich kann der Äther selbst kein Wirbel im Äther sein. Aber vielleicht darf man nicht mit Sicherheit voraussetzen, daß die betreffenden Autoritäten in diesem Punkte streng logisch vorgegangen sind.

Heutzutage wird der Äther allgemein nicht mehr als eine Art von Materie angesehen, und als nicht-materiell sind seine Eigenschaften *sui generis*. Sie müssen erst durch das Experiment bestimmt werden. Da wir von vornherein nichts über ihn vermuten können, werden wir die Resultate der Experimente ohne Verwunderung und Widerstreben

entgegennehmen. Eigenschaften der Materie wie Masse und Festigkeit werden dem Äther selbstverständlich fehlen, doch wird er dafür eigene wohlbestimmte Eigenschaften besitzen. Zum Beispiel hat bei einem materiellen Ozean die Aussage, daß ein ganz bestimmtes Wasserpartikelchen vor ein paar Augenblicken hier war und jetzt dort ist, einen Sinn; auf den Äther angewendet wird sie sinnlos. Wenn Sie sich vielleicht bisher vom Äther ein Bild gemacht haben, das die Identifizierung seiner einzelnen Partikelchen jeder Zeit zuläßt, so müssen Sie Ihre Auffassung in Anbetracht der heute vorliegenden Beweise von Grund auf ändern. Wir können nicht eine Geschwindigkeit finden, mit der wir durch den Äther fliegen; wir können nicht sagen, ob der Äther in diesem Zimmer jetzt durch die Nordwand ausströmt oder durch die Südwand. Für einen materiellen Ozean würde die Frage einen Sinn haben, aber nichts berechtigt uns zu der Erwartung, daß sie auch für den nicht-materiellen Ozean des Äthers einen Sinn hätte.

In dem gegenwärtigen Schema der physikalischen Welt hat der Äther seine Stellung so gut, wie nur je. Aber Geschwindigkeit durch den Äther gleicht jenem Gespenst der Weißen Frau, das einem zwischen den Händen entschwindet; und Einstein hat uns zu seinem kühnen Skeptizismus ermutigt: „Ich glaube, dies Gespenst gibt es gar nicht“.

Ist die Fitz Gerald-Kontraktion reell? Man fragt mich oft, ob die Fitz Gerald-Kontraktion auch wirklich stattfindet. Es war von ihr im ersten Kapitel die Rede, bevor die Idee der Relativität überhaupt erwähnt worden war, und vielleicht ist es nicht ohne weiteres klar, was aus ihr geworden ist, nun wir vermöge der Relativitätstheorie eine völlig neue Auffassung vom Weltgeschehen gewonnen haben. Mein erstes Kapitel beschreibt die Erscheinungen gemäß dem Ideengehalt der klassischen Physik und verfolgt hierbei den Zweck, die zwingende Notwendigkeit zu zeigen, die zur Aufstellung einer neuen Theorie geführt hat. Es ist daher ganz natürlich, daß es viele Aussagen enthält, die sich in der Physik der Relativität anders darstellen.

Ist es wirklich wahr, daß sich ein bewegter Stab in Richtung der Bewegung verkürzt? Es ist nicht ganz leicht, hierauf eine glatte Antwort zu erteilen. Wir machen oft einen Unterschied zwischen dem, was wahr ist und dem,

was wirklich wahr ist. Eine Aussage, die nur die Erscheinungen selber betrifft, mag wahr sein; eine Aussage, die nicht nur wahr ist, sondern von der hinter den Erscheinungen liegenden Wirklichkeit handelt, ist wirklich wahr.

Sie erhalten z. B. die Bilanzabrechnung einer Aktiengesellschaft und stellen fest, daß sich die Aktiva auf so und so viel belaufen. Ist das wahr? Sicherlich; denn es ist durch einen vereidigten Bücherrevisor bestätigt. Aber ist es auch wirklich wahr? Da erheben sich viele Fragen. Der wirkliche Wert von Rechnungsposten ist oft sehr verschieden von dem, der in der Bilanzaufstellung erscheint. Ich spiele dabei durchaus nicht auf betrügerische Gesellschaften an. Es gibt ja „geheime Reserven“; und ganz allgemein gilt der Satz: Je respektabler eine Gesellschaft ist, desto mehr weicht ihre Bilanzaufstellung von der Wirklichkeit ab. Man nennt das gesunde Finanzwirtschaft. Aber ganz abgesehen von der wohlbedachten Anwendung einer Bilanzaufstellung zur Verschleierung der wirklichen Lage ist sie keineswegs dazu da, irgendwelche Dinge aufzudecken. Eine Bilanz aufstellung hat nur die eine Hauptaufgabe, zu stimmen, und alles andere hat sich diesem Zwecke unterzuordnen.

Der Physiker, der ein Raumgerüst benutzt, hat über jeden Millimeter des Raumes Rechenschaft abzulegen — also tatsächlich eine Bilanz aufzustellen mit dem Zweck, daß sie stimmt. Für gewöhnlich wird dies weiter keine Schwierigkeiten bereiten. Aber wir wollen annehmen, daß er es zufällig mit einem Mann zu tun hat, der 260 000 km in der Sekunde zurücklegt. Um rund zu rechnen, sei dies ein Mann von etwas übernormaler Größe, sagen wir ein „2m-Mann“. Insofern es sich um den wirklichen Sachverhalt handelt, wird die genaue Eintragung in die Bilanzaufstellung 2m sein. Nur wird dann die Bilanz nicht stimmen. Will der Physiker mit seinem Raume auskommen, so steht ihm nur ein Meter zwischen Scheitel und Sohle des Mannes zur Verfügung. In der Bilanzaufstellung trägt er daher dessen Länge mit 1 m ein.

Dieses Eintragen der Länge zu Zwecken der Bilanz ist die Fitz Gerald-Kontraktion. Daß sich ein bewegter Stab verkürzt, ist wahr, aber es ist nicht wirklich wahr. Es ist nicht eine Aussage über Wirklichkeit (das Absolute), aber wohl ist es eine wahre Aussage über die Erscheinungen,

wie sie sich in unserem Bezugsgerüst darstellen *. Jedes Objekt hat in verschiedenen Raumgerüsten verschiedene Längen, und so kann es passieren, daß ein 2m-Mann in diesem oder jenem Raumgerüst nur einen Meter mißt. Die Aussage, daß die Länge dieses eiligen Reisenden 1 m beträgt, ist wahr, aber sie drückt keine spezielle Eigenschaft des Mannes aus, sondern zeigt nur an, daß das benutzte Gerüst dasjenige ist, in welchem seine Länge gerade 1 m beträgt. Wenn dies nicht unseres gewesen ist, so wird es das von jemand anderem gewesen sein.

Vielleicht denken Sie nun, wir sollten unsere Methode der Rechnungsführung über den Raum so ändern, daß die Eintragungen direkt der Wirklichkeit entsprechen. Das hieße aber, sich einer ungeheuren Mühe unterziehen, um etwas vorzusehen, was schließlich doch nur außerordentlich selten vorkommt. Jedoch ist es uns tatsächlich möglich gemacht, Ihrem Wunsche zu genügen. Wir danken es Minkowski, daß ein Weg der Rechnungsführung gefunden wurde, der über Wirklichkeiten (Absolutes) Aufschluß gibt und stimmt. Und doch drängten sich die Leute nicht, diese Rechnungsart allgemein einzuführen, denn es ist eine vierdimensionale Bilanz aufstellung.

Bevor wir den Sprung ins Vierdimensionale wagen, wollen wir einen letzten Blick nach rückwärts tun. Wir sind einem Faktum gegenübergestellt worden, wie es die klassische Physik niemals in Betracht gezogen hat: einer Vielheit von Raumgerüsten, von denen das eine so gut ist wie das andere. Und an Stelle von einer Entfernung, einer magnetischen Kraft, einer Beschleunigung usw., die gemäß der klassischen Auffassung notwendig wohlbestimmt und einzig sein müßten, sehen wir uns verschiedenen Entfernungen usw. gegenübergestellt, entsprechend den verschiedenen Raumgerüsten, und haben keinen Grund, unter ihnen eine bestimmte Wahl zu treffen. Der einfache Ausweg aus diesem Dilemma war, uns von dem Gedanken zu befreien, daß eines das richtige Gerüst des Raumes sein müsse, alle ändern aber nur unechte Nachahmungen, und

* Die Eigenlänge (S. 32) bleibt unverändert; was sich ändert, ist die relative Länge. Wie wir bereits gesehen haben, bezieht sich das Wort „Länge“ im üblichen Sprachgebrauch auf die relative Länge, und wenn wir die Aussage machen, daß der bewegte Stab seine Länge ändert, so machen wir hierbei die stillschweigende Voraussetzung, daß das Wort Länge im üblichen Sinne gemeint ist.

sie alle en bloc gelten zu lassen. Auf diese Weise wurden Entfernung, magnetische Kraft, Beschleunigung usw. zu relativen Größen, vergleichbar mit andern uns schon bekannten relativen Größen wie Richtung oder Geschwindigkeit. Im wesentlichen wird dadurch das Gebäude unseres physikalischen Wissensschatzes unverändert gelassen; nur müssen wir gewisse Vorurteile betreffs des Verhaltens dieser Größen aufgeben und auch gewisse stillschweigende Voraussetzungen, die auf dem Glauben an ihre Absolutheit gegründet waren. So mag es vorkommen, daß ein Naturgesetz, welches für absolute Größen einfach und geeignet schien, auf relative Größen unanwendbar ist und zurechtgestutzt werden muß. Wenn somit der Aufbau unseres physikalischen Wissens nicht wesentlich betroffen ist, so ist die Umwälzung in dem ganzen Vorstellungskomplex, der ihm zugrunde liegt, um so durchgreifender. Wie weit haben wir uns von dem alten Standpunkt entfernt, der mechanische Modelle für jedes Naturgeschehen forderte, wenn wir jetzt nicht einmal mehr zulassen, daß es zwischen zwei Punkten nur eine einzige wohlbestimmte Entfernung gibt! Die Erkenntnis von der Relativität des üblichen Schemas der Physik birgt aber zugleich die Forderung in sich, tiefer zu schürfen und das Absolute aufzuzeigen, das ihm zugrunde liegt, und somit ein getreueres Bild der Welt zu gewinnen.

DIE ZEIT

Die Zeit der staatlichen Sternwarte. Ich habe manchmal gedacht, es müsse recht unterhaltend sein, einer Diskussion zwischen dem Observator der staatlichen Sternwarte und, sagen wir, Professor Bergson über das Wesen der Zeit zuzuhören. Professor Bergson ist als Autorität auf diesem Gebiet allgemein anerkannt, und da es die Aufgabe des staatlichen Observators ist, die genaue Zeit für den täglichen Ablauf unseres Lebens anzugeben, wird er ja wohl darüber im Klaren sein, was er bestimmen soll. Wir wollen die Diskussion um einige zwanzig Jahre zurückverlegen in eine Zeit, wo die Verbreitung der Einsteinschen Ideen noch keine gegenseitige Annäherung herbeigeführt hatte. Wahrscheinlich würde es zu einer heftigen Meinungsverschiedenheit gekommen sein, und ich vermute, daß der Philosoph die am besten formulierten Beweisgründe hätte vorbringen können. Er hätte bewiesen, daß die Ansichten des staatlichen Observators über Zeit ganz sinnlos wären und hätte dann wahrscheinlich die Diskussion mit einem hastigen Blick auf seine Uhr abgebrochen, um noch rechtzeitig seinen Zug zu erreichen, dessen Abfahrt sich genau nach der Zeit der staatlichen Sternwarte richtete.

Was auch immer Zeit *de jure* sein mag, die Zeit der staatlichen Sternwarte ist *de facto*. Die Zeit der Sternwarte ist es, die in der Physik gilt und jeden Winkel dieser Wissenschaft durchdringt. Sie braucht keinerlei logische Begründung, denn sie hat eine weit stärkere Position durch eine Art Amtsbefugnis, die sie tatsächlich ausübt. Unlöslich ist sie mit dem Gefüge der klassischen Physik verwoben. In der Physik müssen wir unter „Zeit“ immer die Zeit des staatlichen Observators verstehen. Aber Sie müssen sich darauf gefaßt machen, daß Ihnen die Einsteinsche Relativitätstheorie offenbaren wird, wie Zeit und Raum auf sonderbare Art miteinander vermengt sind. Für den Anfänger ist das ein harter Bissen. Immer wieder ist dieser versucht auszurufen: „Das ist unmöglich! Ich spüre es am

eigenen Leibe, daß Zeit und Raum von ganz verschiedener Art sind. Sie können unmöglich vermengt sein.“ Der staatliche Observator erwidert höflich: „Es ist nicht unmöglich. Ich habe sie vermengt.“ Nun, damit ist die Frage erledigt. Wenn der Observator der staatlichen Sternwarte sie vermengt hat, so muß diese Mischung die Grundlage der heutigen Physik bilden.

Wir müssen zwischen zwei Fragestellungen unterscheiden, die nicht notwendig miteinander identisch sind. Erstens: Was ist das wahre Wesen der Zeit? Zweitens: Was ist das Wesen derjenigen Größe, die unter dem Namen Zeit ein fundamentaler Bestandteil des Gebäudes der klassischen Physik geworden ist? Durch eine lange Folge von Experiment und Theorie sind die Ergebnisse physikalischer Forschung zu einem Ganzen verwebt, das sich alles in allem ungemein erfolgreich erwiesen hat. Zeit — und zwar die Zeit der Sternwarte — ist deswegen von so großer Bedeutung, weil sie ein unentbehrlicher Bestandteil dieses Gefüges ist, gewissermaßen das Bindemittel oder der Mörtel, der das Gebäude zusammenhält. Diese Bedeutung wird nicht vermindert, auch wenn es sich herausstellen sollte, daß sie nur unvollkommen der Zeit entspricht, deren wir uns unmittelbar bewußt sind. Wir wollen daher zuerst die zweite Frage erörtern.

Eins aber möchte ich vorweg bemerken: Dadurch, daß die Theorie Einsteins die zweite Frage löste und die physikalische Zeit seltsamerweise mit dem Raum verschmolzen fand, ist sie instand gesetzt, auch die erste Frage anzugreifen. Es gibt eine Größe, deren Bedeutung die prärelativistische Physik nicht erkannt hatte, und die weit unmittelbarer der Zeit unseres Bewußtseins entspricht. Sie heißt *Eigenzeit* und ist unähnlich dem Eigenraum und streng von ihm zu scheiden. Wenn Sie im Namen des gesunden Menschenverstandes gegen die Vermengung von Raum und Zeit protestieren, so möchte ich Sie darin durchaus bestärken. Raum und Zeit müssen in der Tat auseinandergehalten werden. Aber die übliche Darstellung der Welt und ihrer Dauer als dreidimensionaler Raum, der von Augenblick zu Augenblick gleichsam durch die Zeit springt, ist ein *mißlungener Versuch* dazu. Gehen wir lieber zurück in die jungfräuliche vierdimensionale Welt und machen uns ein neues Bild von ihr, in dem Raum und Zeit sinnvoll auseinandergehalten werden. Dann können wir auch die fast vergessene „Zeit

unseres Bewußtseins“ wieder in ihre Rechte einsetzen, und wir werden finden, daß ihr eine wichtige Stelle in dem absoluten Bauplan der Natur zukommt.

Vorher aber wollen wir die Ursache zu verstehen suchen, warum die physikalische Zeit nicht mit der Zeit unserer unmittelbaren Wahrnehmung übereinstimmt. Ohne viel zu überlegen, sind wir zu ganz bestimmten Anschauungen über die Zeit gelangt, denen wir fast axiomatische Gültigkeit zuschreiben, obgleich sie durch nichts in unserer unmittelbaren Wahrnehmung der Zeit begründet sind. Betrachten wir zum Beispiel folgende Behauptung:

„Wenn zwei Menschen zweimal zusammentreffen, so müssen sie zwischen den beiden Begegnungen die gleiche Zeit gelebt haben, auch wenn der eine von ihnen inzwischen eine Reise mit großer Geschwindigkeit nach einem ganz entfernten Teil des Weltalls hin und zurück unternommen hat.“

Ein ganz unmögliches Experiment! werden Sie ausrufen. Schön. Es liegt außerhalb jeder Erfahrung. Ich darf also annehmen, daß Sie sich nicht auf Ihre Erfahrung berufen, wenn Sie Einwendungen gegen eine Theorie erheben, welche die Richtigkeit obiger Aussage leugnet? Und doch würden die meisten Menschen auf meine Frage ungeduldig antworten, die Behauptung sei selbstverständlich wahr. Sie haben sich nämlich eine Meinung über den Ablauf der Zeit außerhalb von uns selbst gebildet, die sie zwingt, die Behauptung zuzugeben. Ob das Schlußergebnis durch irgend etwas in ihrer tatsächlichen Erfahrung über Zeit gestützt wird, danach fragen sie gar nicht.

Wenn es auch nicht möglich ist, einen Menschen wirklich nach einem andern Teil des Universums zu entsenden, so haben wir doch genug wissenschaftliche Kenntnisse, um uns über den Unterschied im Ablauf atomistischer und anderer physikalischer Prozesse in einem ruhenden und einem äußerst schnell bewegten Körper Rechenschaft zu geben. Wir können mit Bestimmtheit aussagen, daß alle körperlichen Prozesse sich in dem schnell fliegenden Weltraum-Reisenden viel langsamer abwickeln als bei dem Mann, der zu Hause geblieben ist (d. h. langsamer in bezug auf die Zeit der staatlichen Sternwarte). Daran ist gar nichts besonders Geheimnisvolles. Theorie und Experiment stimmen darin überein, daß die Masse, d. i. die Trägheit der Materie, zugleich mit ihrer Geschwindigkeit zunimmt. Verlangsamung ist aber eine natürliche Folge größerer Trägheit. Soweit also

körperliche Prozesse in Betracht kommen, lebt der Weltreisende langsamer. Der Kreislauf seiner Verdauung und seiner Ermüdung, die Promptheit, mit der seine Muskeln auf einen Reiz reagieren, die Entwicklung seines Körpers von der Jugend zum Alter, die materiellen Vorgänge in seinem Gehirn, die mehr oder weniger mit dem Auftreten seiner Gedanken und Empfindungen Schritt halten, die Uhr, die in seiner Westentasche tickt, alles dies muß im gleichen Maße gehemmt sein. Wenn die Reise mit ganz außerordentlicher Geschwindigkeit vor sich geht, kann es passieren, daß bei der nächsten Begegnung der zu Hause Gebliebene um 70 Jahre, und der Weltraumwanderer nur um 1 Jahr gealtert ist⁵. Dieser hat nur Appetit auf 365 Frühstücke, Mittagessen usw. aufbringen können; sein Verstand, gehemmt durch sein langsam funktionierendes Gehirn, hat nur die Gedankenarbeit leisten können, die einem Jahre irdischen Lebens entsprechen würde. Und seine Uhr als exakt arbeitender wissenschaftlicher Zeuge bestätigt dies. Gemäß der Zeit, die unser Bewußtsein auf seine eigene grobschlächtinge Methode zu messen versucht — und dies ist wohlverstanden die einzige Registrierung der Zeit, die wir mit Recht als unabhängig vom Raum betrachten dürfen —, haben die beiden Männer zwischen der ersten und zweiten Begegnung nicht die gleiche Zeit gelebt.

Wenn man die Zeitskala wirklich zugrunde legen will, die von unserem Bewußtsein geschätzt wird, so stößt man auf die Schwierigkeit, daß diese Schätzung recht unzuverlässig ist. „Für den einen schreitet die Zeit bedächtigen Schrittes einher, für den andern eilt sie im Trabe, den dritten trägt sie im Galopp dahin, und dem vierten scheint sie still zu stehn.“ Doch ich will ja diese subjektive Skala gar nicht benutzen. Freiwillig greife ich nicht nach einem so unzuverlässigen Zeitmesser. Aber ich muß dem Kritiker erwidern, der mir erzählt, was er über die Zeit „am eigenen Leibe spürt“ und muß ihm zeigen, daß die Grundlage dieses Gefühls *g e l e b t e* Zeit ist, von der wir eben gesehen haben, daß sie zwischen zwei Begegnungen für den einen 70 Jahre, und für den andern 1 Jahr betragen kann. Wir können „gelebte Zeit“ auf ganz wissenschaftliche Weise messen, indem wir nämlich eine Uhr mit auf die Reise schicken, die dem Wechsel der Trägheit mit der Geschwindigkeit ebenso wie ihr Besitzer unterworfen ist. Und doch hätte die allgemeine Einführung der „gelebten Zeit“ entschieden ihre Schatten-

seiten. Es mag ja sehr nützlich für jedes Individuum sein, seine private Zeit zu haben, die genau mit seiner gelebten Zeit übereinstimmt; aber für jede Verabredung würde sich das als äußerst unzweckmäßig erweisen. Darum hat die staatliche Sternwarte eine allgemeine Zeitrechnung eingeführt, die sich durchaus nicht genau nach der gelebten Zeit richtet, dafür aber unabhängig von der Bewegung des betrachteten Objektes ist. Ich kann nicht in Abrede stellen, daß diese Rechnungsweise für unseren Reisenden bei seiner Rückkehr aus dem fernen Weltraum ein bißchen hart sein muß, denn man wird ihn als einen 80jährigen empfangen, während er das Aussehen eines Jungen unter 20 hat. Doch man muß dem Allgemeinwohl Opfer bringen. Und schließlich haben wir im praktischen Leben nicht mit menschlichen Wesen zu tun, die sich mit einer so ungeheuren Geschwindigkeit bewegen, wie unser Weltraumreisender. Wohl aber müssen wir mit Atomen und Elektronen rechnen, deren Geschwindigkeit eine so erschreckende Größe erreicht, und so stellt es sich heraus, daß die Entscheidung zwischen privater Zeitrechnung und allgemeingültiger Sternwartenzeit durchaus ihre praktische Seite hat.

In bezug auf die physikalische Zeit (eben die Zeit der Sternwarte) haben also zwei Menschen unter allen Umständen zwischen zwei Begegnungen dieselbe Zeit gelebt, auch wenn dies nicht mit ihrer tatsächlichen Erfahrung übereinstimmt. Diese Unstimmigkeit zwischen der physikalischen Zeit und der Zeit der Erfahrung müssen wir dafür verantwortlich machen, daß Raum und Zeit miteinander vermischt worden sind, denn selbstverständlich hätte dies unmöglich stattfinden können, wenn wir an der Zeit unserer unmittelbaren Erfahrung festgehalten hätten. Physikalische Zeit ist ebenso wie der Raum eine Art Gerüst, in das wir die Ereignisse der Außenwelt einordnen. Wir wollen nun untersuchen, wie man es praktisch macht, um die äußeren Ereignisse in ein vervollständigtes Gerüst für Raum und Zeit, in ein raumzeitliches Weltgerüst³ einzuordnen. Wir haben gesehen, daß es eine unendliche Auswahl von Gerüsten gibt; ich will also, um es genau zu sagen, Ihnen berichten, wie ich die Ereignisse in mein Gerüst einordne.

Die Einordnung der Ereignisse in ein raumzeitliches Bezugssystem. In Abb. 1 sehen Sie eine Anzahl von Ereignissen durch kleine Kreise angedeutet. Sie sind noch nicht

auf ihren richtigen Plätzen, und meine Aufgabe besteht darin, diese Plätze in meinem raumzeitlichen Bezugsgerüst anzuweisen. Bei einem der Ereignisse kann ich den Platz ohne weiteres erkennen und mit einer Aufschrift versehen. Es ist das Ereignis Hier-Jetzt, nämlich das, was in diesem Raume in diesem Augenblicke geschieht. Die übrigen Ereignisse zeigen verschiedene Grade der Entfernung von Hier-Jetzt, d. h. offensichtlich ist nicht nur der Grad der Entfernungen, sondern auch ihre Art verschieden. Einige Ereignisse weichen in Richtung nach etwas zurück, das ich allgemein mit Ver-

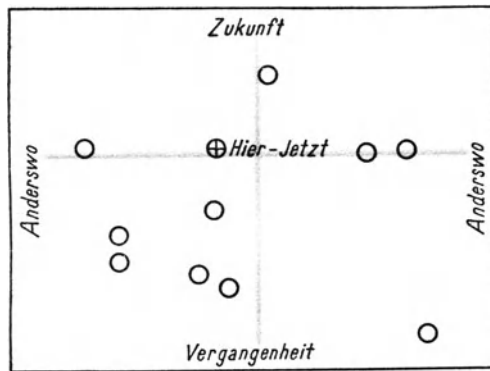


Abb. 1

gangenheit bezeichnen möchte, andere sind gegen die Zukunft entrückt; und die Abgelegenheit einiger ist wieder ganz anderer Art, gegen China gerichtet oder Peru, oder, allgemein gesprochen, sie sind anderswo. Auf diesem Blatt habe ich nur Raum für eine Dimension des Anderswo, eine zweite würde senkrecht aus dem Papier herausragen, und die dritte muß jeder sich vorzustellen suchen, so gut er kann.

Wir wollen nun von diesem unbestimmten Anordnungsschema zu einem präziseren übergehen. Vor allem muß als Wichtigstes Ich in die Abbildung eingezeichnet werden. Das klingt egoistisch. Aber schließlich ist es mein Bezugssystem, das wir benutzen wollen, und da ist es ganz natürlich, daß sich alles um mich gruppieren muß. Da bin ich nun! — eine Art vierdimensionaler Wurm (Abb. 2). Ein fehlerfreies Porträt! Ich habe eine beträchtliche Ausdehnung in die Vergangenheit und hoffentlich auch in die Zukunft, und nur in ganz bescheidenem Maße nach Anderswo. Mein derzeitiges Ich, d. h. ich in diesem Augenblick, fällt mit dem Ereignis

Hier-Jetzt zusammen. Wenn ich nun die Welt von Hier-Jetzt aus betrachte, sehe ich noch viele andere Ereignisse stattfinden. Dadurch entsteht in meinem Kopfe der Gedanke, der Augenblick, dessen ich mir hier bewußt bin, müsse ausgedehnt werden, so daß er diese Ereignisse alle umfaßt; und schon drängt sich mir die Schlußfolgerung auf, daß das Jetzt nicht auf Hier-Jetzt beschränkt sein kann. Deshalb zeichne ich in meinem Bild den Augenblick Jetzt, der durch die Welt der Ereignisse als glatter Schnitt läuft, damit ich alle die entfernten Ereignisse unterbringen kann, die jetzt

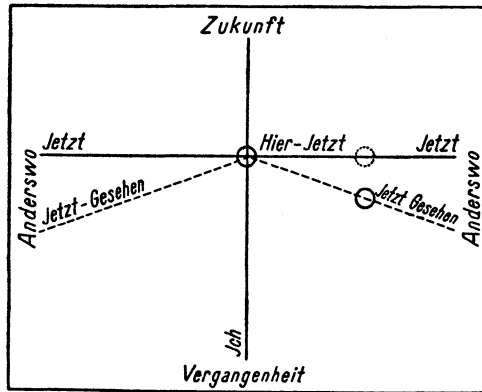


Abb. 2

stattfinden. Ich wähle die Ereignisse aus, deren Geschehen ich eben beobachte und weise ihnen ihren Platz auf diesem Schnitt an, den ich einen Zeitmoment oder einen „Augenblickszustand der Welt“ nenne. Ich ordne sie auf der Jetzt-Linie an, denn mir scheint, daß sie sich jetzt ereignen.

Diese Art der Anordnung hatte ihre Berechtigung bis zum Jahre 1667, in dem der Astronom Römer entdeckte, daß die Ereignisse, die ich jetzt stattfinden sehe, doch nicht dem Augenblicke Jetzt zugeordnet werden dürfen (oder wie man gewöhnlich sagt, daß Licht Zeit braucht, um sich auszubreiten). Das bedeutete freilich einen harten Schlag für das System von „weltweiten“ Augenblicken, die ja gerade zu dem Zweck erfunden waren, um diese Ereignisse in angemessener Weise zu verbinden. Man hatte, wie jetzt erkannt wurde, zwei verschiedene Ereignisse durcheinander gebracht: das ursprüngliche Ereignis, das irgendwo in der Außenwelt stattfand, und ein zweites gesondertes Ereignis,

nämlich unser Gewährwerden des ersten Ereignisses. Dieses zweite ereignete sich in unseren Körpern Hier-Jetzt, das erste aber war weder Hier noch Jetzt. Dementsprechend liefert uns die Erfahrung keinerlei Anzeichen für ein Jetzt, das nicht gleichzeitig Hier ist. Den Gedanken, wir könnten ein Jetzt, das kein Hier-Jetzt ist, unmittelbar erkennen, müssen wir opfern und damit entfällt die Berechtigung zur Einführung der „weltweiten“ Augenblicke.

Nachdem sich aber die Physiker einmal an die weltweiten Augenblicke gewöhnt hatten, waren sie keineswegs bereit, sie ohne weiteres preiszugeben. In der Tat ist der Begriff sehr nützlich, wenn man ihm nur nicht eine zu fundamentale Bedeutung beilegt. Man ließ die Jetzt-Linie als charakteristische Markierung in dem Schema bestehen und fügte zwei Linien Jetzt-Gesehen hinzu, die in einem gewissen Winkel von der Linie Jetzt zurückwichen, auf denen nun die jetzt wahrgenommenen Ereignisse fortlaufend ihren Platz finden konnten. Die Kotangente dieses Winkels stellte die Lichtgeschwindigkeit dar.

Wenn ich also ein Ereignis weit draußen im Weltall wahrnehme, z. B. das Auftauchen eines neuen Sternes, so zeichne ich dies ordnungsgemäß auf der Linie Jetzt-Gesehen ein. Dann mache ich eine gewisse Berechnung mit der gemessenen Parallaxe des Sternes und ziehe meine Jetzt-Linie durch einen Punkt, der von dem Ereignis — sagen wir 300 Jahre — nach vorn liegt, und meine Jetzt-Linie von vor 300 Jahren durch das Ereignis selbst. So stecke ich meine Jetzt-Linien oder weltweiten Augenblicke unter den Ereignissen ab und erhalte ein Gerüst für die zeitliche Einordnung der äußeren Ereignisse. Die Hilfslinien Jetzt-Gesehen haben ihren Zweck erfüllt und werden wieder ausradiert.

So ordne Ich die Ereignisse an. Wie aber machst Du es? Vor allem müssen wir Dich in die Abbildung einzeichnen (Abb. 3). Wir wollen annehmen, Du befindest Dich auf einem andern Stern, der mit einer anderen Geschwindigkeit im gegenwärtigen Augenblick nahe an der Erde vorbeifliegt, so daß wir uns zurzeit beide in dem Punkte Hier-Jetzt befinden, wenn wir auch in der Vergangenheit voneinander getrennt waren und es in Zukunft ebenfalls wieder sein werden. Dieser Sachverhalt ist vorschriftsmäßig in der Abbildung dargestellt. Wir beide beobachten die Welt von Hier-Jetzt aus und sehen selbstverständlich die gleichen Ereignisse gleichzeitig. Trotzdem können wir von ihnen recht verschieden-

artige Eindrücke haben, denn unser verschiedener Bewegungszustand wird auch verschiedene Doppler-Effekte, Fitz Gerald-Kontraktionen usw. hervorrufen. Es werden leichte Mißverständnisse zwischen uns vorkommen, bevor wir herausgefunden haben, daß das, was Du als rotes Quadrat beschreibst, für mich ein grünes Rechteck bedeutet usw. Aber, wenn wir diese Verschiedenheit der Beschreibung erst erkannt haben, wird es uns bald klar werden, daß wir die gleichen Ereignisse betrachten, und wir werden vollkommen in der Lage der Jetzt-Gesehen-Linien in bezug auf diese Er-

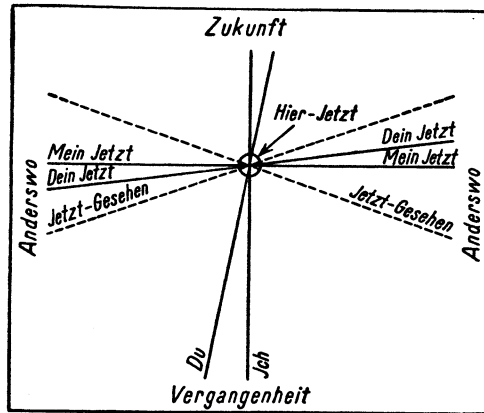


Abb. 3

eignisse übereinstimmen. Ausgehend von unseren gemeinsamen Linien Jetzt-Gesehen wirst Du zunächst die nötigen Rechnungen vornehmen müssen, um Deine Jetzt-Linie konstruieren zu können, und Du ziehst sie in der in Abb. 3 angegebenen Weise.

Wie kommt es nun, daß nicht auch unsere Jetzt-Linien zusammenfallen, da wir doch beide von der gleichen Linie Jetzt-Gesehen ausgehen? Es liegt daran, daß in unsere Rechnungen eine bestimmte gemessene Größe, nämlich die Lichtgeschwindigkeit eingeht, und Du Dich selbstverständlich darauf verläßt, daß Du sie richtig gemessen hast, während ich meiner Messung vertraue. Da aber unsere Meßinstrumente verschiedenen Fitz Gerald-Kontraktionen usw. unterworfen sind, so ist genügend Ursache für eine Abweichung der Ergebnisse vorhanden. Zu unserem größten Erstaunen finden wir jedoch beide die gleiche Lichtgeschwindigkeit von 299,796 Kilometer in der Sekunde. Natürlich rechnest

Du diese Geschwindigkeit relativ zu Deinem Planeten, ebenso wie ich sie relativ zu meinem rechne *. Infolgedessen ist aber die augenscheinliche Übereinstimmung unserer Messungen in Wirklichkeit die Ursache der Nichtübereinstimmung unserer Berechnungen und damit auch unserer Jetzt-Linien.

Wenn wir unsere weltweiten Augenblicke oder Jetzt-Linien für etwas zur Außenwelt gehöriges halten, so wird es nicht ausbleiben, daß wir in Streit geraten. Mir scheint es lächerlich, daß Du Ereignisse rechts auf der Abbildung, die noch gar nicht stattgefunden haben, mit Ereignissen auf der linken Seite, die bereits der Vergangenheit angehören, verbindest und dies dann einen augenblicklichen Zustand der Welt nennst. Du wieder bist empört über meine Anordnung. Eine Einigung ist ausgeschlossen. Wohl gewinnt man aus der Abbildung den Eindruck, als ob meine Augenblicke natürlicher wären als Deine, aber das ist nur die Folge davon, daß ich die Abbildung gezeichnet habe. Hättest Du sie gemacht, so würdest Du natürlich Deine Jetzt-Linie im rechten Winkel zu Dir selbst gezogen haben.

Wir haben jedoch keinen Anlaß zu streiten, wenn den Jetzt-Linien nur die Bedeutung von Bezugslinien zukommt, die wir einem Übereinkommen gemäß durch die Welt gezogen haben, um die Ereignisse besser anordnen zu können — wie die Breiten- und Längengrade auf der Erde. Dann stellt sich eben die Frage nach der richtigen oder falschen Eintragung dieser Linie nicht mehr, und wir ziehen sie so, wie sie unserer Vereinbarung am besten entspricht. Weltweite Augenblicke sind keine natürlichen Spaltflächen der Zeit. Nichts entspricht ihnen in dem absoluten Gefüge der Welt; sie sind gedachte Schnitte, deren Einführung wir nützlich gefunden haben.

Wir haben uns daran gewöhnt, die Welt, d. h. die Welt in ihrer Dauer als geschichtet anzusehen, als bestehend

* Die gemessene Lichtgeschwindigkeit ist das Mittel aus der Geschwindigkeit hin und zurück. Die Geschwindigkeit in nur einer Richtung kann nämlich erst nach Festlegung der Jetzt-Linien gemessen werden, und kann daher nicht dazu benutzt werden, diese zu finden. Wir geraten also bei Konstruktion der Jetzt-Linien in eine Sackgasse, aus der wir nur mit Hilfe einer willkürlichen Festsetzung einen Ausweg finden. Man ist daher dahin übereingekommen (relativ zum Beobachter), die Lichtgeschwindigkeit in zwei entgegengesetzten Richtungen als gleich anzunehmen. Infolgedessen beruhen aber die hierdurch gefundenen Jetzt-Linien ebenfalls auf Übereinkunft.

aus einer Folge von Augenblicks-Zuständen. Ein Beobachter auf einem andern Sterne würde jedoch diese Schichten in einer anderen Richtung laufen lassen. Wir werden den wahren Bau der physikalischen Welt klarer erkennen, wenn wir von dieser Illusion einer Schichtung loskommen können. Dann wird sich uns die Welt neu offenbaren, fremdartig und doch einfacher. Einfachheit und Vertrautheit fallen nicht immer zusammen. Ein Schwein mag uns in Form von Koteletts am vertrautesten erscheinen, aber ich glaube das unzerteilte Schwein ist das einfachere Objekt für den Biologen, der die Lebensfunktionen dieses Tieres erforschen will.

Absolute Vergangenheit und Zukunft. Lassen Sie uns versuchen, diesen Einblick in das Absolute zu gewinnen. Zunächst radieren wir die Jetzt-Linien aus und ebenso Dich

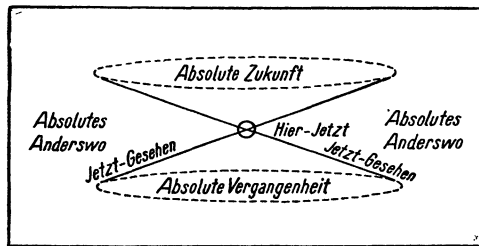


Abb. 4

und mich, da wir nicht länger für die Welt wesentlich sind. Aber die Linien Jetzt-Gesehen bleiben stehen. Sie sind absolut, denn sie sind dieselben für alle Beobachter im Punkte Hier-Jetzt. Unsere zweidimensionale Abbildung stellt einen Schnitt durch die vierdimensionale Welt dar. Man muß sie rotiert denken (eigentlich zweimal rotiert, da es außerhalb dieses Blattes noch zwei weitere Dimensionen gibt). Der Ort aller Ereignisse Jetzt-Gesehenen ist also in Wirklichkeit ein Kegel. Wenn wir der Verlängerung der Linien in die Zukunft Rechnung tragen, hat er die Form eines Doppelkegels oder einer Sanduhr (Abb. 4). Diese Sanduhren (welche man sich durch jeden Punkt der Welt, indem man ihn der Reihe nach als Hier-Jetzt auffaßt, gezogen denken muß) bringen alles zum Ausdruck, was wir über die absolute Struktur der Welt wissen, soweit es Raum und Zeit betrifft. Sie veranschaulichen gewissermaßen den Verlauf der Fasern in der Weltstruktur.

Vater Kronos wird in der bildenden Kunst als alter Mann mit Sense und Stundenglas dargestellt. Wir gestatten ihm nicht länger, mit seiner Sense die Welt in Augenblicke zu zerteilen; wohl aber lassen wir ihm seine Sanduhr.

Da diese Sanduhr etwas Absolutes ist, so bedeuten ihre beiden Kegel die absolute Zukunft bzw. die absolute Vergangenheit des Ereignisses Hier-Jetzt. Diese werden durch eine keilförmige neutrale Zone getrennt, die (in absolutem Sinne) weder Vergangenheit noch Zukunft ist. Die verbreitete Ansicht, daß die Relativität Vergangenheit und Zukunft völlig durcheinanderwirft, ist ganz falsch. Doch im Gegensatz zur relativen Vergangenheit und Zukunft werden absolute Vergangenheit und Zukunft nicht mehr durch eine unendlich schmale Gegenwart voneinander geschieden. Es drängt sich der Gedanke auf, daß man die neutrale Zone vielleicht absolute Gegenwart nennen könne, doch würde ich dies nicht für eine glückliche Bezeichnung halten. Weit treffender wird sie durch die Benennung „Absolutes Anderswo“ charakterisiert. Wir haben ja die Jetzt-Linien ausgetilgt und in der absoluten Welt die Gegenwart (Jetzt) auf Hier-Jetzt beschränkt.

Vielleicht kann ich die merkwürdigen Verhältnisse, die aus dem Bestehen dieser neutralen Zone folgen, durch ein allerdings etwas hypothetisches Beispiel näher beleuchten. Angenommen, Sie verlieben sich in eine Dame auf dem Neptun, und diese erwidert Ihre Neigung. Da wäre es ein Trost in der trübseligen Trennung, wenn Sie sich in einem bestimmten — vielleicht vorher vereinbarten Zeitpunkt — sagen könnten: „Jetzt denkt sie an mich“! Unglücklicherweise stellt sich dem ein Hindernis entgegen, denn wir haben ja das Jetzt abschaffen müssen. Es gibt kein absolutes Jetzt, sondern nur die verschiedenen relativen Jetzt, die gemäß der Rechnungsweise der verschiedenen Beobachter voneinander abweichen und den ganzen neutralen Keil überdecken, der in der Entfernung des Neptun ungefähr 8 Stunden dick ist. Das arme Mädchen muß also ohne Unterbrechung 8 Stunden lang an Sie denken, um die Vieldeutigkeit des Jetzt zu umgehen.

Bei der größten auf der Erde möglichen gegenseitigen Entfernung beträgt allerdings die Dicke der neutralen Zone nicht mehr als ein Zehntel Sekunde, so daß die irdische Gleichzeitigkeit nicht ernstlich gefährdet ist. Dies bedingt eine gewisse Einschränkung unserer obigen Schlußfolgerung,

daß die absolute Gegenwart auf Hier-Jetzt eingeengt sei. Sie gilt nur für Ereignisse von der Dauer eines einzigen Augenblickes (für Punktereignisse). Aber im praktischen Leben haben alle Ereignisse, die wir beobachten, mehr als infinitesimale Dauer. Reicht die Dauer hin, um die Öffnung des neutralen Keiles zu überdecken, dann kann man durchaus sagen, daß das Ereignis als Ganzes betrachtet absolut Jetzt stattfindet. Von diesem Gesichtspunkt aus ist das „Jetztsein“ eines Ereignisses wie ein Schatten, den es in den Raum wirft: je länger die Dauer des Ereignisses, desto weiter wird sich der Kernschatten erstrecken.

Nähert sich die Geschwindigkeit eines materiellen Körpers der Lichtgeschwindigkeit, so wächst seine Masse bis ins Unendliche. Daraus folgt die Unmöglichkeit, ihm eine größere Geschwindigkeit als die des Lichtes zu erteilen. Diese Schlußfolgerung leitet sich aus den Gesetzen der klassischen Physik ab und wurde durch Versuche bis hinauf zu sehr großen Geschwindigkeiten bestätigt gefunden. In der absoluten Welt ist der Sinn dieses Satzes, daß ein Materieteilchen von Hier-Jetzt nur in die absolute Zukunft gelangen kann — eine Einschränkung, die vernünftig und angemessen ist, wie jeder zugeben muß. Es kann nicht in die neutrale Zone eindringen, da der begrenzende Kegelmantel die Bahn des Lichtes ist, oder von irgend etwas, das sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Auch wir selbst als Wesen, die an materielle Körper gebunden sind, können nur in die absolute Zukunft vordringen.

Ereignisse in der absoluten Zukunft sind nicht absolut anderswo. Es würde einem Beobachter möglich sein, von Hier-Jetzt abzureisen und rechtzeitig einzutreffen, um dem betreffenden Ereignis beizuwohnen, denn die hierzu nötige Geschwindigkeit ist geringer als die Lichtgeschwindigkeit; relativ zu dem Weltgerüst eines solchen Beobachters würde das Ereignis Hier sein. Aber kein Beobachter kann einem Ereignis in der zu seinem Hier-Jetzt gehörigen neutralen Zone beiwohnen, da die hierzu nötige Geschwindigkeit zu groß wäre. Das Ereignis ist also für keinen Beobachter, der vom Hier-Jetzt ausgeht, Hier; folglich ist es absolut Anderswo.

Der absolute Unterschied zwischen Raum und Zeit.
Unsere sanduhrähnlichen Doppelkegel, welche die Welt in absolute Vergangenheit und Zukunft auf der einen Seite, und

in absolutes Anderswo auf der anderen Seite teilen, haben eine fundamentale Unterscheidung zwischen Raum und Zeit von neuem eingeführt. Es ist dies aber nicht ein solcher Unterschied zwischen Raum und Zeit, wie er bei den Koordinaten in einem raumzeitlichen Weltgerüst erscheint, sondern ein Unterschied zwischen zeitlichen und räumlichen Beziehungen. Ereignisse können zu uns entweder in einer zeitlichen Beziehung (absolute Vergangenheit oder Zukunft), oder in einer räumlichen Beziehung (absolutes Anderswo) stehen, nicht aber in beiden Beziehungen zugleich. Die zeitlichen Beziehungen verbreiten sich strahlenförmig in die Kegel der absoluten Vergangenheit und Zukunft, die räumlichen Beziehungen in den neutralen Keil. Beide Arten von Beziehungen aber werden absolut getrennt gehalten durch die Jetzt-Gesehen-Linien, welche wir mit den Fasern der absoluten Weltstruktur identifizierten. Wir haben die Grenzmarkierung wieder in Ordnung gebracht, die der staatliche Observator verrückte, als er die Zeit an die bloß künstlich eingeführten Jetzt-Linien knüpfte.

Ich möchte nun Ihre Aufmerksamkeit auf eine wichtige Verschiedenheit hinlenken, die zwischen unserer Wahrnehmung von zeitlicher und von räumlicher Ausdehnung besteht. Wie schon erwähnt, führt unser Weg durch die Welt in die absolute Zukunft, d. h. entlang einer Folge von zeitlichen Beziehungen. Niemals können wir eine Folge von räumlichen Beziehungen in ähnlicher Weise erfahren, denn dies würde eine Fortbewegung mit Überlichtgeschwindigkeit bedingen. Wir haben also unmittelbare Erfahrung nur von zeitlichen Beziehungen, nicht aber von räumlichen. Unsere Kenntnis räumlicher Beziehungen ist indirekt, wie fast unsere gesamte Kenntnis von der Außenwelt, ein Ergebnis von Schlußfolgerungen und Auslegungen, gewonnen aus Eindrücken, die uns durch unsere Sinnesorgane vermittelt werden. Eine ähnlich indirekte Kenntnis haben wir von zeitlichen Beziehungen zwischen Ereignissen, die sich in der Welt außerhalb von uns abspielen, aber hierzu kommt noch die direkte Erfahrung von denjenigen zeitlichen Beziehungen, die wir selbst durchlaufen, ein Wissen von der Zeit, das nicht durch äußere Sinnesorgane vermittelt wird, sondern auf direktem Wege in unser Bewußtsein dringt. Wenn ich die Augen schließe und meinen Blick nach innen wende, so empfinde ich mich als *d a u e r n d*, nicht aber empfinde ich mich als *a u s g e d e h n t*. Es ist dies unmittelbare Zeit-

gefühl, das wir unabhängig von den zeitlichen Beziehungen der äußeren Ereignisse in uns selber haben, welches so besonders charakteristisch für die Zeit ist. Im Gegensatz dazu erfassen wir den Raum immer als etwas außerhalb von uns.

Dies ist der Grund dafür, warum die Zeit uns so viel geheimnisvoller vorkommt als der Raum. Wir wissen nichts über das innere Wesen des Raumes, und so sind wir leicht durch die Vorstellung zu befriedigen, die wir uns von ihm bilden. Von dem Wesen der Zeit aber haben wir viel unmittelbare Kunde und so spottet sie unserer Vorstellungskraft. Es ist derselbe paradoxe Grund, aus dem wir glauben das Wesen eines gewöhnlichen Tisches zu erfassen, während uns das Rätsel der menschlichen Persönlichkeit unlösbar erscheint. Niemals kommen wir mit dem Raum oder mit einem Tisch in so intime Berührung, daß wir gewahr werden können, wie geheimnisvoll auch sie sind. Aber eine unmittelbare Kenntnis der Zeit und der menschlichen Seele läßt uns jene rein symbolische Auffassung der Welt als unzulänglich zurückweisen, die so oft fälschlich für eine wirkliche Einsicht in ihr Wesen gehalten wird.

Die vierdimensionale Welt. Ich weiß nicht, wie Sie sich damit abgefunden haben, daß wir mit unseren Betrachtungen schon einige Zeit in einer vierdimensionalen Welt stecken. Die vierte Dimension brauchte gar nicht eingeführt zu werden, denn sobald wir uns mit Ereignissen beschäftigen, war sie von selbst da. Es ist offensichtlich, daß Ereignisse eine vierfache Ordnung besitzen, die man in rechts oder links, vorn oder hinten, oben oder unten, früher oder später — und noch in manche andere Gruppen von vierfältiger Einteilung gliedern kann. Der Begriff einer vierten Dimension bietet keinerlei Schwierigkeiten. Es ist nicht schwierig, Ereignisse als in vier Dimensionen angeordnet aufzufassen; es ist im Gegenteil unmöglich, sie sich anders vorzustellen. Die Schwierigkeit entsteht erst, wenn wir den Gedankengang weiter verfolgen, denn lange Gewöhnung hat uns gelehrt, die Welt der Ereignisse in dreidimensionalen Schnitten oder Momentanzuständen zu betrachten, und das Aufeinanderschichten dieser Momentanzustände als etwas anders Geartetes und nicht als eine weitere Dimension aufzufassen. Dies ergibt dann die übliche Vorstellung einer dreidimensionalen Welt, die im Strom der Zeit dahintreibt. Freilich entbehrt diese Bevorzugung einer

bestimmten Dimension nicht ganz der Berechtigung. Es dokumentiert sich darin in unvollkommener Weise die absolute Scheidung zwischen zeitlichen und räumlichen Beziehungen, wie wir sie durch die Doppelkegel des Stundenglasses gekennzeichnet haben. Diese rohe Unterscheidung muß jedoch durch eine genauere ersetzt werden. Die zuerst angenommenen Strukturflächen, die durch die Jetzt-Linien dargestellt wurden, sonderten eine Dimension von den andern drei ab, aber die Strukturkegel, die durch die Stundenglas-Figuren gegeben sind, heften die vier Dimensionen fest aneinander*.

Wenn wir an einen Menschen denken, sehen wir gewöhnlich ab von seiner Dauer. Als ich mein Ich in Abb. 2 einzeichnete, waren Sie sicher zuerst erstaunt, daß ich meine Kindheit und mein künftiges Alter mit einbezog. Doch der Begriff eines Menschen, abgesehen von seiner Dauer, wäre ebenso abstrakt wie der eines Menschen ohne sein Inneres. Abstraktionen haben ihren Nutzen, und ein Mensch ohne sein Inneres (also eine Oberfläche) ist ein ganz bestimmter geometrischer Begriff. Aber wir müssen uns darüber im Klaren sein, was eine Abstraktion ist, und was nicht. Der „vierdimensionale Wurm“, den ich in diesem Kapitel eingeführt habe, wird den meisten unter Ihnen entsetzlich abstrakt erscheinen. Jedoch mit Unrecht: Er bedeutet einen ungewohnten Begriff, aber keinen abstrakten. Gerade der Schnitt durch diesen Wurm (der Mensch Jetzt) ist eine Abstraktion. Und wie man Schnitte in verschiedenen Richtungen ausführen kann, wird diese Abstraktion von verschiedenen Beobachtern, die ihr entsprechend verschiedene Fitz Gerald-Kontraktionen beilegen, in verschiedener Weise vorgenommen. Der nicht-abstrakte Mensch mit seiner Dauer in der Zeit ist die gemeinsame Quelle, aus der diese Abstraktionen gewonnen werden.

Die Einführung einer vierdimensionalen Welt in die Betrachtungsweise der Physik verdanken wir Minkowski. Einstein zeigte die Relativität der bekannten physikalischen

* In Abb. 4 ist der Maßstab so gewählt, daß eine Sekunde Zeit 100000 km im Raume entspricht. Wenn wir jedoch unseren Maßstab mehr unseren Wahrnehmungen anpassen, so daß etwa eine Sekunde einem Meter entspricht, so werden die Jetzt-Gesehen-Linien fast horizontal und man wird dann leicht verstehen, warum die Kegel, welche die vier Dimensionen aneinanderheften, fälschlich für Schnitte gehalten werden konnten, die sie trennen.

Größen. Minkowski lehrte uns das Absolute finden, indem er tiefer schürfend auf ihren vierdimensionalen Ursprung zurückging.

Die Lichtgeschwindigkeit. Die Absolutheit der Lichtgeschwindigkeit ist anscheinend diejenige Behauptung der Relativitätstheorie, die den Philosophen am meisten zu schaffen gemacht hat. Im allgemeinen ist Geschwindigkeit etwas Relatives. Wenn ich von einer Geschwindigkeit von 40 km in der Sekunde spreche, muß ich hinzufügen „relativ zur Erde“, „relativ zum Arcturus“, oder relativ zu irgend einem anderen Körper, auf den ich mich beziehen will. Niemand wird sich ohne diesen Zusatz irgend etwas unter meiner Aussage vorstellen können, wenn er ihn nicht als selbstverständlich voraussetzt. Ist es nun nicht außerordentlich merkwürdig, daß nur, wenn ich eine Geschwindigkeit von 299796 km/sec meine, dieser erklärende Zusatz unnötig ist? Relativ wozu? Relativ zu irgendeinem oder all und jedem Stern oder Materieteilchen des ganzen Universums.

Es ist ein nutzloses Unterfangen, einen Lichtstrahl einzufangen zu wollen. Mag man auch noch so schnell vorwärtskommen, immer wird er mit 299796 km/sec von uns wegeilen. Wenn man es so auffassen will, hat uns da eigentlich die Natur ziemlich unwürdig zum Narren gehalten. Lassen wir einmal unseren schon so oft herangeholten Beobachter, der 260000 Kilometer in der Sekunde zurücklegt, die Verfolgung eines Lichtstrahls aufnehmen. Der Lichtstrahl läuft nur um 40000 Kilometer in der Sekunde schneller, und doch wird dies keineswegs der Eindruck sein, den unser Beobachter von dem Wettlauf gewinnt. Infolge der Kontraktion seines Maßstabes sind seine Kilometer nur Halb-Kilometer, seine Sekunden aber sind infolge der Verzögerung seiner Uhren Doppel-Sekunden. Seine Messungen würden dementsprechend die Geschwindigkeit mit 160000 km/sec (in Wirklichkeit Halb-Kilometer je Doppel-Sekunde) angeben, wenn er nicht einen weiteren Fehler beim Synchronisieren der Uhren machte, mit denen er die Geschwindigkeit registriert. (Erinnern Sie sich des Umstandes, daß er andere Jetzt-Linien benutzt, als wir.) Das bringt die von ihm gemessene Geschwindigkeit auf genau 299796 Kilometer in der Sekunde. Von seinem eigenen Gesichtspunkt aus hinkt unser Schnelläufer hoffnungslos hinter dem Lichtstrahl her,

ohne sich dessen bewußt zu sein, welch ausgezeichnetes Rennen er macht, denn seine Meßgeräte sind völlig in Unordnung geraten. Es ist gut, sich darüber klar zu sein, daß dieses ständige Zurückweichen des Lichtstrahls nicht die geringste Analogie zu dem Zurückweichen eines Regenbogens besitzt.

Obleich diese Erläuterung dazu beitragen mag, uns mit dem zu versöhnen, was auf den ersten Blick als krasse Unmöglichkeit erschien, trifft sie doch nicht das Wesentliche der Einsteinschen Behauptung. Sie werden sich erinnern, daß wir gesagt haben, eine Jetzt-Gesehen-Linie, d. h. die Spur eines Lichtstrahls, stelle eine Faser der Weltstruktur dar. Es ist also die besondere Eigentümlichkeit der Geschwindigkeit von 299796 km/sec, daß sie entlang der Faser der Weltstruktur verläuft. Jeder materielle Körper hingegen wird durch einen vierdimensionalen Wurm dargestellt, der quer zur Faserung in den Kegel der Zukunft verläuft. Infolgedessen muß irgendein Bezugssystem eingeführt werden, um diesen Verlauf zu beschreiben. Der Lichtstrahl jedoch läuft genau entlang der Faser, und kein künstliches Einteilungssystem ist zur Beschreibung dieser Tatsache erforderlich.

Die Maßzahl 299796 (Kilometer in der Sekunde) ist gewissermaßen eine Schlüsselzahl zur Kennzeichnung der Fasern des Holzes, aus dem das Weltgebäude errichtet ist. Andere Schlüsselzahlen entsprechen den verschiedenen von den Würmern gefressenen Löchern, welche diese Fasern planlos kreuzen. Für die verschiedenen vierdimensionalen Weltgerüste haben wir verschiedene Schlüsselsysteme, aber die Kennziffer für die Fasern des Holzes ist als einzige für alle Schlüsselsysteme die gleiche. Dies ist kein Zufall. Doch liegt, wie ich glaube, darin kein anderer Sinn verborgen, als daß das Schlüsselsystem unserer Messungen vernünftig angelegt ist, so daß es den wesentlichen Zügen der Weltstruktur Rechnung trägt und nicht den zufälligen.

Die Geschwindigkeit von 299796 Kilometer in der Sekunde, die eine so einzigartige Stellung in jedem Maßsystem inne hat, wird gewöhnlich als Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Aber sie ist viel mehr als das. Sie ist die Geschwindigkeit, bei der die Masse unendlich wird, bei der jede Länge auf Null zusammenschrumpft, bei der die Uhren stillstehen. Daher tritt sie in Problemen jeder Art auf, mag es sich dabei um Licht handeln oder nicht.

Das Interesse, das der Naturforscher der absoluten Natur dieser Geschwindigkeit entgegenbringt, ist außerordentlich groß. Das Interesse des Philosophen beruht jedoch, wie ich glaube, zum großen Teil auf einem Mißverständnis. Wenn Naturforscher die Lichtgeschwindigkeit absolut nennen, so wollen sie damit ausdrücken, daß sie ihr in jedem Maßsystem die gleiche Maßzahl zugeordnet haben^o; doch ist dies gewissermaßen ein Privatabkommen der Physiker untereinander — ein unbewußtes Kompliment für die allgemeine Bedeutung dieser Größe*. Wenden wir uns nun von den Maßzahlen den Dingen selber zu, die sie beschreiben: Die Faserung ist sicher eine absolute Eigenschaft des Holzes, aber dasselbe gilt auch von den Wurmlöchern (den materiellen Teilchen). Der Unterschied liegt darin, daß die Faserung eine wesentliche und allgemeine Eigenschaft des Holzes ist, die Wurmlöcher jedoch etwas Zufälliges. Naturwissenschaft und Philosophie sind sich oft in der Frage nach dem Absoluten schroff gegenübergetreten; das waren Mißverständnisse, bei denen, wie ich fürchte, die Schuld meistens auf Seiten der Naturwissenschaft lag. In der Physik beschäftigen wir uns meistens nur mit der Absolutheit bzw. Relativität der Ausdrücke, die wir zur Beschreibung anwenden. Wenn jedoch der Ausdruck „absolut“ auf das zu Beschreibende selbst angewendet wird, hat er im allgemeinen die verschwommenere Bedeutung von „universell“ im Gegensatz zu „zufällig“.

Ein weiterer Punkt, der häufig mißverstanden wird, ist die Existenz einer oberen Grenze der Geschwindigkeit. Man darf nicht sagen, daß keine Geschwindigkeit den Wert von 299 796 km/sec überschreiten könne. Um ein Beispiel zu nennen: Stellen Sie sich einen Scheinwerfer vor, der so stark ist, daß er ein genau paralleles Lichtbündel bis zum Neptun zu werfen vermag. Wenn sein Licht auch nur einmal in der Minute einen Umlauf macht, so wird das Neptunsende des Strahles einen Kreis mit einer Umlaufgeschwindigkeit beschreiben, die die obige Grenze weit überschreitet. Dies ist ein Beispiel dafür, daß wir gewohnt sind, Geschwindigkeiten zu erschaffen, indem wir in unserem

* In der allgemeinen Relativitätstheorie (Kap. VI) kommen Maßsysteme vor, in denen der Lichtgeschwindigkeit nicht immer derselbe konstante Wert beigelegt wird. Aber immer noch ist sie der Faserung der absoluten Weltstruktur zugeordnet.

Geiste Zustände verbinden, die in keinem direkten kausalen Zusammenhang stehen. Die Relativitätstheorie behauptet etwas viel Eingeschränkteres, nämlich:

Weder **M a t e r i e**, noch **E n e r g i e**, noch irgend etwas, was als **S i g n a l** tauglich ist, kann eine größere Geschwindigkeit als 299796 km/sec haben, vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit auf eines der raumzeitlichen Systeme bezogen ist, die wir in diesem Kapitel betrachtet haben*.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in einem materiellen Medium kann unter gewissen Umständen (bei anomaler Dispersion) diesen Wert überschreiten. Doch wird die höhere Geschwindigkeit erst erreicht, nachdem das Licht kurze Zeit durch das Medium hindurchgegangen ist und die Moleküle in Resonanzschwingungen versetzt hat. Ein nicht auf diese Weise vorher angemeldeter Lichtstrahl wandert langsamer. Die Geschwindigkeit von über 299796 km/sec kann sozusagen nur nach vorheriger Vereinbarung mit den Molekülen erreicht und somit zum Senden eines Signals nicht ausgenützt werden.

Für jede Signalgeschwindigkeit müssen wir auf der Festsetzung einer oberen Grenze bestehen, denn diese ist gleichbedeutend mit der Bedingung, daß Signale nur in die absolute Zukunft gesendet werden können. Wenn man imstande wäre, Botschaften aus dem Hier-Jetzt in den neutralen Kegel zu übermitteln, würde dies so bizarre Folgen haben, daß es keinen Sinn hat, sie in Erwägung zu ziehen. Entweder müßte der Teil des neutralen Kegels, der durch Signale erreicht werden kann, auf eine Weise eingeschränkt werden, die in Widerspruch zum Relativitätsprinzip steht; oder es würde sich die Möglichkeit ergeben, daß jemand Botschaften, die wir erst morgen zu senden beabsichtigen, schon heute empfangen und an uns zurückgeben könnte! Die Festsetzung einer oberen Grenze für die Signalgeschwindigkeit ist unser Bollwerk gegen jede Vermengung von Vergangenheit und Zukunft, deren die Einsteinsche Theorie so oft zu Unrecht beschuldigt wird.

In der üblichen Formulierung hat diese Beschränkung der Signalgeschwindigkeit auf 299796 km/sec das Aussehen

* Irgendein Vorbehalt dieser Art ist selbstverständlich notwendig. Für manche Zwecke benutzt man z. B. ein Bezugsgerüst, das mit der Erde rotiert. Relativ zu diesem Gerüst durchlaufen die Sterne Tag für Tag Kreisbahnen mit enormer Geschwindigkeit.

einer ziemlich willkürlichen Verordnung der Natur. Wir empfinden sie beinahe als eine Herausforderung, doch etwas zu entdecken, was schneller läuft. Aber wenn wir ihr die absolute Fassung geben, daß ein Signal nur längs einer Spur zeitlicher Beziehungen und nicht längs einer Spur räumlicher Beziehungen verlaufen kann, so erscheint die Einschränkung durchaus vernünftig. Wollte man sie durchbrechen, so müßte man nicht nur etwas finden, was gerade noch einen Kilometer schneller laufen kann, sondern etwas, das die Scheide zwischen Raum und Zeit überspringt, die unserer festen Überzeugung nach in jeder vernünftigen Theorie gewahrt werden muß⁷.

Praktische Anwendungen. In diesen Vorträgen soll zwar der Ideengehalt der neuen Theorien und nicht ihre praktische Auswirkung den Hauptgegenstand meiner Betrachtungen bilden, doch fürchte ich, wenn ich mich gar zu ausschließlich auf die begriffliche Grundlage beschränke, werden Sie den Eindruck gewinnen, die neue Theorie „schwebe nur in höheren Regionen“. Dies entspricht aber keineswegs dem wirklichen Tatbestand. Die Relativitätstheorie findet in der nüchternsten Weise Anwendung auf geeignete praktische Probleme. Ich kann hier jedoch nur ihre Anwendung auf ganz elementare Fragen betrachten, die kaum geeignet sind, die umfassende Wirkung dieser Theorie bei tief liegenden physikalischen Problemen ins rechte Licht zu setzen. Zwei Beispiele mögen genügen:

1. Man hat oft die Vermutung ausgesprochen, daß die Sterne durch den Gegendruck ihrer eigenen Strahlung eine Verzögerung erleiden müßten. Der Gedankengang ist dabei ungefähr folgender: Durch die Vorwärtsbewegung der Sterne wird die ausgesandte Strahlung gewissermaßen vor dem Sterne aufgehäuft und hinter ihm verdünnt. Da nun jede Strahlung einen (ihrer Dichte proportionalen) Druck ausübt, wird der Druck auf die Vorderseite des Sternes größer sein, als der auf die Rückseite, und es wird eine die Bewegung des Sternes verzögernde Kraft entstehen, die ihn schließlich zum Stillstand bringen müßte. Der Effekt könnte von der größten Bedeutung für das Studium der Sternbewegungen sein. Wäre er vorhanden, so würde das bedeuten, daß im Durchschnitt alte Sterne eine geringere Geschwindigkeit haben müßten als junge Sterne. Man hat jedoch

feststellen können, daß diese Schlußfolgerung in Widerspruch mit der tatsächlichen Beobachtung steht.

Aber in der Relativitätstheorie entbehrt der Ausdruck: „zur Ruhe kommen“ jeglichen Sinnes. Eine Abnahme der Geschwindigkeit in bezug auf ein Bezugssystem ist gleichzeitig eine Zunahme derselben in bezug auf ein anderes. Es gibt für den Stern keine absolute Geschwindigkeit und auch keine absolute Ruhe, zu der er kommen könnte. Die Frage erledigt sich also von selber, da sie keinen Sinn hat.

2. Die von radioaktiven Substanzen ausgesandten β -Teilchen sind Elektronen, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Es ist experimentell bewiesen, daß die Masse eines dieser schnellen β -Teilchen erheblich größer als die Masse eines ruhenden Elektrons ist. Die Relativitätstheorie sagt diese Massenzunahme voraus und liefert auch die Formel für die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit. Die Zunahme ergibt sich aus der einzigen Tatsache, daß Masse eine relative Größe ist, die durch Definition von den relativen Größen Länge und Zeit abhängt.

Wir wollen uns ein β -Teilchen von seinem eigenen Standpunkt aus ansehen.

Es ist ein ganz gewöhnliches Elektron und unterscheidet sich in nichts von seinen Kameraden. Aber befindet es sich nicht in ganz ungewöhnlich schneller Bewegung? „Nein“, sagt das Elektron, „das ist Ihre Ansicht. Ich aber kann nur mit Verwunderung Ihre außerordentliche Geschwindigkeit von 160 000 Kilometer in der Sekunde betrachten, mit der Sie an mir vorbeischießen. Was mögen Sie wohl bei einer so schnellen Bewegung empfinden? Doch das ist nicht meine Sache.“ So glaubt das β -Teilchen sich behaglich in Ruhe und kümmert sich nicht weiter um unser Beginnen und richtet sich mit den üblichen Größen von Masse, Radius und Ladung ein. Es hat genau die Normalmasse eines Elektrons im Betrage von $9 \cdot 10^{-28}$ Gramm. Aber Masse und Radius sind relative Größen, und es ist klar, daß das in Selbstbetrachtung versunkene Elektron sie auf sein eigenes Bezugssystem bezieht, nämlich auf das, in dem es sich in Ruhe befindet. Wenn wir hinwiederum von Masse sprechen, beziehen wir sie stillschweigend auf das System, in dem wir uns in Ruhe befinden. Die Geometrie der vierdimensionalen Welt liefert uns die Transformationsformel für die Umrechnung der Masse von dem einen System auf das andere

als Folge der Transformation von Länge und Zeit. Es ergibt sich das Resultat, daß die Masse in demselben Maße zunimmt, wie die Länge abnimmt (Fitz Gerald-Faktor). Die Massenzunahme, die wir beobachten, ist also auf den Wechsel zwischen dem Bezugssystem des Elektrons und dem unsrigen zurückzuführen.

Von ihrem eigenen Gesichtspunkt aus sind alle Elektronen einander gleich. Die scheinbaren Unterschiede entstehen erst dadurch, daß wir die schnell fliegenden β -Teilchen unserem eigenen Bezugssystem anpassen, das mit ihrem inneren Aufbau nichts zu tun hat. Unsere Berechnung ihrer Masse liefert einen höheren Wert als ihre eigene Rechnung, und dieser Unterschied wächst mit dem Unterschied unserer beiderseitigen Bezugssysteme, d. h. mit der Geschwindigkeit, die wir relativ zueinander haben.

Daß ich diese beiden Beispiele für die Anwendung der Relativitätstheorie erörtert habe, geschah nicht, um ihre Wahrheit zu beweisen, sondern um Ihnen ihren Nutzen zu zeigen. Beide Resultate können mit Hilfe der klassischen Theorie des Elektromagnetismus von Maxwell abgeleitet werden, wenn man (für das zweite Problem) gewisse durchaus einleuchtende Annahmen über die Bedingungen an der Oberfläche des Elektrons hinzunimmt. Wenn wir uns jedoch die Überlegenheit der neuen Theorie vergegenwärtigen wollen, so handelt es sich für uns nicht darum, was aus der klassischen Theorie abgeleitet werden kann, sondern um das, was tatsächlich abgeleitet ist. Historische Tatsache ist, daß die Schlußfolgerungen, welche die klassische Theorie in bezug auf das erste Problem (die Verzögerung der Sternbewegung infolge des Strahlungsdruckes) gezogen hatte, falsch waren, da ein wichtiger kompensierender Faktor der Aufmerksamkeit entgangen war. Was das zweite Problem (die Massenzunahme eines bewegten Elektrons) betrifft, so war das Resultat (nach einigen falschen Ansätzen) numerisch vollkommen richtig. Da es aber aus den für das Elektron geltenden elektromagnetischen Gleichungen abgeleitet war, entstand die irrige Ansicht, es sei auf die elektrische Struktur des Elektrons zurückzuführen, und die Übereinstimmung zwischen theoretischer Vorhersage und Experiment wurde als Beweis für die Richtigkeit der Annahme angesehen, daß ein Elektron reine Elektrizität sei und sonst nichts. Die Art und Weise jedoch, wie die Relativitätstheorie das Problem in Angriff

nimmt, zeigt, daß es sich nur um die allgemeine Erscheinung der Relativität jeder Masse handelt und die spezielle elektrische Struktur des Elektrons gar nicht in Frage kommt. Mögen darum auch andere gute Gründe für die Annahme vorhanden sein, das Elektron bestehe nur aus negativer Elektrizität, die Zunahme seiner Masse mit der Geschwindigkeit ist weder ein Beweis dafür noch dagegen.

In diesem Kapitel ist der Begriff einer Vielheit von Raumgerüsten auf eine Vielheit von raumzeitlichen oder Weltgerüsten ausgedehnt. Das zur Einordnung der Dinge im Raume geschaffene System, das wir Raumgerüst nannten, ist nur ein Teil eines umfassenderen Systems der Einordnung von Ereignissen in Raum und Zeit. Die Natur hat keines dieser Gerüste vor den anderen ausgezeichnet. Das spezielle Gerüst, in dem wir uns in Ruhe befinden, besitzt für uns eine Symmetrie, die wir in den andern Gerüsten nicht finden. So ist es erklärlich, daß wir allgemein in dem Vorurteil befangen waren, es sei das einzige vernunftgemäße und geeignete Gerüst. Dieser egozentrische Standpunkt mußte jedoch aufgegeben und alle mußten als gleichwertig angesehen werden. Durch eine Betrachtungsweise, die Raum und Zeit gleichzeitig umfaßt, konnten wir einen tieferen Einblick in die Entstehungsursache dieser Vielheit von Gerüsten gewinnen: Sie entsprechen den verschiedenen Richtungen möglicher Schnitte durch die vierdimensionale Welt der Ereignisse, deren jeder einen „weltweiten Augenblick“ darstellt. Gleichzeitigkeit (Jetzt) muß als relativer Begriff angesehen werden. Die Unmöglichkeit absoluter Gleichzeitigkeit ist eng verknüpft mit der Unmöglichkeit absoluter Geschwindigkeit. Würden wir eine absolute Geschwindigkeit kennen, so könnten wir feststellen, daß gewisse Ereignisse in der Vergangenheit oder Zukunft Hier, aber nicht Jetzt stattfinden, wohingegen die Kenntnis absoluter Gleichzeitigkeit uns davon unterrichten würde, daß gewisse Ereignisse Jetzt, aber nicht Hier stattfinden. Indem wir uns von der Hemmung durch diese künstlichen Schnitte befreien, konnten wir einen schwachen Schimmer von dem absoluten Aufbau der Welt erhaschen mit seiner Struktur von sich kreuzenden, zusammenlaufenden und wieder auseinanderstrebenden Fasern, wie wir sie durch die Sanduhr-Figuren veranschaulicht haben. Durch Bezugnahme auf diese Struktur gewinnen wir einen Einblick in den absoluten Unterschied zwischen raumartiger und zeitartiger Trennung

der Ereignisse, — einen Unterschied, der unser instinktives Gefühl, daß Raum und Zeit etwas Grundverschiedenes seien, zugleich erklärt und rechtfertigt. Viele von den wichtigen Anwendungen der neuen Erkenntnisse auf praktische Probleme der Physik erfordern zu viel Fachkenntnisse, als daß wir sie hier besprechen könnten.

Eine der einfacheren Anwendungen ist die Bestimmung der Veränderungen, denen die physikalischen Eigenschaften eines Objektes bei schneller Bewegung unterworfen sind. Da sich diese Bewegung ebensogut als Bewegung von uns selbst relativ zu dem betrachteten Objekt wie umgekehrt auffassen läßt, so kann sie das absolute Verhalten des Gegenstandes nicht beeinflussen. Die scheinbaren Veränderungen von Länge, Masse, elektrischer und magnetischer Feldstärke, Schwingungszahl usw. lassen sich restlos auf die veränderte Rechnungsweise zurückführen, entstanden durch den Übergang von einem System, in welchem der Gegenstand in Ruhe ist, zu einem solchen, in dem sich der Beobachter in Ruhe befindet. Die Formeln für die veränderte Berechnung irgendeiner dieser Größen lassen sich leicht ableiten, nachdem die geometrische Beziehung zwischen den Bezugssystemen festgelegt ist.

DER ABLAUF DES WELTGESCHEHENS

Vom Mischen. Die moderne physikalische Weltbetrachtung wird nicht ausschließlich von Anschauungen gebildet, die erst in den letzten dreißig Jahren entstanden sind, und so müssen wir uns jetzt mit einem Vorstellungskomplex beschäftigen, der weit in das vorige Jahrhundert zurückreicht und seit den Tagen von Boltzmann keine wesentliche Veränderung erfahren hat. Trotzdem zeigt sich gerade gegenwärtig die große Wirkungskraft und Tragweite dieser Gruppe von Ideen. Für uns ist die Erörterung derselben an dieser Stelle von großer Wichtigkeit, da diese Vorstellungen in enger Beziehung zu den tieferen Zusammenhängen in unseren Untersuchungen über das Problem der Zeit stehen. Auch sind sie für die theoretische Physik von so fundamentaler Bedeutung, daß wir früher oder später im Laufe dieser Betrachtungen genötigt sein würden, uns mit ihnen auseinanderzusetzen.

Wenn Sie ein Spiel Karten nehmen, wie es aus der Fabrik kommt, und einige Minuten lang mischen, so verschwindet jede Spur der ursprünglichen systematischen Ordnung. Die Ordnung kehrt auch niemals zurück, und wenn Sie noch so lange mischen. Irgend etwas hat stattgefunden, das nicht rückgängig gemacht werden kann, nämlich es ist „Zufälligkeit“ an die Stelle von Ordnung getreten, oder wie wir sagen wollen, es ist ein „Zufall-Element“ eingeführt. Ein Vergleich kann lehrreich sein, auch wenn er hinkt. Ich bin daher über zwei Punkte leicht hinweggegangen, die man als Einwand mehr gegen das Kartenbeispiel als gegen die beabsichtigte Nutzenanwendung vorbringen kann. Es entspricht kaum der Wahrheit, wenn ich gesagt habe, daß das Mischen der Karten nicht wieder rückgängig gemacht werden kann. Jederzeit können Sie die Karten aussortieren und ihre ursprüngliche Anordnung wieder herstellen. Wenn wir aber das Mischen betrachten, welches bei physikalischen Vorgängen in Betracht kommt, so haben wir nicht mit einem solchen *d e u s e x m a c h i n a* zu rechnen, wie Sie ihn darstellen. Ich be-

sitze nicht das nötige Rüstzeug, um etwas darüber auszusagen, inwieweit der menschliche Geist in die Schlußfolgerungen mit einbegriffen ist, zu denen wir im Laufe dieser Untersuchungen gelangen werden. Drum schließe ich „S i e“ aus, zum mindesten schließe ich diejenige Fähigkeit Ihres Geistes aus, mit deren Hilfe Sie die Karten ordnen. Ich lasse zu, daß Sie die Karten mischen, denn das können Sie tun, ohne Ihren Geist zu gebrauchen.

Ferner entspricht es nicht ganz der Wahrheit, wenn ich gesagt habe, daß die ursprüngliche Ordnung niemals zurückkehrt. Es besteht der Schatten einer Möglichkeit, daß ein Kartenspiel bei gründlichem Mischen doch einmal in seine ursprüngliche Reihenfolge zurückgerät. Das liegt aber daran, daß nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Karten im Spiel ist. Bei unseren Anwendungen auf das Gebiet der Physik ist die Anzahl der zu mischenden Einheiten so ungeheuer groß, daß derartige Möglichkeiten außer Betracht bleiben können.

Wir wollen unsere Behauptung nun folgendermaßen formulieren:

Wann immer etwas geschieht, das nicht wieder ungeschehen gemacht werden kann, ist es auf die Einführung eines Zufall-Elementes zurückzuführen, von der Art, wie es beim Mischen eingeführt wird.

Mischen ist das einzige Ereignis, das die Natur nicht wieder rückgängig machen kann.

Humpty-Dumpty fällt von der Mauer und:

„Mit all des Königs Mannen und allen seinen Pferden
Kann Humpty-Dumpty nicht wieder zusammengesetzt
werden“⁸.

Irgend etwas ist passiert, das nicht wieder ungeschehen gemacht werden kann. Der Sturz allein hätte wieder rückgängig gemacht werden können. Dazu brauchte man nicht alle Pferde und alle Mannen des Königs aufzubieten; eine auf der Erde ausgebreitete vollkommen elastische Matte hätte genügt. Am Ende seines Falles hatte Humpty-Dumpty gerade genügend kinetische Energie, um durch den Rückprall bis an seinen alten Platz auf der Mauer geschleudert zu werden. Da die Matte fehlte, trat ein nicht wieder gut zu machendes Ereignis ein, nämlich die Einführung eines Zufall-Elementes in Humpty-Dumpty.

Welchen Grund aber haben wir zu der Annahme, daß Mischen der einzige Vorgang ist, der nicht wieder ungeschehen gemacht werden kann?

Unaufhaltsam schreibt des Schicksals Finger,
Und wenn geschrieben ist die Zeile, fährt er fort.
Gebete nicht, noch all Dein heißes Mühen
Bewegen ihn, zu tilgen nur ein einzig Wort.

Wenn kein Mischen möglich ist, kommt dann des Schicksals Finger zum Stillstand? Die Physik beantwortet diese Frage ohne Zögern mit Ja. Um uns selber ein Urteil bilden zu können, müssen wir diejenigen Naturvorgänge untersuchen, bei denen eine Vermehrung des Zufall-Elementes nicht stattfinden kann. Diese zerfallen in zwei Gruppen. Erstlich können wir die Naturgesetze betrachten, welche das Verhalten einer einzigen Einheit bestimmen. Selbstverständlich kann bei diesen von Mischen nicht die Rede sein. Man kann nicht den Pikkönig aus einem Kartenspiel herausgreifen und ihn mit sich selber mischen. Zweitens können wir die Vorgänge in einer Menge von Einheiten untersuchen, die bereits so vollkommen gemischt ist, daß ein weiteres Anwachsen des Zufall-Elementes nicht mehr möglich ist. Wenn unsere Behauptung richtig ist, so muß alles, was unter einer dieser beiden Bedingungen vor sich geht, wieder ungeschehen gemacht werden können. Die Untersuchung der ersten Bedingung wollen wir sogleich vornehmen, die der zweiten müssen wir allerdings bis auf S. 81 verschieben.

Bei einem Körper, der als eine einzige Einheit aufgefaßt werden darf, kann tatsächlich jede Veränderung, die ihn betrifft, wieder rückgängig gemacht werden. Die Naturgesetze gestatten in diesem Falle den Ablauf des Geschehens ebenso in der einen wie in der anderen Richtung. Die Erde beschreibt ihre Bahn gemäß den allgemeinen Gesetzen der Bewegung und der Gravitation. Aber auch ein Umlauf in genau der entgegengesetzten Richtung würde mit diesen Gesetzen vereinbar sein. In eben demselben Kraftfelde könnte die Erde ihren Weg auch rückwärts beschreiben, doch wie sie ihn einstmals angetreten, muß sie ihn ewig weiter verfolgen. Es könnte hiergegen eingewendet werden, daß wir kein Recht hätten, den Vorgang des Einsetzens der Bewegung als einen unwesentlichen Teil des Problems zu behandeln, daß dieser vielleicht einen ebenso wichtigen Platz in dem großen Plane der Natur einnehmen könnte, wie die Gesetze, welche die

nachfolgende Bewegung regeln. In der Tat stellen Astronomen Theorien darüber auf, warum alle 8 Planeten in derselben Richtung ihre Bahn um die Sonne angetreten haben. Das ist aber ein Problem von 8 Planeten und nicht von einem einzelnen Körper, eine Untersuchung über das ganze Kartenspiel, nicht über eine einzelne Karte. Solange wir aber die Bewegung der Erde als Problem für sich betrachten, wird niemand auf die Idee kommen, in die Naturgesetze eine Klausel einzufügen, derzufolge die Bewegung der Erde nur in einer Richtung stattfinden dürfte, und nicht in der entgegengesetzten.

Ein ähnliche Umkehrbarkeit der Bewegung gibt es in elektrischen und magnetischen Kraftfeldern. Auch die Atomphysik liefert ein weiteres Beispiel für diese Möglichkeit. Die Quantengesetze lassen für jedes Atom die Emission bestimmter Lichtarten in bestimmten Mengen zu, ebenso aber die Absorption derselben Lichtarten in den gleichen Mengen und somit die Rückgängigmachung der Emission. Ich muß um Entschuldigung bitten wegen der Dürftigkeit der angeführten Beispiele, doch können viele Eigenschaften eines Körpers, wie z. B. seine Temperatur, nicht als Einkörperproblem behandelt werden, da dieselben auf seinem Aufbau aus einer großen Anzahl einzelner Atome beruhen.

Die gemeinsame Eigenschaft aller Gesetze, die das Verhalten eines Einzelindividuums regeln, tritt deutlicher hervor, sobald man die Zeit in die Betrachtung einbezieht. Das **G e s c h e h e n** eines Ereignisses besteht darin, daß eine gewisse Folge von Zuständen in der Richtung von der Vergangenheit in die Zukunft durchlaufen wird. Dieselbe Folge von Zuständen, in Richtung von der Zukunft in die Vergangenheit durchlaufen, bedeutet das **U n g e s c h e h e n** **m a c h e n** des Ereignisses, nur drehen wir dann die Folge um, und betrachten sie in gewohnter Weise in Richtung von der Vergangenheit in die Zukunft. Wenn also die Naturgesetze unabhängig davon sind, ob das Geschehen eines Ereignisses oder sein „Ungeschehenmachen“ das ist, was in Wirklichkeit stattfindet, so müssen sie unabhängig sein von der Richtung der Zeit aus der Vergangenheit in die Zukunft. Das ist der gemeinsame charakteristische Zug, den man sofort erkennt, wenn die Gesetze (wie es gewöhnlich der Fall ist) mathematisch gefaßt sind. Der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft ist dann nicht größer als der zwischen Links und Rechts. In der algebraischen Zeichensprache be-

deutet $-x$ links, $+x$ rechts, $-t$ Vergangenheit und $+t$ Zukunft. Dies gilt für alle Naturgesetze, welche das Verhalten eines Einzelindividuums bestimmen, d. h. für alle „Gesetze erster Art“, wie wir sie bezeichnen wollen. Es gibt nur ein einziges Naturgesetz, nämlich den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre, in welchem ein tiefer gehender Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft zum Ausdruck kommt, als der zwischen plus und minus. Dieses Gesetz steht abseits von allen übrigen. Es kann nicht auf das Verhalten eines einzelnen Individuums angewandt werden, sondern, wie wir später sehen werden, handelt es sich darin im wesentlichen um das Zufallselement in einer großen Menge.

Was auch immer aus den Gesetzen erster Art hervorgehen mag, für die gewöhnliche Erfahrung steht es jedenfalls außer Zweifel, daß der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft wesentlich anderer Art sein muß, als der zwischen links und rechts. In seiner Erzählung *The Plattner Story* schildert H. G. Wells einen Mann, der einen Abstecher in die vierte Dimension macht. Bei seiner Rückkehr sind links und rechts an ihm vertauscht. Doch bildet diese Vertauschung keineswegs den Hauptinhalt der Geschichte, sondern dient nur dazu, das Abenteuer in glaubwürdiger Weise auszugestalten. Für sich betrachtet ergeben sich nämlich aus einer derartigen Vertauschung so triviale Folgen, daß sie selbst Herrn Wells nicht hinreichenden Stoff zu einem Roman liefern können. Wenn aber in dem Manne bei seiner Rückkehr Vergangenheit und Zukunft miteinander vertauscht gewesen wären, so hätte sich dieser Zustand schon kräftiger bemerkbar gemacht. Herr Wells selber in *The Time Machine* und Lewis Carroll in *Sylvie and Bruno* lassen uns einen Blick tun in die Sonderbarkeiten, die passieren müßten, wenn die Zeit plötzlich rückwärts liefe, wie in einem rückwärts gedrehten Film. Wenn der Raum „gespiegelt“ wird, so behält die Welt ihren Sinn. „Gespiegelte Zeit“ wäre ihrem innersten Wesen nach absurd, so daß sich das Weltdrama in eine sinnlose Posse verwandeln würde. Trotzdem geht aus sämtlichen Gesetzen erster Art eindeutig hervor, daß sie vollkommen unabhängig davon sind, in welcher Richtung wir den Ablauf der Zeit rechnen. Sie werden dadurch nicht mehr beeinflußt, als wenn wir die Welt einmal von rechts und einmal von links betrachten. Dies gilt für die Gesetze der klassischen Physik, es gilt für die Gesetze der Relativitätstheorie und sogar für die Quantengesetze.

Auch handelt es sich dabei um keine zufällige Eigenschaft, vielmehr ist die Umkehrbarkeit wesentlich für das gesamte begriffliche Schema, dem diese Gesetze eingeordnet sind. Die Frage, ob die Welt „Sinn-erfüllt“ ist oder nicht, liegt außerhalb ihres Geltungsbereiches. Um die Welt mit Sinn zu erfüllen, müssen wir uns an das einzige nicht diesem Schema zugehörige Gesetz wenden: an den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre. Mit diesem eröffnet sich uns ein neues Erkenntnisgebiet, nämlich die Erforschung dessen, was ich vorläufig ohne nähere Erklärung mit „Organisation“ bezeichnen möchte. In Verbindung mit Organisation erscheint zum ersten Male dem Strome der Zeit eine Richtung eingeprägt, zeigt sich zum ersten Male ein Unterschied zwischen „Geschehen“ und „Ungeschehenmachen“.

Der Pfeil der Zeit. Es ist das Wesen der Zeit, daß sie abläuft. Und doch scheint der Physiker manchmal geneigt, diese Tatsache außer acht zu lassen. In der vierdimensionalen Welt, die wir im vorigen Kapitel betrachtet haben, liegen die vergangenen und zukünftigen Ereignisse vor uns ausgebreitet wie auf einer Landkarte. Zwar sind die Geschehnisse in ihren richtigen räumlichen und zeitlichen Beziehungen eingezeichnet, aber nirgends ist von dem Vorgang des Geschehens die Rede. Die Frage nach der Richtung des Geschehens tritt gar nicht auf. Wir sehen auf der Karte den Weg, der aus der Vergangenheit in die Zukunft, oder auch aus der Zukunft in die Vergangenheit führt, aber es ist kein Schild angebracht, das ihn als Einbahnstraße erkennen ließe. Etwas muß noch den geometrischen Vorstellungen, deren Inbegriff die Minkowskische Welt ist, hinzugefügt werden, bevor ein vollständiges Abbild der Welt entsteht, so wie wir sie kennen. Wir könnten an das Bewußtsein appellieren, um das Ganze zu beleben — Bestehen in Geschehen, Sein in Werden zu wandeln. Zunächst jedoch wollen wir feststellen, daß das Minkowskische Weltbild vollkommen geeignet ist, das Wirken der Gesetze erster Art zu veranschaulichen, die ja, wie wir gesehen haben, unabhängig von der Richtung der Zeit sind. Man hat der Relativitätstheorie oft zum Vorwurf gemacht, daß ihr vierdimensionales Weltbild der Richtungseigenschaft der Zeit keinerlei Rechnung trägt. Als Einwand dürfte das jedoch kaum gelten können, denn in dieser Beziehung ist die neue Theorie weder besser noch schlechter als ihre Vorgänger. Der klassische Physiker hat

sich niemals gescheut, ein System von Gesetzen anzuwenden, in welchem nirgends die Richtung der Zeit zum Ausdruck kommt, aber jetzt ist er plötzlich empört, weil das neue Weltbild diesen Mangel so unverhüllt erkennen läßt.

Es ist nun trotzdem auch ohne mystische Mitwirkung des Bewußtseins möglich, eine Zeitrichtung auf unserer vierdimensionalen Karte zu entdecken, nämlich durch Erforschung dessen, was ich oben mit dem Schlagworte Organisation bezeichnet habe. Lassen Sie uns in unser Bild willkürlich einen Pfeil einzeichnen. Können wir entlang seiner Richtung ein ständiges Anwachsen des Zufall-Elementes in dem Zustande der Welt feststellen, so weist der Pfeil in die Zukunft, nimmt das Zufall-Element jedoch ab, so weist er in die Vergangenheit. Vom Standpunkt der Physik aus ist dies die einzige Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Vergangenheit und Zukunft. Sie folgt unmittelbar aus der Bejahung unserer Behauptung, daß die Einführung des Zufälligen der einzige Vorgang sei, der nicht wieder rückgängig gemacht werden kann.

Ich werde im folgenden die Bezeichnung „Zeitpfeil“ anwenden, um die Richtungseigenschaft der Zeit zu kennzeichnen, eine auch philosophisch besonders interessante Eigenschaft, zu der der Raum kein Analogon aufzuweisen hat. Wir merken uns darüber folgendes:

1. Die Richtungseigenschaft der Zeit wird von unserem Bewußtsein unmittelbar empfunden.

2. Ebenso beruht sie auf der Einsicht unserer Vernunft, daß eine Umkehr des Zeitpfeiles die Außenwelt ihres Sinnes berauben würde.

3. Sie tritt nirgends in der Physik in die Erscheinung, außer bei der Betrachtung der Organisation einer Anzahl von Individuen. Hierbei weist der Zeitpfeil in die Richtung der fortschreitenden Zunahme des Zufall-Elementes.

Wir wollen nun näher untersuchen, auf welche Weise das Anwachsen des Zufall-Elementes etwas Unwiderrufliches in die Welt bringt. Wenn ein Stein fällt, erwirbt er gerade so viel kinetische Energie, wie nötig ist, um ihn wieder auf seine ursprüngliche Höhe zurückzuheben. In der Tat kann man durch geeignete Maßnahmen erreichen, daß die kinetische Energie auch wirklich diese Arbeit ausführt. Ist z. B. der Stein an einer Spiralfeder befestigt, so kann er wie ein Pendel abwechselnd fallen und steigen. Wenn jedoch der Stein auf ein Hindernis auftrifft, so wird seine kinetische

Energie in Wärmeenergie verwandelt. Es ist noch dieselbe Energiemenge vorhanden, aber selbst wenn wir sie sammeln und einer Wärmekraftmaschine zuführen könnten, würde es nicht gelingen, damit allein den Stein auf seine ursprüngliche Höhe zurückzuheben. Was ist geschehen, daß wir uns die Energie nicht mehr voll dienstbar machen können?

Vom mikroskopischen Standpunkt betrachtet ist der fallende Stein nichts anderes als eine ungeheure Menge von Molekülen, die sich alle mit der gleichen Geschwindigkeit parallel nach unten bewegen und somit eine organisierte Bewegung ausführen wie ein Regiment beim Marsch. Unser Augenmerk muß auf zwei Dinge gerichtet sein: auf die **E n e r g i e** und auf die **O r g a n i s a t i o n** d e r **E n e r g i e**. Um zu seiner ursprünglichen Höhe zurückkehren zu können, muß der Stein beides bewahren.

Wenn der Stein auf eine genügend elastische Unterlage fällt, kann die Bewegung umgekehrt werden, ohne die Organisation zu zerstören. Jedes Molekül macht kehrt und die ganze Armee marschiert in guter Ordnung zum Ausgangspunkt zurück:

Der Herzog von York, ein jeder ihn kennt,
Führt den Hügel hinauf im Trab
In Reih und Glied das Regiment,
Und führt es auch wieder hinab.

Eine sehr ordentliche Leistung, nur macht man auf diese Weise nicht Geschichte! — Gewöhnlich verläuft der Vorgang bei einem Aufprall so, daß die Moleküle mehr oder weniger zufällige Zusammenstöße erleiden und nach allen Richtungen zurückgeworfen werden. Sie rücken dann nicht mehr in einer Richtung gemeinsam vor, sie haben ihre Organisation eingebüßt. Sie stoßen auch immerfort wieder gegeneinander und ändern ihre Bewegungsrichtung ständig. Niemals aber finden sie wieder einen gemeinsamen Zweck. Organisation kann nicht durch fortgesetztes Mischen herbeigeführt werden. Obgleich also die Energie ihrer Menge nach ausreichen würde (abgesehen von unvermeidlichen Verlusten, die wir ersetzt denken wollen), kann sie den Stein doch nicht wieder in die Höhe heben. Wenn wir ihn wirklich in seine ursprüngliche Lage bringen wollen, müssen wir fremde Energie zuführen, die den erforderlichen Betrag an Organisation enthält.

Dies führt uns zu einem weiteren Punkt, in dem unser Vergleich mit dem Spiel Karten hinkt. Niemand (außer

einem Zauberünstler) kann zwei halb gemischte Kartenspiele in einen Hut hineinwerfen und dann das eine Spiel in seiner ursprünglichen Ordnung, das andere aber vollkommen gemischt wieder herausziehen. Wir aber können etwas tun, was diesem Kunststück analog ist: Wir führen einer Dampfmaschine Energie zu, die nur teilweise Organisation besitzt, und entnehmen dann einen Teil als vollkommen organisierte Energie der Bewegung fester Körper, den andern Teil als Wärmeenergie in einem Zustande noch größerer Desorganisation. Man kann gleichsam mit der Organisation einer Energie Handel treiben, und ebenso mit der Desorganisation oder dem Zufall-Element. Desorganisation bleibt nicht dauernd an dem speziellen Energievorrat haften, den sie zuerst betraf, sondern kann auf eine andere Energie übergehen. Es würde uns hier zu weit führen, wollten wir näher untersuchen, inwiefern ein Unterschied bestehen könnte zwischen dem Mischen von materiellen Dingen und dem Mischen von Energiemengen. Jedenfalls wird eine gewisse Vorsicht bei Anwendung dieser Analogie geboten sein. Was die Wärmeenergie betrifft, so haben wir in der Temperatur ein Maß für den Grad ihrer Organisation: je niedriger die Temperatur, desto größer die Desorganisation.

Häufung von Zufällen. Es gibt so etwas wie ein Zusammentreffen von Zufällen, was so viel bedeuten soll, als daß der Zufall täuschen kann, indem er manchmal Zustände hervorbringt, die gar nicht wie Zufall aussehen. Insbesondere kann der Zufall gewissermaßen Organisation nachahmen, während wir doch Organisation gerade als Gegensatz des Zufälligen, oder, wie wir es genannt haben, des „Zufall-Elementes“ eingeführt haben. Indessen braucht man diese Gefahr nicht sehr ernst zu nehmen, denn die große Zahl verbürgt uns Sicherheit.

Ein Gefäß sei durch eine Zwischenwand in zwei Hälften geteilt, deren eine Luft enthält, während die andere luftleer ist. Nun entfernen Sie plötzlich die Zwischenwand. In diesem Augenblick befinden sich noch alle Luftmoleküle in der einen Hälfte des Gefäßes, und den Bruchteil einer Sekunde später sind sie bereits über das ganze Gefäß verteilt und bleiben es für alle Zeit. Die Moleküle werden nicht in die eine Gefäßhälfte zurückkehren, ihre Ausbreitung kann nicht wieder ungeschehen gemacht werden, es sei denn, daß etwas Neues eingeführt und gleichsam zum Sündenbock für

die Desorganisation gemacht wird, der das Zufall-Element in sich aufnimmt und anderswohin trägt. Der geschilderte Vorgang kann als Kriterium angesehen werden, um Vergangenheit und Zukunft voneinander zu unterscheiden. Wenn Sie etwa beobachten, daß die Moleküle im ersten Augenblick durch das ganze Gefäß gleichmäßig verteilt sind und im (wie Sie glauben) nächsten Augenblick sich nur in einer Hälfte befinden, dann läuft Ihr Bewußtsein rückwärts und Sie sollten einen Arzt konsultieren.

Jedes Molekül wandert in dem Gefäß herum, ohne einen Teil desselben mehr zu bevorzugen als den andern. Im Mittel verbringt es die Hälfte seiner Zeit in der einen Abteilung und die andere Hälfte in der zweiten. Es gibt freilich eine ganz ganz schwache Möglichkeit, daß auf diese Weise zufällig in einem Augenblick sämtliche Moleküle in der einen Hälfte des Gefäßes beisammen sind. Wenn n die Anzahl der Moleküle in dem ganzen Gefäß ist (sagen wir rund eine Quadrillion), so ist die mathematische Wahrscheinlichkeit, daß ein solcher Zustand vorhanden ist, $= (\frac{1}{2})^n$. Warum diese Möglichkeit vernachlässigt werden kann, erhellt vielleicht am besten aus folgendem fast klassischen Beispiel: Wenn ich meine Finger wahllos über die Tasten einer Schreibmaschine gleiten lasse, mag es geschehen, daß mein Schreibsel zufällig einen vernünftigen Satz ergibt. Wenn nun eine Herde Affen auf Schreibmaschinen herumhämmer, so ist es möglich, daß sie auf diese Weise sämtliche Bücher des Britischen Museums noch einmal schreibt. Die Wahrscheinlichkeit, daß dies geschieht, ist immer noch entschieden größer als diejenige, daß alle Moleküle gleichzeitig in der einen Hälfte des Gefäßes sein werden.

Sobald es sich um ganz große Zahlen handelt, ist Wahrscheinlichkeit der beste Bürge für Gewißheit. Glücklicherweise haben wir es bei der Betrachtung von Molekülen und Energie oder Strahlung im allgemeinen mit einer so unermeßlichen Menge zu tun, daß wir mit einer Gewißheit rechnen können, wie sie sonst durchaus nicht den Jüngern der wankelmütigen Göttin des Zufalls zuteil wird.

Eigentlich könnte man mit Recht behaupten, die Wahrscheinlichkeit, daß alle Moleküle sich gleichzeitig in einer Hälfte des Gefäßes befinden, ist so lächerlich gering, daß es gar keinen Sinn hat, darüber nachzudenken. Und doch beschäftigt sich die Wissenschaft sogar sehr viel mit ihr, denn sie gibt uns ein Maß an die Hand für die Größe des nicht

wieder gutzumachenden Unheils, das wir durch das Entfernen der Zwischenwand angerichtet haben. Auch wenn wir aus irgendeinem Grunde das Gas gleichmäßig in dem Gefäß verteilen wollten, so wäre es ja nicht nötig gewesen, die vorhandene Ordnung einfach zu vergeuden, denn, wie gesagt, Organisation ist übertragbar und hätte irgendwo anders von Nutzen sein können*. Als sich das Gas auszubreiten begann, sagen wir von links nach rechts, fand nicht unmittelbar ein Anwachsen des Zufall-Elementes statt, denn anfänglich mußte eine von links nach rechts gerichtete Geschwindigkeit der Moleküle überwiegen; die Bewegung war also teilweise geordnet. Organisation der Lage war durch Organisation der Bewegung ersetzt worden. Aber schon im nächsten Augenblick trafen die Moleküle auf die gegenüberliegende Gefäßwand auf, und das Anwachsen des Zufall-Elementes setzte ein. Vorher war jedoch die in der links-rechts gerichteten Molekülbewegung enthaltene Organisation das exakte numerische Äquivalent für die verlorengegangene Organisation im Raume. Damit soll gesagt sein, daß die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein des gewöhnlichen Zustandes des Gases im Vergleich zu der, daß die Geschwindigkeitsrichtung von links nach rechts durch Zufall überwiegt, ebenso groß ist wie die Wahrscheinlichkeit des gewöhnlichen Zustandes im Vergleich zu der, daß die Moleküle durch Zufall sich in der einen Gefäßhälfte angehäuft haben.

Die hier gemeinte entgegenstehende relative Wahrscheinlichkeit ist eine so enorm große Zahl, daß sie in der gewöhnlichen Schreibweise unseres Dezimalsystems alle Bücher der Welt mehrfach ausfüllen würde. Was uns an ihr interessiert, ist auch nicht die praktische Möglichkeit, die durch sie dargestellt wird, sondern nur das Faktum, daß sie eine genau bestimmte Größe hat. Dadurch wird nämlich mit einem Schlage der Begriff „Organisation“ von einem unbestimmten beschreibenden Hilfswort in die Reihe der meßbaren Größen exakter Wissenschaft erhoben. Organisation tritt uns in verschiedenen Arten entgegen. Der gleichmäßige Marsch eines Regiments ist nicht die einzige Form organisierter Bewegung. Beim Gruppentanz können wir sie in einer

* Wenn das Gas bei seiner Ausdehnung dazu benutzt worden wäre, eine Kolbenstange zu bewegen, so wäre die Organisation in die Bewegung des Kolbens übergegangen.

Form sehen, die den Schallwellen vergleichbar ist. Wir sind nunmehr im Besitze eines gemeinsamen Maßes für alle diese Formen von Organisation. Jeder Verlust an Organisation wird in richtiger Weise durch die relative Wahrscheinlichkeit gemessen, die ihrer Wiedergewinnung durch Häufung von Zufällen entgegensteht. Es wäre absurd, hier von Wahrscheinlichkeit zu reden, wollten wir sie als praktische Möglichkeit betrachten, doch liefert sie trotzdem ein präzises Maß.

Das praktische Maß für das Zufallselement im Universum, das immer nur zunehmen, niemals aber abnehmen kann, heißt *Entropie*. Es kommt auf dasselbe heraus, ob man durch die Entropie mißt oder durch die relative Wahrscheinlichkeit, von der wir oben gesprochen haben, nur werden bei der Entropie die unhandlich großen Zahlen nach einer einfachen Formel auf eine bequemere Maßskala transformiert. Die Entropie wächst unaufhörlich. In einem abgeschlossenen Teil der Welt kann zwar unter idealen Bedingungen diese Zunahme zum Stillstand gebracht werden, niemals aber können wir eine Abnahme bewirken. Eine solche würde etwas viel Schlimmeres in sich schließen als einen Verstoß gegen ein gewöhnliches Naturgesetz, nämlich das Eintreten eines vollkommen unwahrscheinlichen Zusammentreffens von Zufälligkeiten. Ich glaube, daß dem Gesetz von dem ständigen Wachsen der Entropie — dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik — die erste Stelle unter den Naturgesetzen gebührt. Wenn jemand Sie darauf hinweist, daß die von Ihnen bevorzugte Theorie des Universums den Maxwell'schen Gleichungen widerspricht, — nun, können Sie sagen, um so schlimmer für die Maxwell'schen Gleichungen. Wenn es sich herausstellt, daß sie mit der Beobachtung unvereinbar ist, — gut, auch Experimentalphysiker pfuschen manchmal. Aber wenn Ihre Theorie gegen den zweiten Hauptsatz verstößt, dann ist alle Hoffnung vergebens. Dann bleibt ihr nichts mehr übrig, als in tiefster Demut in der Versenkung zu verschwinden. Diese Auszeichnung des zweiten Hauptsatzes ist durchaus berechtigt. Freilich gibt es auch andere Gesetze, an deren Geltung zu glauben so wohlbegründet ist, daß eine Hypothese, die sie verletzt, äußerst unwahrscheinlich erscheint. Doch diese Art der Unwahrscheinlichkeit ist nur ein verschwommener Begriff und stellt uns nicht einem lähmenden Aufmarsch von Ziffern gegenüber. Hingegen die Wahrscheinlichkeit, die gegen eine Verletzung des zweiten

Hauptsatzes (d. h. gegen eine Abnahme des Zufall-Elementes) spricht, kann in überwältigenden Zahlen genau ausgedrückt werden.

Ich wünschte, ich könnte Ihnen eine Vorstellung von der erstaunlichen Tragweite des Entropiebegriffes vermitteln. Die Eigenschaft der Entropie, nur einer Zunahme, niemals aber einer Abnahme fähig zu sein, führte zu exakten Methoden, dieselbe zu messen. Zahllose Schlüsse wurden aus diesem einfachen Gesetze gezogen. Mit gleichem Erfolge hat man es auf die tiefsten Probleme der theoretischen Physik und auf die praktischen Aufgaben des Ingenieurs angewandt. Der charakteristische Zug des Entropiegesetzes ist, daß die aus ihm gewonnenen Schlußfolgerungen völlig unabhängig von der Natur der molekularen Vorgänge sind, die der untersuchten Erscheinung zugrunde liegen. Das Entropiegesetz kümmert sich um das Einzelteilchen nur, insofern es Bestandteil einer Menge ist. Es ist daher möglich, diese Methode auf Forschungsgebiete anzuwenden, bei denen es uns nur gerade erst gelungen ist, ein Zipfelchen des verhüllenden Schleiers zu lüften. So zögern wir nicht, sie bei Problemen der Quantentheorie zu benutzen, obgleich der Mechanismus des einzelnen Quantenprozesses uns noch vollkommen dunkel und rätselhaft ist.

Gesetze erster und zweiter Art. Ich habe die Gesetze, die das Verhalten eines einzelnen Körpers regeln, „Gesetze erster Art“ genannt, und damit implizite behauptet, daß der zweite Hauptsatz der Wärmelehre, obgleich er ebenfalls ein anerkanntes Naturgesetz ist, doch in gewissem Sinne den ersteren nicht gleichgeordnet werden kann und als Gesetz zweiter Art bezeichnet werden muß. Wir sind jetzt in der Lage, den inneren Grund dieser Unterscheidung aufzuzeigen. Die Gesetze erster Art verbieten gewisse Dinge, deren Geschehen unmöglich ist. Die Gesetze zweiter Art verbieten Dinge, deren Geschehen zu unwahrscheinlich ist, als daß sie jemals wirklich eintreten könnten. Es ist die Überzeugung fast aller Physiker* gewesen, daß der letzten Wurzel alles Geschehens ein lückenloses System von Gesetzen erster Art zugrunde liegt, welches das Verhalten jedes einzelnen kleinsten Teilchens oder Bausteines der Welt mit

* Seit einiger Zeit stellen dies jedoch manche Physiker, wie auch ich selbst, in Frage.

ehernem Determinismus regiert. Dieses System ist vollkommen ausreichend, denn es bestimmt die Geschichte jedes Bausteinchens der Welt und somit die Weltgeschichte selbst.

Trotz ihrer Vollständigkeit beantworten die Gesetze erster Art doch nicht jede Frage über das physikalische Verhalten der Dinge, die sich vernünftigerweise stellen läßt. Kann die Welt rückwärts gehen, d. h. ist ein Universum möglich, in dem der Ablauf des Weltgeschehens in der entgegengesetzten Richtung erfolgt, wie in unserer Welt? Die Gesetze erster Art, die von der Richtung der Zeit unabhängig sind, antworten: „Ja, es ist nicht unmöglich“. Die Gesetze zweiter Art hingegen sagen: „Nein, es ist zu unwahrscheinlich“. Diese beiden Antworten stehen zueinander nicht in einem wirklichen Widerspruch, doch trifft die erste, obschon sie wahr ist, nicht den springenden Punkt. Dies Verhalten ist typisch auch für die Beantwortung mancher ganz alltäglicher Fragen: Wenn ich diesen Topf mit Wasser auf dieses Feuer stelle, wird das Wasser sieden? Hierauf kann das Gesetz erster Art nur dann eine abschließende Antwort erteilen, wenn man ihm die Möglichkeit dazu gibt, d. h. wenn man das Wort „dieser“ mathematisch genau bestimmt dadurch, daß man Lage, Bewegung usw. von einigen Quadrillionen Teilchen und Energieelementen angibt. Wir werden also in Wirklichkeit gar nicht Antwort auf die Frage erhalten, die wir gestellt haben, sondern auf folgende: Wenn ein Topf mit Wasser, welcher diesem hier in den Hauptpunkten ähnlich ist, auf ein Feuer gestellt wird, wird dann das Wasser sieden? Das Gesetz erster Art antwortet hierauf: „Es kann sieden, es kann gefrieren, es kann vielerlei tun. Die Angaben, die Sie gemacht haben, sind viel zu ungenau, als daß irgendein Resultat als unmöglich ausgeschlossen werden könnte“. Das Gesetz zweiter Art jedoch antwortet einfach: „Es wird sieden, denn alles andere ist zu unwahrscheinlich“. Das Gesetz zweiter Art steht nicht im Widerspruch zu den Gesetzen erster Art, auch können wir es nicht als wesentliche Ergänzung dieser Gesetze ansehen, die ja bereits ein vollständig ausreichendes System bilden. Das Gesetz zweiter Art entspringt vielmehr einer anderen, man möchte sagen praktischeren Auffassung von dem Zweck unseres Strebens nach Entschleierung der Geheimnisse der Natur.

Die Frage, ob der zweite Hauptsatz der Thermodynamik und andere statistische Gesetze mathematische Ableitungen

aus den Gesetzen erster Art sind, welche deren Resultate in handlicher Form zusammenfassen, ist schwer zu beantworten. Der allgemeinen Ansicht nach klafft zwischen beiden eine unüberbrückbare Kluft. Allen Fragen, die durch Gesetze zweiter Art entschieden werden, liegt eine schwer in bestimmte Worte zu fassende Vorstellung zugrunde, daß die verschiedenen Zustände der Welt gewissermaßen „eine Wahrscheinlichkeit a priori“ besitzen. Dieses bedeutet eine Stellungnahme zu jeder möglichen Erkenntnis, die wesentlich verschieden ist von den Voraussetzungen, die zum Aufbau des Systems der Gesetze erster Art geführt haben.

Thermodynamisches Gleichgewicht. Mit dem Fortschreiten der Zeit wächst das „Zufall-Element“ im Universum mehr und mehr an. Jedes Morgen bringt eine neue Vermehrung des Zufälligen in der physikalischen Welt gegenüber dem Heute. Es ist sehr merkwürdig, daß wir gerade in jenem nüchternen Zweige der Physik, dessen Entwicklung ursprünglich auf die Bedürfnisse der Technik zurückzuführen ist, eine teleologische Ausdrucksweise kaum vermeiden können. Wir können nicht in Abrede stellen, daß die Welt beides enthält: Zufall und Plan, oder wenigstens Zufall und das Gegenteil von Zufall. Dies Gegenteil wird durch unsere Methode der Entropiemessung nachdrücklich hervorgehoben. Wir schreiben der Organisation, wie wir es nannten, ein Maß zu, das sozusagen der Stärke unseres Zweifels an ihrer zufälligen Entstehung proportional ist. „Ein vom Zufall gelenktes Zufallsgebilde von Atomen“ — dieses Schreckgespenst der Theologen — erweist sich in der Physik als eine harmlose, aber sehr geschätzte Seltenheit, deren Eigenschaften deutlich bestimmt sind und ungleich denen, die man gewöhnlich in der physikalischen Welt findet. In der wissenschaftlichen Sprache bezeichnet man ein solches Gebilde als ein System in „thermodynamischem Gleichgewicht“.

Im thermodynamischen Gleichgewicht haben wir den zweiten Fall vor uns (siehe S. 69), bei dem ein weiteres Anwachsen des „Zufall-Elementes“ nicht möglich ist, nämlich den Zustand einer Menge von Einheiten, die bereits vollkommen gemischt sind. Um den Zustand thermodynamischen Gleichgewichtes untersuchen zu können, müssen

wir einen Bezirk des Universums von seiner Umgebung abtrennen und es so einrichten, daß Energie weder ein- noch austreten kann, oder daß wenigstens alle Grenzwirkungen genau kompensiert sind. Diese Bedingungen sind zwar nur im Idealfall restlos erfüllt, können aber doch mit so großer Annäherung verwirklicht werden, daß das ideale Problem dem praktischen Experiment zugrunde gelegt werden kann. Das tiefe Innere eines Sternes ist ein fast vollkommenes Beispiel thermodynamischen Gleichgewichtes. Bei dieser so gut wie vollständigen Abgeschlossenheit wird die Energie zwischen Materie und „Äther“ gleichsam hin und her geworfen, und nach kurzer Zeit wird die Mischung vollkommen sein.

Daß sich überhaupt eine vollständige Durchmischung der Energie erreichen läßt, ist für unser Problem von besonderer Bedeutung. Wenn Sie nämlich jede Karte Ihres vollkommen gemischten Kartenspiels in zwei Teile reißen, läßt sich die Durchmischung noch weiter treiben. Zerteilt man die Karten immer wieder und wieder, so entsteht jedesmal neuer Spielraum für ein Anwachsen des Zufall-Elementes, so daß bei unbegrenzter Teilbarkeit niemals eine vollständige Durchmischung erreicht werden kann. Die experimentelle Tatsache, daß ein endgültiger Gleichgewichtszustand sehr schnell erreicht wird, kann also als Beweis dafür angesehen werden, daß Energie nicht unbegrenzt teilbar ist, zum mindesten aber als Beweis dafür, daß Energie bei dem natürlichen Vorgang des Mischens nicht unbegrenzt unterteilt wird. Tatsächlich hat die Quantentheorie von dieser experimentellen Tatsache ihren Ausgang genommen. Wir werden in einem späteren Kapitel darauf zurückkommen.

In einem Gebiet des Weltraumes, in dem die Bedingung thermodynamischen Gleichgewichtes erfüllt ist, läßt sich ein „Zeitpfeil“ nicht entdecken. Seine Spitze sollte die Richtung anzeigen, in welcher das Zufall-Element wächst. Wenn dieses nun seinen Höchstwert erreicht hat und konstant geworden ist, wohin soll da der Pfeil weisen? Man darf darum nicht sagen, daß eine solche Gegend zeitlos wäre. Wie immer schwingen die Atome gleich kleinen Uhren und geben uns ein Maß für Geschwindigkeit und Dauer. Die Zeit ist geblieben und hat ihre gewöhnlichen Eigenschaften behalten, nur ihren „Pfeil“ hat sie verloren. Wie der Raum ist sie ausgedehnt, aber sie schreitet nicht fort.

Hier erhebt sich nun die wichtige Frage: Ist das Zufallselement (gemessen durch die Wahrscheinlichkeit des Zustandes) die einzige Eigenschaft der physikalischen Welt, die der Zeit einen Pfeil einprägt? Wir haben bereits festgestellt, daß aus dem Verhalten eines einzelnen Individuums kein Schluß auf eine Richtungseigenschaft der Zeit gezogen werden kann, aber bei einer großen Menge könnten ja außer der Entropie noch andere Eigenschaften hierfür in Betracht kommen. Um ein Beispiel zu nennen, das vielleicht nicht ganz so phantastisch ist, wie es klingt: Könnte nicht eine Gesamtheit von Teilchen mit Ablauf der Zeit immer schöner werden* (gemessen an einem irgendwie festzulegenden ästhetischen Maßstab)? Diese Frage findet ihre Antwort in einem weiteren wichtigen Naturgesetz:

Nichts in der Statistik einer Gesamtheit von Teilchen kann eine Richtung der Zeit erkennen lassen, sobald die Entropie in dieser Beziehung versagt.

Wenn dieses Gesetz auch erst seit wenigen Jahren erkannt ist, so steht meiner Ansicht nach seine Wahrheit doch außer Zweifel. In allen modernen Untersuchungen über Strahlung und Atomistik hat es seine fundamentale Bedeutung und seine Fruchtbarkeit erwiesen. Es ist natürlich ein Gesetz zweiter Art. Aus dem Entropiegesetz läßt es sich, wie es scheint, nicht streng herleiten, so daß es als ein zweites unabhängiges Gesetz dieser Gruppe aufgefaßt werden muß**.

Wir gelangen also zu dem Schluß, daß es wohl möglich sein kann, den Pfeil der Zeit aus anderen statistischen Eigen-

* Bei einem Kaleidoskop gelangt man bald zu einer Grenze im Mischen und alle weiteren Muster sind gleichwertig in bezug auf das Zufallselement, nicht aber in bezug auf ihre Schönheit.

** In der obigen Fassung ist dieses Gesetz vielleicht schwer wiederzuerkennen und ich muß daher für den physikalisch gebildeten Leser hinzufügen, daß es sich um das Prinzip der „Umkehrbarkeit molekularer Vorgänge“ handelt. Dieses Prinzip sagt aus, daß es zu jedem molekularen Prozeß auch den umgekehrten Prozeß gibt, und daß im Falle thermodynamischen Gleichgewichts beide Prozesse mit der gleichen Häufigkeit stattfinden. Es muß also jede statistische Zählung dieser Art Vorgänge unverändert bleiben, auch wenn man die Richtung der Zeit umkehrt, d. h. den direkten und inversen Prozeß miteinander vertauscht. Es kann somit kein statistisches Kriterium für die Richtung der Zeit im Falle thermodynamischen Gleichgewichts geben, d. h. wenn die Entropie konstant ist und den Pfeil der Zeit nicht mehr anzeigt.

schaften zu bestimmen, daß diese aber ebenfalls versagen, sobald das Verhalten der Entropie keine Entscheidung zuläßt, daß diese Eigenschaften also nicht als unabhängige Zeugen angesehen werden können. Vom Standpunkte der Physik aus ist der Zeitpfeil eine nur von der Entropie abhängende Eigenschaft.

Sind Raum und Zeit unendlich? Jeder von Ihnen wird sich sicher schon einmal mit der Frage abgequält haben: Hat der Raum ein Ende? Wenn der Raum sein Ende erreicht, was kommt dann hinter dem Raum? Aber auch die Vorstellung von Raum, nichts als Raum ohne Ende ist unfaßbar. So schwankt unsere Einbildungskraft zwischen zwei unfaßbaren Vorstellungen hin und her. Vor Einstein war die geltende Ansicht in der Physik, daß der Raum unendlich sei. Wohl kann sich niemand unendlichen Raum vorstellen, aber man mußte sich eben mit diesem unvorstellbaren Begriff abfinden. War er auch wenig zufriedenstellend, so war er doch wenigstens nicht unbedingt unlogisch. Die Relativitätstheorie zeigt einen Weg aus diesem Dilemma: Ist der Raum unendlich, oder ist er irgendwo zu Ende? „Keins von beiden“, lautet die Antwort. Der Raum ist endlich, aber er hat kein Ende, er ist „endlich und unbegrenzt“, wie man heute zu sagen pflegt.

Die Unendlichkeit des Raumes läßt sich in unserer Vorstellung nicht wirklich erfassen. Sich den Raum endlich, aber unbegrenzt vorzustellen, ist schwierig, doch nicht unmöglich. Ich erwarte nicht, daß Sie es können, aber wir wollen es wenigstens versuchen: Denken Sie sich einen Kreis, d. h. ich meine nicht den Kreis selbst, sondern die Linie, welche seine Begrenzung bildet. Dies ist eine endliche und unbegrenzte Linie. Nun stellen Sie sich eine Kugel vor, d. h. wieder nur ihre Oberfläche, so haben Sie eine endliche, aber unbegrenzte Fläche. Sie können auf der Erde noch so weit reisen, niemals werden Sie an ein Ende kommen. Immer wird noch ein Land hinter dem liegen, welches Sie bereits erreicht haben. Trotzdem gibt es nicht unendlich viele Länder. Nun wollen wir wieder um eine Dimension weiter gehen: Kreis, Kugel — das Nächste. Haben Sie's? Jetzt beginnt die wirkliche Schwierigkeit. Sie müssen die Schale dieser Hypersphäre recht fest in Ihrer Vorstellung behalten und sich nun das Innere wegdenken; so daß die Schale allein ohne Inneres existiert. Das ist der endliche und doch unbegrenzte Raum.

Nein; ich glaube doch nicht, daß Sie die Vorstellung voll gefaßt haben. Zu allerletzt ging es nicht mehr. Nicht das Hinzudenken einer weiteren Dimension war die wirkliche Schwierigkeit, dieselbe entstand erst, als Sie diese vierte Dimension wieder wegdenken sollten. Ich will Ihnen sagen, was Sie hemmt. In jedem Menschen lebt eine Anschauung des Raumes, die vor vielen Millionen Jahren entstanden sein muß und unverrückbar fest seinem Verstande eingegraben ist. Aber der Raum der Physik braucht nicht durch diese Schöpfung des erwachenden Verstandes unserer affenähnlichen Vorfahren ein für allemal festgelegt zu sein. Der Raum ist nicht notwendig gleich dieser Vorstellung. Er ist gleich — nun allem, was das Experiment über ihn ergibt. Die Eigenschaften des Raumes, die wir durch das Experiment entdecken, sind aber Ausdehnungen, d. h. Längen und Entfernungen. Der Raum ist somit gleich einem Netzwerk von Entfernungen. Entfernungen sind gewisse Verbindungsglieder, deren innere Natur uns unerforschlich bleibt. Wir leugnen diese Unerforschlichkeit nicht, wenn wir ihnen zur Unterscheidung Maßzahlen wie die Ziffern eines Codes zuordnen: 2 Meter, 5 Kilometer usw. Wir können nicht aus einer inneren Anschauung heraus die Gesetze vorhersagen, nach welchen die Code-Nummern auf die verschiedenen Glieder des Netzwerkes verteilt sind, ebensowenig wie wir die Verteilung der Code-Nummern für ein elektromagnetisches Kraftfeld voraussagen können. Beides zu bestimmen ist Aufgabe der experimentellen Forschung.

Wenn wir, immer in einer Richtung durch das Weltall fortschreitend, einen sehr weiten Weg bis zum Punkte A zurücklegen müssen und ebenfalls in der entgegengesetzten Richtung bis zum Punkte B, so soll angenommen werden, daß der Verbindung zwischen A und B nur eine kleine Code-Ziffer zugeordnet ist. Mit anderen Worten, es wird angenommen, daß diese beiden Punkte, welche durch sehr weite Reisen in entgegengesetzter Richtung erreicht werden, eine geringe Entfernung voneinander besitzen. Warum auch nicht? Geschieht doch etwas Ähnliches, wenn wir auf der Erde sehr weit östlich bzw. westlich fahren. Wohl steht diese Vorstellung nicht im Einklang mit unserer starren traditionellen Anschauung vom Raume, aber es gab ja auch eine Zeit, in der die Möglichkeit einer Erdumseglung in schroffem Widerspruch zu der traditionellen Anschauung von der Gestalt der Erde gestanden hat. Bei dem Versuch, uns eine

anschauliche Vorstellung von einem sphärischen Raume zu bilden, lag die Schwierigkeit darin, das Innere der Hyper-sphäre vollkommen aus unseren Gedanken zu verbannen und nur die Vorstellung ihrer dreidimensionalen Oberfläche bestehen zu lassen. Vielleicht wird die Schwierigkeit geringer, wenn wir den Raum als Netzwerk von Entfernungen auffassen. Dieses über die Oberfläche verteilte Netzwerk bildet ein sich selbst stützendes System von Verbindungen, welches ohne Bezugnahme auf außerhalb liegende Verbindungsglieder betrachtet werden kann. Das Gerüst, welches uns half, der Vorstellung eines solchen Netzwerkes von Verbindungsgliedern näher zu kommen, kann wieder zerstört werden, ohne die Vorstellung selbst zu gefährden.

Wir müssen uns klar machen, daß ein Verteilungs-schemata von nicht näher erforschbaren Beziehungen zwischen Punkten nicht einem bestimmten vorgefaßten Plane unterworfen zu sein braucht. Wenn wir das wirklich eingesehen haben, so wird uns nichts mehr hindern, das experimentell gefundene Schema anzuerkennen, wie immer es auch geartet sein mag.

Haben wir nun einen sphärischen Raum, so kennen wir doch noch nicht seinen Radius.

Im Vergleich mit gewöhnlichen Maßen muß er natürlich außerordentlich groß sein. Die Annahme, daß er nicht sehr viel größer als die weiteste Entfernung der uns bekannten Sternnebel sei, beruht auf zu unsicherer Grundlage. Aber die Grenzenlosigkeit des Raumes hat nichts mit seiner Größe zu tun. Nicht wegen seiner ungeheuren Ausdehnung ist der Raum ohne Grenzen, sondern wegen seiner in sich zurücklaufenden Gestalt. Das, was ist, ist eine Schale, schwimmend in der Unendlichkeit dessen, was nicht ist. Mit Hamlet sagen wir:

„Ich könnte, in eine Nußschale eingeschlossen, mich König des unendlichen Raumes dünken.“

Doch abermals erhebt sich die gespenstische Frage nach der Unendlichkeit, wenn wir die Zeit betrachten. Wohl schließt sich die Welt in ihren Raumdimensionen wie eine Kugel, aber in der Zeit-Dimension ist sie an beiden Enden offen. Wohl gibt es eine Krümmung des Raumes, welche Ost schließlich West werden läßt, aber keinerlei Krümmung wird das Vorher jemals zum Nachher wandeln.

Vielleicht bin ich hierin nicht ganz logisch, aber ich kann die Schwierigkeit einer unendlichen Zukunft nicht allzu schwer nehmen. Es wird ja die bedenkliche Situation, Anno Domini ∞ schreiben zu sollen, nicht eher eintreten, als bis wir A. D. ∞ erreicht haben. Und wahrscheinlich müssen wir, um A. D. ∞ zu erreichen, die Schwierigkeit erst überwunden haben. Auch muß man bedenken, daß gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik das ganze Universum den Zustand vollkommenen thermodynamischen Gleichgewichts bereits in einem Zeitpunkt erreicht haben wird, der jedenfalls nicht unendlich weit in der Zukunft liegt. Zugleich mit dem Pfeil der Zeit wird dann der ganze Begriff eines Fortschreitens in die Zukunft in sich zusammenfallen.

Die Schwierigkeit einer unendlichen Vergangenheit ist jedoch unüberwindlich. Nicht zu fassen ist der Gedanke, daß wir Erben einer unendlichen Zeit der Vorbereitung sein sollen, und ebenso unmöglich ist es, einen Augenblick zu denken, dem kein Augenblick voranging.

Die Frage nach dem Anfang der Zeit würde uns noch mehr beunruhigen, stände nicht eine andere unüberwindliche Schwierigkeit zwischen uns und der unendlichen Vergangenheit. Wir haben allerlei Betrachtungen über den Ablauf des Weltgeschehens angestellt. Wenn unsere Ansichten richtig sind, muß irgendwann zwischen dem Anfang der Zeiten und dem heutigen Tage die Weltenuhr zu laufen angefangen haben.

Je weiter wir in die Vergangenheit zurückgehen, desto mehr Organisation finden wir in der Welt. Falls sich uns nicht vorher eine Schranke entgegenstellt, müssen wir schließlich zu einem Zeitpunkt gelangen, in dem die gesamte Energie der Welt sich im Zustande vollkommener Organisation befand und ein Zufall-Element noch gar nicht vorhanden war. Es ist unmöglich, unter Beibehaltung des jetzt geltenden Systems der Naturgesetze weiter in die Vergangenheit zurückzugehen. Der Ausdruck „vollkommene Organisation“ ist jedoch nicht genügend fest umrissen, um diesen Zustand hinreichend zu charakterisieren. Die Organisation, um die es sich hier handelt, ist exakt definierbar und es gibt eine Grenze, an der sie vollständig wird. Es gibt aber nicht eine unendliche Reihe von Zuständen immer größerer und größerer Organisation; die obere Grenze ist auch nicht derart, daß sie schließlich immer langsamer und

langsamer erreicht wird. Denn wenn die Organisation vollständig ist, so ist sie darum nicht geschützter gegen einen Verlust, als wenn sie unvollständig ist.

Es unterliegt keinem Zweifel, daß das System der Physik, wie es seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts besteht, das Vorhandensein eines Zeitpunktes fordert, an dem entweder die Schöpfung der Welt in einem Zustande äußerst hoher Organisation stattgefunden hat, oder eine schon vorhandene Welt mit jener Organisation begabt worden ist, die sie seitdem unaufhörlich vergeudet. Da ferner Organisation offensichtlich das Gegenteil von Zufall ist, so ist es unmöglich, daß dieser Zustand vollkommener Organisation durch Zufall entstanden sein könnte.

Diese Tatsachen sind lange Zeit als Argument gegen den überhandnehmenden Materialismus benutzt worden. Sie wurden als wissenschaftlicher Beweis für das Eingreifen eines Schöpfers in einem nicht unendlich weit zurückliegenden Zeitpunkt angesehen. Ich möchte jedoch derartige übereilte Schlußfolgerungen nicht vertreten. Naturwissenschaftler sowohl wie Theologen müßten übereinstimmend die naive theologische Lehre, die gegenwärtig (in geeigneter Verkleidung) in jedem Lehrbuch der Thermodynamik gefunden werden kann, als gar zu kindlich zurückweisen, nämlich daß Gott vor einigen Billionen Jahren das Weltall einmalig in Bewegung gesetzt und seitdem dem Spiel des Zufalls überlassen habe. Man sollte diese Behauptung für das ansehen, was sie ist: für eine Arbeitshypothese der Thermodynamik, nicht aber für ein Glaubensbekenntnis. Sie gehört zu den Schlußfolgerungen, denen man auf Grund der Logik nicht ausweichen kann — nur leidet sie an dem Nachteil, daß man sie nicht zu glauben vermag. Es ist mir als Wissenschaftler einfach unmöglich, anzunehmen, daß die gegenwärtige Ordnung der Dinge mit einem plötzlichen Ruck entstanden sein soll; und als Mensch fühle ich einen ebenso großen inneren Widerstand gegen die Annahme, daß das göttliche Walten, nachdem es einmal eingesetzt hat, nicht dauernd fortbestehen soll. Doch kann ich auch keine bessere Lösung des Problems vorschlagen.

Wenn wir nun wieder zum anderen Ende der Zeit zurückkehren, so stoßen wir auf Vertreter einer Richtung, die weit den Gedanken zurückweist, daß die Welt sich allmählich abnutze, wie ein getragener Anzug. Die Anhänger dieser Richtung fühlen sich zu den verschiedenen

Theorien der Wiederverjüngung hingezogen und ihr Symbol ist der Vogel Phönix. Sterne erkalten und verlöschen. Wäre es nicht möglich, daß beim Zusammenstoß zweier erstorbener Himmelskörper die Energie des Stoßes diese Sterne wieder in feurigen Dampf verwandelt, aus dem eine neue Sonne mit neuen Planeten und neuem Leben geboren wird? Diese Theorie, die im vergangenen Jahrhundert allgemein vorgeherrscht hat, wird heute von keinem Astronomen mehr ernstlich in Betracht gezogen. Es gibt genügend Beweise, daß die jetzt vorhandenen Sterne aus einem einzigen gewaltigen Evolutionsprozeß hervorgegangen sein müssen, der durch die Urmaterie hindurchfegte und sie zu mächtigen Haufen zusammenballte. Die Sterne formten sich nicht einzeln ohne zeitlichen Zusammenhang infolge zufälliger Zusammenstöße. Trotzdem taucht der Phönixgedanke immer wieder auf. Wir nehmen an, daß die Materie nach und nach zerfällt, indem ihre Energie sich in Strahlung auflöst. Gibt es nun auch den umgekehrten Vorgang, daß Strahlung sich im Raume sammelt, Elektronen und Protonen erzeugt, und von neuem Sterne sich zu formen beginnen? Diese Überlegungen sind reine Spekulationen, und es läßt sich weder für noch gegen sie viel anführen. Trotzdem möchte ich den geistigen Standpunkt, der da w ü n s c h t , daß sie auf Wahrheit beruhen, einer gelinden Kritik unterwerfen. Mögen wir auch noch so sehr streben, im Kleinen einen Ausgleich für die Verschwendung der Natur zu suchen, so können wir doch nicht durch diese Theorien den unaufhaltsamen Ablauf der Welt zum Stillstand bringen, der in dem fortschreitenden Verlust an Organisation und dem Anwachsen des „Zufall-Elementes“ besteht. Selbst wenn eine Neubildung von Materie aus Strahlung möglich wäre, so könnte dies hieran nichts ändern. Wer immer den Wunsch nach unendlicher Fortdauer des Weltgeschehens hegt, muß einen Feldzug gegen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik unternehmen.

Zurzeit sehe ich jedoch nichts, was einem Angriff auf den zweiten Hauptsatz irgendwie Erfolg versprechen könnte, und ich persönlich muß auch bekennen, daß ich nicht einmal sehr den Wunsch habe, den endgültigen Ablauf des Universums aufzuhalten. Ich bin kein Verehrer des Vogel Phönix. Dies ist eine Frage, auf welche die Wissenschaft mit Stillschweigen antwortet, und alles, was man darüber sagt, ist Vorurteil. Aber da so oft ein Vorurteil zugunsten

des nie endenden Kreislaufs der Wiedergeburt von Materie und Welten laut wird, darf ich vielleicht auch einmal dem entgegengesetzten Vorurteil meine Stimme leihen. Mich würde der Gedanke mehr befriedigen, daß die Welt irgendein gewaltiges Werk der Entwicklung zu erfüllen hat, und nach Vollendung ihrer Aufgabe zurücksinkt in chaotische Unveränderlichkeit, als daß ihr großer Zweck durch endlose Wiederholung banalisiert werde. Ich bin Evolutionist und nicht Multiplikationist. Es scheint mir unsinnig, das selbe immer wieder und wieder in nie endenwollender Aufeinanderfolge zu vollbringen.

„WERDEN“

Entropie und „Werden“. Wenn Sie vielleicht erfreut denken: „Ich werde mit jedem Tage immer besser und besser“, so erhalten Sie von der Wissenschaft die unhöfliche Antwort:

„Ich merke nichts davon. Ich sehe, Sie sind ausgedehnt in Raum und Zeit wie ein vierdimensionaler Wurm, und wenn auch Betrachtungen über Gut und Böse nicht in mein Forschungsgebiet gehören, so will ich doch zugeben, daß Ihr eines Ende besser ist als Ihr anderes. Aber ob Sie besser werden oder schlechter, hängt ganz davon ab, wie herum ich Sie betrachte. Sie haben in Ihrem Bewußtsein eine unbestimmte Vorstellung von ‚Fortschritt‘ und ‚Werden‘. Wenn dies nicht auf reiner Einbildung beruht, so setzt es voraus, daß an Ihnen ein Wegweiser angebracht ist: ‚In dieser Richtung‘. Ich habe die ganze physikalische Welt nach einem solchen Wegweiser durchforscht und keine Spur davon entdecken können. So muß ich denn vermuten, daß er jedenfalls in dieser Welt der Wirklichkeit gar nicht existiert.“

Dies ist die Erwiderung, welche Ihnen die Wissenschaft als Inbegriff der Gesetze erster Art erteilt. Werden die Gesetze zweiter Art mit in Betracht gezogen, lautet der Bescheid zwar etwas gemildert, aber immer noch nicht schmeichelhaft:

„Ich habe nochmals nachgeforscht und beim Untersuchen einer Eigenschaft, die Entropie genannt wird, herausgefunden, daß die physikalische Welt mit einem Pfeil versehen ist, der möglicherweise die Richtung angibt, in der sie betrachtet werden soll. Wenn ich diesem Pfeil folge, stelle ich tatsächlich fest, daß Sie besser werden. Genauer müßte ich sagen: Ihr gutes Ende befindet sich in dem Teil der Welt mit mehr Entropie und Ihr schlechtes Ende in dem Teil mit weniger Entropie. Ich kann aber nicht verstehen, warum diese Anordnung ehrenwerter sein soll als Ihres Nachbarn, dessen gutes und schlechtes Ende gerade entgegengesetzt liegen.“

Das Problem, um das es sich hier handelt, ist die Frage nach dem Bindeglied zwischen der symbolischen Welt der Physik und der Welt unserer gewöhnlichen Erfahrung. Ich habe in der Einleitung gesagt, daß wir auf die Untersuchung dieser Frage erst zum Schluß der rein wissenschaftlichen Betrachtungen näher eingehen werden. Doch wollen wir schon hier den Zusammenhang zwischen der Entropie und unserer Erfahrung von Werden und Fortschreiten zu verstehen suchen. Wie wir im letzten Kapitel erschöpfend gezeigt haben, ist in der symbolischen Welt der Physik die Entropie die einzige Eigenschaft, welche eine Richtung der Zeit erkennen läßt. Sie bildet somit das wissenschaftliche Gegenstück zu unserer Wahrnehmung von Werden und Fortschreiten, vermöge welcher wir die Richtung der Zeit in der Welt der Erfahrung erkennen.

Wenn wir jedoch die Zunahme der Entropie als symbolisches Äquivalent für unser unmittelbares Zeitgefühl ansehen sollen, sind es vor allem zwei Schwierigkeiten, die sich uns entgegenstellen. Einerseits scheint eine derart künstliche mathematische Konstruktion kein angemessenes Symbol für einen so fundamentalen Begriff wie „Werden“. Vielmehr hätten wir erwartet, den Begriff des „Werdens“ unter den Grundaxiomen — gewissermaßen dem A B C der Physik — zu finden. Andererseits kann ein Symbol der gewöhnlichen metrischen Art wohl kaum die Bedeutung vermitteln, welche wir suchen — nämlich den dynamischen Charakter der Außenwelt zum Ausdruck bringen. Die bloße Feststellung, daß am einen Ende der Welt der Zufall stärker ausgeprägt ist als am anderen, kann nicht „die Welt mit Sinn erfüllen“. Wir müssen die wirkliche Bedeutung von „Werden“ in der Welt zum Ausdruck bringen und nicht ein künstliches mathematisches Symbol dafür unter-schieben.

Zunächst möchte ich Ihnen zeigen, wie die Verbindung zwischen Entropie-Änderung und unserer Wahrnehmung des „Werdens“ völlig anderer Art ist, als der sonstige Parallelismus zwischen wissenschaftlicher Welt und Welt der gewöhnlichen Erfahrung. Ein Beispiel für die übliche Beziehung ist die Wahrnehmung von Farben, deren wissenschaftliches Äquivalent elektromagnetische Wellen von bestimmter Länge sind. Hier wie dort kann keine Rede von Ähnlichkeit zwischen der zugrunde liegenden physikalischen Ursache und dem entstandenen Sinneseindruck sein. Alles,

was das symbolische Äquivalent der Farbe zu leisten hat, ist, daß es einen Auslösungsvorgang in einem (ebenfalls symbolischen) Nerv hervorruft. Der Physiologe verfolgt den Nervenmechanismus bis hinauf zum Gehirn, dann klafft eine Lücke, die kein Mensch ausfüllen kann. In ihrer Darstellung durch Symbole können die Einwirkungen der physikalischen Welt bis zur Pforte unseres Bewußtseins aufgezeigt werden. Dort klopfen sie an und verschwinden.

Der Zusammenhang zwischen „Werden“ und Änderung der Entropie kann jedoch nicht in dieser Weise aufgefaßt werden. Selbstverständlich genügt es nicht, daß durch die Vermehrung des „Zufall-Elementes“ in der Welt am Ende eines Nervs ein Impuls ausgelöst würde, und es dem Bewußtsein überlassen bleibt, auf diesen Reiz mit der Vorstellung zu reagieren, als werde irgendwo gleichsam die Kurbel eines Kinematographen gedreht. Wenn wir die Bedeutung der Außenwelt nicht ganz und gar verkannt haben, als wir zu ihrer Deutung Ausdrücke wie Entwicklung und Fortschritt gebrauchten, anstatt nur von statischer Ausgedehntheit zu reden, so müssen wir (wenigstens in gewisser Beziehung) unser unmittelbares Gefühl für „Werden“ als Einblick in die wahre Natur des physikalischen Weltgeschehens auffassen. Wohl ist es wahr, daß es immer einen Punkt geben muß, an dem wir die physikalischen Gegebenheiten aus dem Auge verlieren, um sie in neuem Gewande an unserem geistigen Horizont wieder auftauchen zu sehen, sei es nun, daß es sich um die Wahrnehmung des „Werdens“ oder um die mehr typischen Sinneswahrnehmungen von Licht, Schall, Geruch usw. handelt. Aber wenn es irgend eine Erfahrung gibt, bei der das Mysterium geistiger Erkenntnis als Einblick und nicht als bloße bildhafte Vorstellung ausgelegt werden darf, so ist es unsere Erfahrung vom „Werden“ in der Welt. Denn in diesem einzigen Fall ist kein komplizierter Nervenmechanismus dazwischengeschaltet. Das, was das Bewußtsein registriert, wenn es die Augenblicke verstreichen fühlt, liegt unmittelbar an seiner Pforte. Ganz anders ist es bei den Sinneswahrnehmungen. Selbst, wenn wir irgendeinen Grund hätten, unsere lebhaft empfundene Farbe für eine Einsicht in die physikalische Welt zu halten, so könnte sie doch keine Einsicht in die Natur der elektrischen Wellen sein, denn diese endigen ja bereits an der Retina, entfernt von dem Sitz des Bewußtseins.

Ich fürchte, der Durchschnittsleser wird etwas ungeduldig werden, daß ich diese langatmige Diskussion über den dynamischen Charakter der Außenwelt begonnen habe: „Wozu dies ganze Gerede? Warum stellen Sie nicht einfach die Hypothese auf, daß ‚Werden‘ eine ursprünglich dem Weltgefüge eingeprägte Struktur sei, die durch einen Richtungsinn ausgezeichnet ist? Der menschliche Geist hat Kenntnis von dieser Struktur (wie er von anderen Eigenschaften der physikalischen Welt Kenntnis hat) und wird sich ihrer als Ablauf der Zeit bewußt, damit ihrer wahren Natur ziemlich genau Rechnung tragend. Es ist eine Folge dieser Ein-Bahn-Struktur der Welt, daß das Zufall-Element längs der Faser ständig zunimmt und dadurch dem Physiker ein bequemes Mittel zur Bestimmung ihrer Richtung an die Hand gibt. Aber es ist die Faserung selbst und nicht diese spezielle Folgeerscheinung, die das direkte physikalische Äquivalent zur Erscheinung des ‚Werdens‘ darstellt. Es mag schwer sein, einen strengen Beweis für die Hypothese zu erbringen. Aber haben wir uns nicht schon oft mit Hypothesen abgefunden, nur weil sie vernünftig waren?“

In der Tat hat damit der „Durchschnittsleser“ im wesentlichen die Ansicht ausgesprochen, welche ich hier vertreten möchte. Doch hat er sich schwerlich klargemacht, daß der gewissenhafte Physiker eine solche Hypothese nur als zulässig anerkennen kann, wenn er sich vorher mit den subtilsten Fragen über die allgemeine Grundlage physikalischer Gesetze und die Grenzen wissenschaftlicher Methoden überhaupt auseinandergesetzt hat. Es ist etwas anderes, eine vernünftige Hypothese zur Erklärung experimenteller Tatsachen einzuführen, und etwas anderes, eine Hypothese aufzustellen, um der Außenwelt zweckhafte Bedeutung aufzuprägen, wie stark dieselbe auch durch unser eigenes Bewußtsein gestützt sein mag. Als wissenschaftliche Tatsache steht uns nur die Feststellung zur Verfügung, daß es in der vierdimensionalen Welt eine Richtung gibt, in der das Zufall-Element sich ständig in gleichem Sinne ändert. Dies allein aber ist kein hinreichender Grund für die Annahme eines dynamischen Charakters der Welt. Wenn wir also trotzdem eine derartige Behauptung aufrechterhalten, so geben wir damit implizite zu, daß das Bewußtsein imstande ist, gleichsam durch eine private Pforte direkten Einblick in den Sinn des Weltgeschehens zu gewinnen, den uns physikalische Meßmethoden niemals offenbaren können.

Bei jedem Versuch, den Brückenschlag zwischen dem Reiche geistiger und dem physikalischer Erfahrung zu tun, wird es vor allem nötig sein, das Wesen der Zeit zu ergründen. Wie schon erwähnt, können wir uns der Zeit auf zweierlei Weise bewußt werden: erstens mit Hilfe der Sinnesorgane, die sie mit den andern Gegebenheiten der physikalischen Welt in Beziehung bringen, zweitens aber auf direktem Wege durch eine Art Privateingang unseres Bewußtseins. Der Physiker, dessen Forschungsmethoden auf einer Verfeinerung der Sinnesorgane durch Präzisionsapparate beruhen, pflegt nicht viel für solche Privateingänge übrig zu haben, durch die alle Arten abergläubischer Phantasiegebilde ungehindert Zutritt finden können. Aber, frage ich, ist dieser Physiker auch bereit, auf die Kenntnis von dem Fortschreiten der Zeit zu verzichten, die durch diese Tür zu ihm gelangt? Wird er sich mit jener Zeit begnügen, die ihm durch die Sinne vermittelt wird und aller dynamischen Eigenschaften beraubt ist?

Zweifellos wird mancher diese Frage mit Ja beantworten. Ich würde dann etwa erwidern: So treten Sie auch den Beweis für die Ehrlichkeit Ihrer Überzeugung an, und machen Sie den Versuch, die dynamische Eigenschaft der Zeit in ihrer Richtung umzukehren. (Wenn Sie dieser Eigenschaft weiter keine Bedeutung beilegen, können Sie einen derartigen Versuch ja ruhig wagen.) Entwerfen Sie uns zur Abwechslung ein Bild des Weltalls, wie es sich so entwickelt, daß die Einwirkung des Zufalls immer geringer wird, jeder Schritt ein neuer Beweis des allmählichen Sieges der Unwahrscheinlichkeit über die Wahrscheinlichkeit. Wenn Sie Biologe sind, zeigen Sie uns, wie der Natur, vom Menschen ausgehend, schließlich der wunderbar einfache Aufbau der Amöbe gelang. Sind Sie Astronom, so schildern Sie, wie die Lichtwellen aus der Tiefe des Raumes herbeiströmen, sich auf Sternen zu verdichten, wie die sinnvolle Gliederung des Sonnensystems sich in die Formlosigkeit kosmischen Nebels auflöst. Ist dies die lichtvolle Erkenntnis, die Sie an Stelle des ersten Kapitels der Genesis setzen wollen? Wenn es Ihre ehrliche Überzeugung ist, daß die Theorie einer rückläufigen Entwicklung der Welt ebenso wahr und sinnvoll ist wie die bisherige Evolutionstheorie, so ist es sicherlich an der Zeit, gegen die allgemein verbreitete einseitige Auffassung Front zu machen.

Der dynamische Charakter der Außenwelt. Hätten wir nicht unsere feste innere Überzeugung von dem dynamischen Charakter der Zeit, so wäre der Standpunkt möglich, daß „Werden“ ein rein subjektiver Begriff ist, daß es ein „Werden“ in der Außenwelt gar nicht gibt und diese nach Art der Minkowskischen Darstellung in der Dimension der Zeit bewegungslos ausgebreitet liegt. Mein Bewußtsein erfindet sich dann selbst eine Reihenfolge für die Sinnesindrücke, die zu den einzelnen Standpunkten entlang der Spur des vierdimensionalen Wurmes gehören, der auf etwas geheimnisvolle Weise mein „Ich“ ist; und fasse ich dann die Sinnesindrücke eines bestimmten Standpunktes ins Auge, so habe ich die Illusion, daß die entsprechenden äußeren Ereignisse „stattfinden“. Ich glaube, daß dies eine durchaus adäquate Darstellung der beobachteten Erscheinungen ergeben würde. Alles, was dagegen einzuwenden ist, dreht sich einzig und allein darum, daß diese Auffassung die Außenwelt des ihr innewohnenden dynamischen Charakters beraubt.

Es wird nützlich sein, wenn wir uns darüber klar werden, wie bereits einige unserer ganz elementaren Urteile die Existenz der dynamischen Eigenschaft oder dynamischen Tendenz der Außenwelt zur stillschweigenden Voraussetzung haben; diese auszumerzen hieße fast die Möglichkeit aufheben, Schlußfolgerungen zu ziehen. Beim Mischen unseres Spiels Karten nehmen wir mit axiomatischer Sicherheit an, daß die Karten *s p ä t e r* ungeordneter sein werden. Ist die Natur überhaupt denkbar, wenn diese Voraussetzung nicht unmittelbar sichergestellt ist? Aber was verstehen wir hier unter „später“? Soweit es sich um die axiomatische Sicherheit unserer Schlußfolgerungen handelt (nicht ihren experimentellen Nachweis), kann „später“ nicht als Urteil unseres Bewußtseins gemeint sein. Daß es uns unmittelbar einleuchtet, ist nicht an irgendwelche theoretische Untersuchungen über das Verhalten des menschlichen Bewußtseins gebunden. Oder meinen wir „später“, wie es durch das physikalische Kriterium des Zeitpfeils bestimmt wird, d. h. gleichlaufend mit dem Anwachsen des Zufall-Elementes? Dies wäre eine Tautologie: Die Karten befinden sich in einem Zustande größerer Unordnung, wenn der Zufallanteil größer geworden ist. Wir meinten keine Tautologie. Ohne uns dessen bewußt zu sein, lag unserem Urteil die Voraussetzung zugrunde, daß die Struktur der raum-

zeitlichen Welt, in der das Mischen stattfand, eine un-
zweideutige Richtung von Vergangenheit gegen Zukunft
besitzt.

Die Schwierigkeit liegt in folgendem: Obgleich die Ver-
änderung, welche wir mit Ordnen bezeichnen, das genaue
Gegenteil der Veränderung ist, die wir Mischen nennen, ist
es unvorstellbar, daß die Ursache des Ordnen das genaue
Gegenteil der Ursache des Mischens wäre. Eine Umkehr
der Zeit, welche Mischen in Ordnen wandeln würde, kann
nicht ebenso die entsprechende Vertauschung der Ursachen
dieser beiden Vorgänge bewirken. Mischen kann eine
nicht-organische Ursache haben, Ordnen ist das Vorrecht
des Verstandes oder des Instinktes. Wir können doch
nicht glauben, daß es nur eine Orientierung in bezug auf
die Richtung der Zeit ist, welche uns von der unorganischen
Natur unterscheidet. Soweit es die Wahrscheinlichkeit der
Anordnung betrifft, verhält sich Mischen zu Ordnen wie
plus zu minus. Wollten wir aber dasselbe von den Ursachen
des Mischens und Ordnen sagen, so würden wir behaupten,
daß die Wirksamkeit der Materie und diejenige des Geistes
sich wie plus und minus unterscheiden, — was offen-
barer Unsinn wäre. Wenn wir also die Welt in Richtung
von Zukunft gegen Vergangenheit betrachten, so daß
Ordnen und Mischen miteinander vertauscht sind, so wird
dadurch nicht gleichzeitig eine Vertauschung der Ursachen
dieser beiden Vorgänge bewirkt, und der sinnvolle Zu-
sammenhang der Welt ist somit aufgehoben.

Um diesen Zusammenhang wieder herzustellen, müßten
wir postulieren, daß durch die Richtungsänderung der Zeit
auch noch etwas anderes umgekehrt wird, nämlich die
oben erwähnte Tendenz in der Weltstruktur; „Werden“
wäre in „Entwerden“ gewandelt. Wir müßten dann unter-
suchen, nicht wie Dinge e n t m i s c h t w e r d e n , sondern
wie sie g e m i s c h t e n t w e r d e n — und, wenn wir dies
noch weiter treiben wollen, nicht die Ursachen betrachten,
sondern die Ent-Ursachen. Aber ohne uns weiter mit Wort-
spielereien abzugeben, soll damit gesagt sein, daß „Werden“
der Welt eine Struktur einprägt, deren Richtung umzu-
kehren, der Gesetzlichkeit des „Werdens“ widerspricht.

Die objektive Bedeutung von Werden. Im allgemeinen
bezeichnen wir unsere gewöhnliche Erfahrung von der Welt
als subjektiv, während das wissenschaftliche Weltbild

objektiv genannt wird. Betrachten wir nochmals unser obiges Beispiel: Die Farbe, die wir sehen, und ihr wissenschaftliches Gegenstück, die elektromagnetische Wellenlänge. In diesem Falle werden wir nicht zögern, den elektromagnetischen Wellen objektive Bedeutung zuzuschreiben und das Sehen von Farben als subjektiv zu bezeichnen. Elektromagnetische Wellen sind Wirklichkeit — oder das, wodurch wir die Wirklichkeit am besten beschreiben können; Farben jedoch sind Gebilde unseres Geistes. Die farbenprächtigen Bilder, die in unserem Bewußtsein unter dem Reiz der Lichtwellen entstehen, können keinen Anspruch auf objektive Wirklichkeit erheben. Einem Farbenblinden werden diese Bilder anders erscheinen. Aber selbst bei Menschen mit normalem Farbensinn, die in der Unterscheidung der einzelnen Farben übereinstimmen, können wir nichts darüber aussagen, ob ihre Empfindung von Rot, Blau usw. genau dieselbe ist wie die unsrige. Außerdem wissen wir, daß den kurzen bzw. langen Lichtwellen, welche auf unser Auge keine Wirkung mehr ausüben, eine ebensolche Realität zuerkannt werden muß wie dem sichtbaren Licht. In diesen und andern Fällen müssen wir objektive Wirklichkeit der Welt der Wissenschaft zuschreiben, während der vertrauten Erfahrungswelt nur subjektive Bedeutung zukommt.

In der Beziehung zwischen Entropiegradient und „Werden“ scheinen jedoch die subjektive und die objektive Wertung miteinander vertauscht zu sein. Sicher ist „Werden“ Wirklichkeit — oder das, wodurch wir die Wirklichkeit am besten beschreiben können. Wir sind überzeugt, daß die Außenwelt einen dynamischen Charakter trägt. Und wenn ich meiner Einbildungskraft noch so freien Spielraum lasse, kann ich mir nicht vorstellen, wie die Wesenheit von „Werden“ sehr viel anders sein könnte, als es uns erscheint. Andererseits ist der Begriff der Entropie offenbar weit subjektiver als die meisten physikalischen Gegebenheiten. Entropie bedeutet eine Abschätzung von Anordnung und Organisation. Sie ist subjektiv in demselben Sinne, wie etwa das Sternbild des Orion subjektiv ist. Das, was angeordnet ist, hat objektive Bedeutung, wie die Sterne, die das Bild des Orion zusammensetzen. Aber das Verbundensein zu einer Gemeinschaft fügt der beobachtende Verstand hinzu. Wenn Farbe ein Produkt des Geistes ist, so ist auch Entropie ein Geistesprodukt, und zwar des Statistikers. Es kommt ihr

ebenso viel objektive Wirklichkeit zu wie irgendeinem statistischen Mittelwert.

Während der Physiker im allgemeinen sagen wird, die Masse dieses wahrgenommenen Tisches ist in Wirklichkeit eine Krümmung des Raumes, und seine Farbe in Wirklichkeit elektromagnetische Wellenlänge, wird er schwerlich behaupten, daß der im Bewußtsein wahrgenommene Ablauf der Zeit in Wirklichkeit ein Entropiegradient sei. Ich bin mir bewußt, mich an dieser Stelle ziemlich unwissenschaftlich auszudrücken, doch es kommt so zum Ausdruck, daß wir der letzteren Parallele ganz anders gegenüberstehen als den ersten. Nachdem wir uns überzeugt haben, daß ein Zusammenhang zwischen Entropie und Ablauf der Zeit besteht, drängt sich uns nun die Schlußfolgerung auf, daß der Entropie irgend etwas noch nicht Faßbares zugrunde liegen muß — mag Ihnen das auch etwas mystisch erscheinen —, was in der physikalischen Definition der Entropie nicht zum Ausdruck kommt. Kurz, wir mühen uns zu erkennen, daß der Entropiegradient in Wirklichkeit der Ablauf der Zeit ist und nicht umgekehrt.

Bevor ich weitergehe, möchte ich hervorheben, daß diese ausnahmsweise Vertauschung in der Zuordnung des Subjektiven und Objektiven zu den beiden Welten, zu der physikalischen und der vertrauten Erfahrungswelt, uns zu denken geben sollte. Sie mag uns für eine Auffassung der physikalischen Welt vorbereiten, die ich in den späteren Kapiteln vertreten werde und die weit mehr Subjektives enthält als die übliche Auffassung der Wissenschaft.

Je näher wir die Verbindung zwischen Entropie und Werden untersuchen, desto größer erscheinen die Schwierigkeiten. Würde Entropie zu den nicht weiter definierbaren Grundelementen der Physik gehören, der Zusammenhang wäre leichter zu verstehen, ebenso, wenn der Ablauf der Zeit uns durch unsere Sinnesorgane zum Bewußtsein käme. Aber die Aufhellung des tatsächlichen Zusammenhanges, mit dem wir es hier zu tun haben, ist einzigartig in ihrer Schwierigkeit.

Wir wollen einmal annehmen, wir hätten „Werden“ mit dem Gradienten des elektrischen Potentials zu identifizieren statt mit der Entropieänderung. Elektrisches Potential wird mit Hilfe einer Voltmeterablesung nachgewiesen. Der numerische Betrag der Ablesung zeigt irgend etwas an in dem Zustand der Welt, aber wir formen uns kein Bild von diesem Etwas. In unsere wissenschaftlichen Untersuchungen geht

nur dieser numerische Wert ein, gewissermaßen als Code-
nummer, die einem Hintergrunde zugeordnet ist, der außer-
halb des Bereiches aller Erkenntnis liegt. Könnten wir die
Änderung dieses geheimnisvollen Potentials mit dem uns
vertrauten Ablauf der Zeit identifizieren, so würde das einen
großen Schritt vorwärts zur Erfassung seines innersten
Wesens bedeuten. Tatsächlich aber müssen wir den Gra-
dienten des elektrischen Potentials mit einer Kraft identifi-
zieren. Nun haben wir auch von Kraft eine intimere
Kenntnis, nämlich als Empfindung einer Muskelanstrengung;
aber dadurch erhalten wir keinen Einblick in das innere
Wesen des Potentialgradienten. Denn die Sinnesempfindung
ist nichts als ein Gebilde unseres Geistes, das durch einen
Nervenreiz hervorgerufen wird, der vorher einen weiten Weg
vom Sitz der Kraft zurückzulegen hatte. Ebenso verhält es
sich mit allen anderen physikalischen Gegebenheiten, die uns
durch unsere Sinnesorgane übermittelt werden. Der da-
zwischen geschaltete Nervenmechanismus würde jede enge
Verbindung des geistigen Bildes mit der physikalischen
Ursache verhindern, auch wenn wir bei der Möglichkeit
direkter Einwirkung geneigt wären, der geistigen Einsicht
Vertrauen zu schenken. Wenn wir aber annehmen, wir hätten
Kraft mit dem Entropiegradienten zu identifizieren, so
müßten wir diesen als einen Zustand auffassen, der auf einen
Nerv einen Reiz ausübt, der dem Gehirn übermittelt wird
und hier die Vorstellung von Kraft auslöst. Niemand würde
innerlich einen Widerstand gegen die Hypothese verspüren,
daß eine Verbindung zwischen der Kraftempfindung in
unserem Muskel und einer Veränderung der Organisation
der Moleküle dieses Muskels besteht.

Die Schwierigkeit liegt darin, daß wir zwei Dinge mit-
einander in Beziehung setzen müssen, von denen wir jedes
mehr oder weniger begreifen, die aber, soweit wir sie be-
greifen, völlig voneinander verschieden sind. Es wäre absurd
zu behaupten, daß wir uns in ebensolcher Unkenntnis über
das Wesen von Organisation in der Außenwelt befinden,
wie über die innere Natur des Potentials. Ebenso absurd aber
wäre es, zu leugnen, daß wir eine wohl begründete Vorstellung
von dem „Werden“ in der Außenwelt haben. Der dyna-
mische Charakter der Außenwelt, der es bewirkt, daß eine
Entwicklung von Vergangenheit gegen Zukunft uns sinnvoll
erscheint, die umgekehrte Entwicklung jedoch als sinnlose
Posse, hat eine weit tiefergehende Bedeutsamkeit, als etwa

darin liegen würde, einen Auslösungsvorgang in einem Nerven hervorzurufen. Er ist so innig mit der ganzen Struktur unseres Bewußtseins verwoben, daß der Ablauf der Zeit zur Bedingung des Bewußtseins selbst wird. Wir haben direkten Einblick in das „Werden“, und alle andere nur symbolische Kenntnis liegt auf niedrigerer Ebene. Ich habe unmittelbare Kenntnis vom Sein, weil ich selber bin, und ich habe unmittelbare Kenntnis vom Werden, weil ich selber werde. Es ist gleichsam das ureigentliche Ego von allem, was da ist und wird.

Wie ungereimt es ist, eine so grundlegende intuitive Erkenntnis durch eine Eigentümlichkeit in der Anordnung der kleinsten Weltbausteine zu versinnbildlichen, springt unmittelbar in die Augen. Worauf diese Schwierigkeit jedoch hindeutet, liegt noch völlig im Dunkeln. Sie dürfte in Beziehung stehen zu der Umordnung in unserer Wertung der Gesetze erster bzw. zweiter Art, welche sich allmählich vorzubereiten scheint. Man läßt zwar den eisernen Determinismus der Gesetze erster Art noch weitgehend gelten, aber doch nicht mehr unbedingt. Die Erkenntnis bricht sich allmählich Bahn, daß wir noch nicht ein einziges Gesetz erster Art wirklich erfaßt haben, sondern daß alle Gesetze, welche bisher dafür gehalten wurden, in Wirklichkeit statistische Gesetze sind. Zweifellos wird man nun sagen, daß dies gar nicht anders zu erwarten war: Wie sollte der Weg nicht mühsam sein, der zur Erkenntnis der letzten Grundlagen alles Geschehens führt! Wir dürfen uns nicht entmutigen lassen, wenn neue Entdeckungen unerwartete Tiefen enthüllen. Vielleicht möchte auch der eine oder andere behaupten, die Natur habe unlautere Kniffe angewandt, um ihre Elementargesetze vor Entdeckung zu schützen, ebenso wie sie unser Forschen nach einer Geschwindigkeit relativ zum Äther zu vereiteln schien*. Ich glaube, daß die Natur es ehrlich mit uns meint und sich nur hinter diese scheinbaren Ausflüchte verschanzt, wenn wir Dinge suchen, die es nicht gibt. Bei dem heutigen Stand physikalischer Erkenntnis dürfte es schwer halten, die tief eingewurzelte Überzeugung von der schließlichen Wiederherstellung eines Systems streng deterministischer Gesetze fernerhin aufrechtzuerhalten, es sei denn, daß man sie als Denknötwendigkeit postuliert. Aber unser Denken hat sich ja im Laufe der

* Siehe auch S. 219.

letzten Jahre gewöhnen müssen, auf viele dieser „Notwendigkeiten“ zu verzichten.

Es sollte uns nicht wundern, wenn bei der Neuordnung des gesamten Systems der Physik, wie sie die Quantentheorie notwendig macht, die Gesetze erster Art ihre fundamentale Stellung an die Gesetze zweiter Art abtreten müssen. In dieser neu erbauten Welt ist nichts unmöglich, wenn auch manches unwahrscheinlich. Das Endresultat ist dasselbe, aber wir müssen eine ganz andere Art von Maschinerie verstehen lernen. Doch ich will dieses Problem hier nicht weiter verfolgen, da wir später darauf zurückkommen werden. Die Entropie, die wir in Verbindung mit einem Gesetze zweiter Art eingeführt haben, wird dann ihre selbständige Daseinsberechtigung haben, und nicht nur deswegen von Bedeutung sein, weil sie die Anordnung von Größen in dem nicht mehr gültigen Schema erster Art kennzeichnet. Vielleicht wird sie auf Grund dieses Existenzrechtes auch leichter als Symbol für den dynamischen Charakter der Außenwelt anerkannt werden. Ich kann diese Gedanken nicht klarer ausdrücken, denn ich spreche ja von einer noch hypothetischen Umordnung unserer Anschauungen, die bis jetzt noch von niemandem wirklich zustande gebracht wurde.

Die zweifache Art unserer Zeiterkenntnis. Ferner fällt uns auf, daß in der Physik eine Scheidung stattfindet zwischen der Zeit und ihrem Pfeil. Ein Beobachter aus einer anderen Welt, der die zeitliche Beziehung zwischen zwei Ereignissen unserer Welt feststellen will, müßte zu diesem Zwecke Ablesungen an zwei verschiedenen Meßinstrumenten vornehmen. Er müßte eine Uhr ablesen, um zu bestimmen, wieviel später das eine Ereignis stattfindet als das andere, und er müßte irgendein Instrument zur Bestimmung der Desorganisation der Energie ablesen (z. B. ein Thermometer), um festzustellen, welches der beiden Ereignisse das spätere ist*. Diese Teilung der Arbeit erscheint ganz be-

* Falls die Beobachtung wirklich von einer anderen Welt aus vorgenommen wird, kann nicht vorausgesetzt werden, daß der Beobachter weiß, ob die Zahlen seines Zifferblattes in der richtigen Reihenfolge laufen, ebensowenig, ob sein eigenes Zeitgefühl irgend etwas mit dem Ablauf der Zeit auf unserer Welt zu tun hat. Er liest also nur zwei verschiedene Zeigerstellungen für die beiden Ereignisse ab, ohne zu wissen, ob ihre Differenz positiv oder negativ zu rechnen ist. Er muß noch mit Hilfe

sonders merkwürdig, wenn wir daran denken, daß gerade bei unseren besten Uhren alle Prozesse, welche wie die Reibung eine Desorganisation der Energie hervorrufen, soweit wie irgend möglich ausgeschaltet sind. Je vollkommener ein Instrument die Zeit mißt, um so weniger wird es ihren Pfeil erkennen lassen.

Diese Paradoxie ist vielleicht auf die Tatsache zurückzuführen, daß auch unser Bewußtsein, wie in Kapitel 3 auseinandergesetzt ist, in zweifacher Weise die Zeit registriert. Man könnte den Verstand einem Redakteur vergleichen, der in seinem Privatbüro sitzt, und die bruchstückartigen Mitteilungen, die ihm von den Nerven über die Außenwelt zugebracht werden, mit mehr oder weniger dichterischer Freiheit zu einer zusammenhängenden Erzählung aneinanderfügt. Wie von anderen physikalischen Größen erhält er auf diesem Wege auch Berichte über die Zeit, die sich hiernach als eine bestimmte meßbare Beziehung zwischen Ereignissen der Außenwelt darstellt. Doch ist dies die Zeit ohne ihren Pfeil. Außerdem wird sich der Redakteur ohne Vermittlung der Nerven einer Zeit bewußt, nämlich der zeitlichen Beziehungen entlang seiner Fährte durch die vierdimensionale Welt. Obgleich diese Wahrnehmung innerlich und unmittelbar ist, nicht eine durch die Nerven von außen übermittelte Botschaft, so hat der Redakteur doch die Vorstellung, daß seine innere Erfahrung der in den Nervenberichten beschriebenen Zeit entspricht; und da diese Zeit des Bewußtseins mit einem Pfeil versehen ist, wird er veranlaßt, auch in den Mitteilungen von der Außenwelt nach dem fehlenden Pfeil zu forschen. Das Merkwürdige ist nun, daß der Pfeil, als er endlich entdeckt wird, nicht in den Mitteilungen über Uhren gefunden wird, sondern in den Berichten über Thermometer und ähnliche Instrumente, welche ursprünglich gar nichts mit Zeitmessung zu tun haben.

Unser Bewußtsein versieht die Zeit mit dem Pfeil, ist aber zugleich imstande, ihr Verstreichen zu messen, wenn auch auf eine ungenaue Methode. Es hat die richtige Vorstellung von Zeitmessung, führt sie jedoch nur stümperhaft

des Thermometers die Temperaturen zweier Körper, eines kälteren und eines wärmeren, die miteinander in Berührung gebracht sind, messen, und zwar in den beiden Zeitpunkten, in denen die beiden Ereignisse stattfinden. Der Zeitpunkt, in dem der Ausgleich zwischen den Temperaturen der beiden Körper weiter fortgeschritten ist, ist dann der spätere.

aus. Irgendwie muß ein enger Zusammenhang zwischen dem Bewußtsein und der materiellen Welt bestehen, und wir gelangen zu der Annahme, daß das Bewußtsein den Ablauf der Zeit registriert, indem es gewissermaßen eine Art Uhr in der Materie des Gehirnes abliest, wahrscheinlich eine Uhr, die nur ein ungenauer Zeitmesser ist. Ich hatte mir darunter früher eine gewisse Analogie zu unseren physikalischen Uhren vorgestellt, die für eine genaue Registrierung der Zeit bestimmt sind. Jetzt aber glaube ich eine bessere Analogie in einer „Entropieuhr“ zu sehen, worunter ich ein Instrument verstehe, dessen ursprünglicher Zweck ist, den Grad der Desorganisation einer Energie anzuzeigen, und das nur sehr ungenau das Verstreichen der Zeit registriert.

Eine typische Entropieuhr kann man so konstruieren: Ein elektrischer Stromkreis wird aus zwei verschiedenen Metallen gebildet, deren Verbindungsstellen in einem heißen bzw. einem kalten Körper eingebettet sind, die beide miteinander in Berührung stehen. Der Kreis enthält ferner ein Galvanometer, dessen Zeiger den Zeiger der Entropieuhr bildet. Der in dem Kreise erregte thermoelektrische Strom ist proportional der Temperaturdifferenz der beiden Körper. Je mehr also das Mischen der Energie zwischen diesen beiden Körpern fortschreitet, d. h. je mehr ihre Temperaturdifferenz abnimmt, desto geringer wird der Ausschlag des Galvanometers sein. Eine solche Uhr wird einem Beobachter von einer anderen Welt mit Sicherheit anzeigen, welches von zwei Ereignissen das spätere ist. Wie wir gesehen haben, ist dazu keine gewöhnliche Uhr imstande. Was jedoch die Messung der Zeit anbetrifft, so können wir nur sagen, daß die Bewegung der Galvanometernadel in einer gewissen Beziehung mit dem Maße des Fortschreitens der Zeit steht. Und dies ist vielleicht ebenso viel, wie man von der Fähigkeit unseres Bewußtseins, den Ablauf der Zeit zu registrieren, aussagen kann.

Es scheint mir daher, das Bewußtsein mit seinem unerbittlichen Festhalten an dem Pfeil der Zeit und seinen ziemlich vagen Vorstellungen über Zeitmessung könnte durch Entropieuhren in irgendeinem Teile des Gehirnes geleitet sein. Diese Hypothese würde die unnatürliche Annahme vermeiden, daß wir zwei verschiedene Zellen unserer Gehirns substanz befragen müssen, wenn wir uns eine Vorstellung von Dauer und Werden bilden wollen. Der Entropiegradient

wäre dann in beiden Hinsichten das direkte Äquivalent unseres Zeitbewußtseins, und die durch physikalische Uhren gemessene Dauer (das zeitartige Intervall) wäre nur lose damit verbunden.

Ich möchte versuchen, alles, was wir bis jetzt über den Zeitbegriff haben feststellen können, in folgendem zusammenzufassen: Zunächst haben wir gesehen, daß die physikalische Zeit die vierdimensionale Welt in ein System von Schnitten teilt (die „weltweiten“ Augenblicke). Diese sind künstlich und relativ (d. h. verschieden für verschieden bewegte Beobachter), und es entspricht ihnen nichts in unserem Zeitbewußtsein. Ferner erkennen wir in der Relativitätstheorie einen absoluten Unterschied zwischen zeitlichen Beziehungen und räumlichen Beziehungen. Der Geist, der an einen materiellen Körper gebunden ist, kann nur zeitliche Beziehungen erleben. Selbst wenn es keine engere Beziehung gibt, entspricht einer Folge von geistigen Zuständen doch eindeutig eine Folge von Punkten der raumzeitlichen Welt, die zueinander in zeitlicher Beziehung stehen. Da der Geist seine Folge als „Zeit des Bewußtseins“ auffaßt, darf man jedenfalls sagen, daß ein Zusammenhang zwischen den zeitlichen Beziehungen der physikalischen Welt und der Zeit unseres Bewußtseins besteht, während es bei den räumlichen Beziehungen etwas Derartiges nicht gibt. Ich bezweifle allerdings, daß der Zusammenhang sehr eng ist. Ich glaube nicht, daß eine Folge von geistigen Zuständen eine „Ablesung“ von physikalischen zeitlichen Beziehungen darstellt, denn diese haben keinen Pfeil. Vielmehr glaube ich, daß sie als Ablesung des physikalischen Entropiegradienten aufgefaßt werden muß, denn dieser hat den Pfeil. Zeitliche Beziehung und Entropiegradient entsprechen scharf definierten physikalischen Begriffen, die völlig voneinander verschieden sind und im allgemeinen keinen numerischen Zusammenhang aufweisen. Doch können natürlich noch andere Dinge als die Zeit allein „Zeit einhalten“, und so ist es wohl möglich, daß die Entstehung des Zufall-Elementes in irgendeinem besonderen Bezirk unseres Gehirnes ungefähr gleichförmig vor sich geht. In diesem Falle würde kein allzu großer Unterschied zwischen dem Fortschreiten der Zeit in unserem Bewußtsein und der Länge der entsprechenden zeitlichen Beziehung in der physikalischen Welt bestehen.

Die wissenschaftliche Reaktion gegen die mikroskopische Betrachtungsweise. Vom Standpunkt der Naturphilosophie aus müßte die neue Einstellung, die mit dem Begriff der Entropie verbunden ist, als die größte wissenschaftliche Errungenschaft des 19. Jahrhunderts gewertet werden. Sie bedeutet eine Reaktion gegen die Ansicht, daß nur diejenigen Tatsachen von Interesse für die Wissenschaft sind, die durch mikroskopische Zergliederung der Objekte entdeckt werden. Der neue Standpunkt hingegen verlegt das Schwergewicht wissenschaftlichen Interesses von den letzten Größen, zu deren Erkenntnis wir durch die übliche analytische Betrachtungsweise gelangt sind (wie Atome, elektrisches Potential usw.), auf Eigenschaften, die für das System als Ganzes charakteristisch sind und nicht in kleinste Teilchen zerspalten und aufgeteilt werden können. Der Künstler strebt, Sinn und Bedeutung zu vermitteln, die nicht in mikroskopisch sorgfältiger Kleinkunst gefunden werden können, und so nimmt er seine Zuflucht zum Impressionismus. Seltsam genug hat der Physiker dieselbe Notwendigkeit empfunden. Nur gehört seine impressionistische Darstellungsweise ebenso zur exakten Wissenschaft wie seine mikroskopische, ja sie hat sich sogar als die geeignetere für praktische Anwendung erwiesen.

Im fallenden Stein sieht die mikroskopische Analyse Myriaden von einzelnen Molekülen, auf die sich die Energie des Steines verteilt. Die Summe der Energien der Moleküle ergibt die Energie des Steines. Aber die Organisation und das Zufall-Element, die in diesen Bewegungen enthalten sind, lassen sich nicht in gleicher Weise aufteilen. Die Behauptung, daß ein bestimmter Bruchteil an Organisation auf das einzelne Molekül kommt, wäre sinnlos.

Es wurde früher als ideales Ziel aller Forschungen angesehen, den Zustand und Inhalt jedes kleinsten Raumteiles bestimmen und so gewissermaßen eine vollständige Inventarisierung der ganzen Welt erhalten zu können. Aber dabei gehen dem Weltbild alle Züge verloren, die nicht in den kleinen Unterabteilungen lokalisiert sind. Weil eins und eins zusammen zwei ergibt, glauben wir oft, alles über „zwei“ zu wissen, wenn wir nur „eins“ gründlich untersucht haben. Dabei vergessen wir jedoch, auch das „und“ zum Gegenstand unserer Untersuchungen zu machen. Die Gesetze zweiter Art behandeln die Erforschung dieses „und“, d. h. die Erforschung von Organisation.

Der Scharfblick einiger wissenschaftlichen Pioniere des vergangenen Jahrhunderts erkannte, daß in dem physikalischen System erster Art, zu dem man durch einseitige Befolgung der Inventarmethode gelangt war, irgend etwas von praktischer Bedeutung fehlte. Man entdeckte die Entropie, obwohl sie in keiner einzelnen Unterabteilung des Raumes gefunden wurde. Man hat sie entdeckt und ihre Bedeutung erforscht, weil praktische Anwendungen der Physik dazu führten, nicht aus einem philosophischen Bedürfnis heraus. Dadurch wurde die Wissenschaft vor einer verhängnisvollen Einseitigkeit bewahrt. Wäre man auch weiterhin allein bei der Inventarmethode verblieben, so gäbe es in der physikalischen Welt keine Analogie zu der Vorstellung vom „Werden“ in unserem Bewußtsein. Vielleicht wäre dann die Wissenschaft nach langem vergeblichen Forschen zu dem Schluß gekommen, daß „Werden“ ein auf nichts Wirkliches gestütztes Phantasiegebilde unseres Geistes sei, wie Schönheit, Leben, Seele und andere Dinge, die sich einer wissenschaftlichen Inventarisierung entziehen.

Meiner Ansicht nach wären Zweifel an der Wissenschaftlichkeit des neuen Begriffes keineswegs unberechtigt gewesen. Die Entropie gehört nicht derselben Begriffsklasse an wie alle anderen von der Wissenschaft anerkannten Größen, und diese Erweiterung des physikalischen Begriffsschemas deutete, wie wir bald sehen werden, in eine sehr gefährliche Richtung. Sobald einmal Eigenschaften der Anordnung als exakter Gegenstand der Physik zugelassen sind, ist die Grenze des überhaupt Zulässigen schwer zu ziehen. Aber die Entropie hatte sich längst ihre Stellung innerhalb der exakten Physik gesichert, bevor man gewahr wurde, daß sie im Grunde das Maß für den Betrag des Zufall-Elementes einer Anordnung ist. Vor allem war die Entropie ein unentbehrliches Hilfsmittel der Ingenieure geworden und deren Bürgschaft war das beste Zeugnis für den harmlosen Charakter des fremdartigen Eindringlings. Denn damals nahm man allgemein an, die Schöpfung sei das Werk eines Ingenieurs (nicht eines Mathematikers, wie es heute der Mode entspricht).

Angenommen, wir hätten die folgenden Begriffe in zwei Klassen zu ordnen:

Entfernung, Masse, elektrische Kraft,
Entropie, Schönheit, Melodie.

Ich glaube, die schwerwiegendsten Gründe sprächen dafür, Entropie neben Schönheit und Melodie zu stellen, und nicht zu den ersten drei Begriffen. Man kann nur dann von Entropie sprechen, wenn man die Teile in ihrem Zusammenhang betrachtet. Und ebenso erkennen wir Schönheit und Melodie nur, wenn wir die Teile im Zusammenhang sehen oder hören. Alle drei Begriffe bezeichnen charakteristische Merkmale der Anordnung. Es ist ein folgenschwerer Gedanke, daß der eine von ihnen imstande ist, die Rolle einer ganz gewöhnlichen physikalischen Größe zu übernehmen. Der Grund dafür, daß dieser Fremdling sich unter den Ureinwohnern der physikalischen Welt behaupten kann, liegt darin, daß er ihre Sprache zu sprechen vermag, nämlich die Sprache der Arithmetik. Man kann ihm eine Maßzahl zuordnen, und damit hat er Heimatrecht im Reiche der Physik erworben. Schönheit und Melodie sind nicht im Besitze des arithmetischen Paßwortes und bleiben daher ausgeschlossen. Diese Betrachtung zeigt uns, daß die exakte Wissenschaft von ihren Größen nicht die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Kategorie fordert, sondern Meßbarkeit. Wir werden in einem späteren Kapitel sehen, daß die Physik sich mit allem, was sie ihrer Betrachtung unterzieht, überhaupt nur insofern befaßt, als es metrisch faßbar ist. Es wäre also von geringem Nutzen für die Schönheit, wenn sie sich einige numerische Attribute beilegen würde (wie z. B. die idealen Proportionen der Symmetrie), in der Hoffnung, auf diese Weise Zutritt in das Reich der Wissenschaft zu erlangen. Soweit sie metrisch faßbar ist, würde sie eingelassen werden, aber ihre ästhetische Bedeutung bliebe ausgeschlossen. Auch die Entropie findet nur Geltung, insofern sie meßbar ist. Wenn ihr, wie wir vermuten möchten, noch eine tiefere Bedeutung zukommt, die sich vielleicht dem nähert, was sich in unserem Bewußtsein als Zweck (im Gegensatz zur Wahrscheinlichkeit) darstellt, so ist diese für die physikalische Definition der Entropie belanglos. Allerdings geht es hierin der Entropie nicht besser und nicht schlechter als Größen wie Masse, Entfernung und ähnlichem, denen sicher auch eine Bedeutung zukommt, die sich nicht in bloßen Zahlen ausdrücken läßt, und die verlorengelht, sobald sie in das wissenschaftliche Schema — diese Welt der Schatten — eingereiht werden.

Vielleicht halten Sie meine beharrlichen Auseinandersetzungen, daß die Entropie in das Inventarverzeichnis des mikroskopisch faßbaren Inhalts der Welt nicht hineinpaßt,

für Wortklauberei. Vielleicht meinen Sie, wenn Sie alle Einzelindividuen vor sich haben, so erfassen Sie damit automatisch auch ihren Zusammenhang, ihre Anordnung, ihre Organisation; wenn Sie die Sterne haben, hätten Sie auch ihre Konstellation. Das wohl; aber bei der Erforschung der einzelnen Sterne halten sie die Konstellation nicht für wichtig. Infolge ihrer materialistischen Einstellung hat die Naturwissenschaft Konstellationen für nebensächlich gehalten, bis die Entropie als Eigenschaft der Anordnung eine einzig dastehende Ausnahme davon schuf. Wenn wir ein Gemälde als große Anzahl einzelner Farbpartikelchen auffassen, geht die ästhetische Wirkung verloren. Man nimmt die Farbpartikelchen in das wissenschaftliche Inventar auf und erhebt den Anspruch, nun habe man alles, was wirklich ist an dem Gemälde, erfaßt. Aber diese Art, ein Ding zu erfassen, kann dahin führen, es zu verlieren. An einem Gemälde — und das unterscheidet es von einem Farbenklecks — ist das Wesentliche die Anordnung. Geht nun bei der Inventar-Methode Anordnung verloren, oder gelingt es, sie zu erfassen? Die übliche Antwort ist zwiespältig. Insofern Anordnung das Bild charakterisiert, geht sie verloren. Die Naturwissenschaft befaßt sich mit Farbe, nicht mit Gemälden. Insofern jedoch die Anordnung Organisation darstellt, wird sie inventarisiert; die Wissenschaft befaßt sich sogar sehr eingehend mit Organisation. Warum sollen wir aber (so frage ich als Philosoph und nicht als Naturwissenschaftler) einen so prinzipiellen Unterschied zwischen diesen beiden Seiten machen, die Anordnung uns zeigt? Der Unterschied wird deshalb gemacht, weil der Wissenschaftler mit einem Bilde nichts anfangen kann — es bringt ihn nicht weiter. Um aber gerecht zu sein, müssen wir betonen, daß der Künstler ebensowenig mit der Entropie anfangen kann, denn sie ist wieder ohne Belang für seine Zwecke.

Ich will mit diesen Ausführungen nicht etwa beweisen, daß in der Außenwelt noch irgendein „Etwas“ existierte, welches das Bild repräsentiert, insofern es verschieden ist von den Myriaden Partikelchen, in die es die Wissenschaft zerlegt. Auch zweifle ich, ob eine solche Annahme überhaupt einen Sinn hätte, noch würde, wenn sie zutreffend wäre, meine Wertung des Bildes dadurch erhöht werden. Was ich ausdrücken möchte, ist vielmehr folgendes: Es gibt eine Seite unseres Wesens, die uns zwingt, an Schönheit und

andere ästhetische Werte in der Natur und in den Werken der Menschen zu glauben. Die Welt, in der wir leben, bedeutet uns unsagbar Vieles, was nicht in der Inventarisierung ihrer Struktur wissenschaftlich beglaubigt ist. Ein unbeirrbares inneres Gefühl sagt uns, daß dieser Glaube richtig ist und unentbehrlich für den Zweck unseres Lebens. Aber ist er auch vernunftgemäß? Muß nicht unsere Vernunft dieses Gefühl für eine völlig mißleitete Deutung dessen halten, was nichts anderes ist als eine Ansammlung von Atomen, Ätherwellen und ähnlichem, was seinen Gesetzen folgt? Dem Physiker, der sich auf diese Weise zum Anwalt der Vernunft aufwerfen sollte, flüstern Sie nur dies eine Wort ins Ohr: Entropie!

Die Unzulänglichkeit der Gesetze erster Art. Es werden sicher viele meiner physikalischen Kollegen mit mir darin übereinstimmen, daß der Entropie eine wesentliche Stellung in der physikalischen Welt zuerkannt werden muß, wenn sie auch in das mikroskopische Schema nicht hineinpaßt. Trotzdem ist mancher vielleicht geneigt, die Einführung der Entropie bloß als rechnerischen Kunstgriff zum Zwecke der Arbeitersparnis anzusehen, der zwar nützlich, aber nicht unentbehrlich ist. Man wird die Ansicht vertreten, daß jedes mit Hilfe des Entropiegesetzes lösbare praktische Problem ohne dieses gelöst werden könne, wenn auch auf umständlichere Weise. Man brauche nur die Bewegung jedes einzelnen Materieteilchens oder Energiequants nach den mikrokosmischen Gesetzen erster Art zu verfolgen, und nirgends würde die Einführung der Entropie weder explizite noch implizite sich nötig erweisen. Nun wohl, wir wollen es versuchen. **H i e r** habe ich ein Problem für Sie —

(Ein Stück Kreide wurde auf den Vorlesungstisch geworfen, wo es in zwei Stücke zerbrach, die ein wenig weiterrollten.)

Betrachten Sie die augenblickliche Lage und Geschwindigkeit jedes Moleküls, oder wenn Sie wollen jedes Protons und Elektrons in diesen Kreidestückchen als gegeben * und

* Geschwindigkeiten sind relativ zu einem raumzeitlichen Bezugssystem. Sie müssen sich für ein bestimmtes System entscheiden, und es ist Ihnen dann die Geschwindigkeit relativ zu diesem gegeben. (Damit tragen Sie die Verantwortung für jede Bezeichnung innerhalb des Systems wie links, rechts, Vergangenheit, Zukunft usw.)

ebenso in der Tischplatte und der umgebenden Luft, soweit Sie es für die Lösung des Problems brauchen. Ferner seien Ihnen alle notwendigen Einzelheiten über den augenblicklichen Zustand jedes Energieelements bekannt. Mit Hilfe der mikrokosmischen Bewegungsgesetze (erster Art) können Sie die einzelnen Phasen des Vorgangs von Augenblick zu Augenblick verfolgen. Sie können beschreiben, wie die Atome, die sich zuerst ziellos in den einzelnen Kreidestückchen hin und her bewegen, nach und nach sich zu einem gemeinsamen Zwecke vereinigen, so daß die einzelnen Stücke als Ganzes sich zu bewegen beginnen. Die Stückchen springen und rollen auf dem Tisch umher, stoßen schließlich zusammen und vereinigen sich zu einem einzigen Stück Kreide, das sich anmutig in die Luft erhebt und in einer wunderschönen Parabel in meine Hand gelangt, wo es schließlich zur Ruhe kommt. Ich gebe zu, daß Sie dies alles ableiten können, ohne die Entropie mit einzubeziehen oder sonst die Grenzen der mikrokosmischen Physik zu überschreiten. Sie haben das Problem gelöst. Aber inwieweit erfaßt diese Lösung den wirklichen Tatbestand? Darf man ganz vernachlässigen, daß Ihre Berechnungen nicht das Geschehen selbst, sondern gleichsam das Ent-Geschehen beschreiben? Es ist nicht nötig, an Ihrer Beschreibung etwas zu ändern, soweit es die Kette der Ereignisse betrifft, wohl aber scheint sie einer Ergänzung zu bedürfen, welche einen Unterschied erkennen läßt zwischen dem Trick eines Zauberkünstlers und einem gewöhnlichen Vorgang.

Der Physiker wird vielleicht erwidern, daß die gesuchte Ergänzung sich auf die Bedeutung des Vorganges bezieht, und daß er mit Bedeutung nichts zu schaffen habe. Es genügt ihm, wenn seine Berechnungen mit der Beobachtung übereinstimmen. Er könne noch eine Uhr in das Problem einbeziehen, und eine Ablesung in jeder einzelnen Phase vornehmen, aber es sei nicht seine Sache, zu entscheiden, ob dem berechneten Problem die Bedeutung eines Geschehens oder eines Ent-Geschehens zukommt. Es läßt sich viel dafür anführen, daß man alle Fragen nach Sinn und Bedeutung von der Physik ausschließt. Diese Einstellung ist eine gesunde Reaktion gegen die Gewohnheit, unsere Berechnungen mit mystischen Begriffen zu verbrämen, über die wir (vom Standpunkt der Physik) nichts aussagen können. Ich muß gestehen, daß ich den reinen Physiker um diese unangreifbare Stellung fast beneide. Aber wenn auch der

Physiker die Frage nach der Bedeutung von sich weist, muß doch i r g e n d j e m a n d sich der Aufgabe unterziehen, zu untersuchen, ob in der physikalischen Welt der Atome, des Äthers, der Elektronen irgendeine Bedeutung liegt oder nicht. Und mich trifft nun einmal das Unglück, daß man von mir erwartet, ich würde in diesen Vorträgen dem Laien eine Art Richtschnur geben, welche Stellung er gegenüber der Welt der reinen Wissenschaft im Vergleich zu andern Betrachtungsweisen der Außenwelt einnehmen soll. Einige meiner Zuhörer interessieren sich vielleicht gar nicht für ein Weltbild, das nur als rechnerisches Hilfsmittel erfunden wurde. Soll ich denn wirklich diesen Hörern erwidern, die Wissenschaft bleibe stumm auf die ewige Frage des menschlichen Geistes: Was ist der Sinn von allem diesem? Sicher werden meine Kollegen von mir erwarten, daß ich in diesem Zusammenhange einiges zur Verteidigung der physikalischen Welt vorbringe. Ich bin auch durchaus dazu bereit, doch muß ich darauf bestehen, daß vorher festgesetzt wird, in welcher Richtung die Welt betrachtet werden soll. Wie kann ich einen Sinn darin erkennen, wenn die Welt in umgekehrter Richtung dargestellt wird wie in obigem Beispiel mit der Kreide? Dies ist der Grund, warum ich die Einführung der Entropie für so außerordentlich wichtig halte. Nicht darin, daß sie Berechnungen verkürzt, die auch mit Hilfe anderer Methoden unter Umgehung des Entropiebegriffes ausgeführt werden können, liegt die fundamentale Bedeutung der Entropie, sondern darin, daß durch sie der wissenschaftlichen Welt eine Richtung eingeprägt wird, welche sonst nirgends in der Physik aufgezeigt werden könnte.

Die wissenschaftliche Welt ist, wie ich schon oft erwähnt habe, eine Schattenwelt, welche die unserem Bewußtsein vertraute Welt der täglichen Erfahrung als Schattenbild wiedergibt. Aber wieviel können wir vernünftigerweise in diesem Schattenbilde zu finden erwarten? Doch nicht alles, was unser Bewußtsein erfüllt, Gefühle, Gedächtnis und dergleichen? Im großen und ganzen werden wir erwarten, daß die physikalische Welt diejenigen Eindrücke im Schattenbilde festhält, welche wir als Sinneseindrücke bezeichnen. Nur der Zeit werden wir uns auf zweifachem Wege bewußt, und so bildet diese ein Bindeglied zwischen Innen- und Außenwelt. Sie wird in der physikalischen Welt nur unvollkommen dargestellt, wenn wir uns

auf die Gesetze erster Art beschränken (die den Pfeil der Zeit nicht kennen), dagegen vollständig und ganz, wenn wir das System durch Einführung der Entropie erweitern. Es ist also auf die folgenschwere Wendung, welche die wissenschaftliche Betrachtungsweise Ende des neunzehnten Jahrhunderts genommen hat, zurückzuführen, daß die physikalische Welt nicht ein rein statisch vor uns ausgebreitetes Gebilde ist, um welches der menschliche Geist eine Romanze von Werden und Entwicklung webt, sondern daß sie auch jenen dynamischen Charakter der Welt unseres Bewußtseins im Schattenbilde wiedergibt, der aus der Welt nicht weggedacht werden kann, ohne sie ihres Sinnes zu berauben.

Bei dem Bestreben, die verworrenen Eindrücke unserer Erfahrung einem wissenschaftlichen Zusammenhang einzuordnen, hat man gewöhnlich angenommen, unser Forschen gelte nur dem, was wirklich i s t. Aber noch ein anderes Forschungsziel wird uns durch die Natur unserer Erfahrung nahegelegt: die Frage nach dem, was wirklich w i r d.

DIE GRAVITATION UND IHR GESETZ

Sie sagen, daß die Schwere jeder Materie innewohne und für sie wesentlich sei. Bitte, glauben Sie nicht, daß ich hierüber genaue Kenntnis habe; denn gerade diesen Anspruch erhebe ich nicht, daß mir die Ursache der Schwerkraft bekannt sei. Diese zu ergründen, würde weit mehr Zeit erfordern . . .

Schwere muß durch irgendein Agens hervorgerufen sein, das ohne Unterlaß nach bestimmten Gesetzen wirkt. Ob aber dieses Agens materiell oder immateriell sei, das habe ich meinen Lesern zur Erwägung überlassen.

Newton, Briefe an Bentley.

Der Mann im Lift. Im Jahre 1915 erfuhr die Relativitätstheorie durch Einstein eine wesentliche Erweiterung, indem er sie auch auf den Fall einer ungleichförmigen Bewegung ausdehnte. Den einfachsten Weg zu einem gewissen Verständnis der erweiterten Theorie bietet das Gedankenexperiment von dem Mann im Lift.

Nehmen wir an, dieses Zimmer sei ein Lift. Die Seile reißen und wir sausen in freiem Fall abwärts mit ständig zunehmender Geschwindigkeit.

Wir wollen die Zeit zu physikalischen Experimenten benutzen. Der Lift ist unser Laboratorium und unsere Aufgabe sei, sämtliche Naturgesetze von Anfang an neu zu entdecken, d. h. so, wie sie sich dem Mann im Lift darbieten. In weitgehendem Maße wird dies auf eine bloße Wiederholung der Geschichte der wissenschaftlichen Entdeckungen herauskommen, wie sie in den Laboratorien auf terra firma bereits gemacht worden sind. Nur ein wichtiger Unterschied wird sich zeigen.

Ich mache das Experiment, einen Apfel aus meiner Hand fallen zu lassen. Nun kann aber der Apfel nicht noch mehr fallen, als er es ohnehin schon tut, denn, wie Sie wissen, befindet sich unser Lift mit seinem gesamten Inhalt in freiem Fall. Infolgedessen wird der Apfel bei meiner Hand im Gleichgewicht schweben bleiben. Es gibt ein Ereignis in der Geschichte der Naturwissenschaften, das sich für den Mann im Lift nicht wiederholen wird: das Erlebnis Newtons mit dem Apfelbaum. Die grandiose

Erkenntnis, daß das Agens, welches den Sternen ihre Bahnen weist, dasselbe ist, das im täglichen Leben das Fallen von Äpfeln verursacht, bricht zusammen, denn es entspricht unserer ganz gewöhnlichen Erfahrung im Lift, daß Äpfel nicht fallen.

In jeder anderen Beziehung werden die Naturgesetze für den Mann im Lift mit denjenigen übereinstimmen, die unter normalen Bedingungen abgeleitet wurden. Bis auf diese einzige Ausnahme wird der Mann im Lift alle uns bekannten Naturgesetze ableiten und er wird sie auch in derselben Form ableiten wie wir. Nur die Kraft, die Äpfel fallen läßt, wird in seinem System der Physik fehlen.

Ich darf wohl annehmen, daß auch unser Beobachter im Lift den üblichen egozentrischen Standpunkt haben wird, daß seine eigene Auffassung der Welt die einzig natürliche sei. Es kommt ihm nicht in den Sinn, etwas Seltsames darin zu sehen, daß er sein Leben in einem frei fallenden Lift verbringt. Er findet es weit merkwürdiger, daß wir an der Erdoberfläche gewissermaßen festgeheftet sind. Vielleicht ist es sogar seinen Berechnungen nicht entgangen, daß für so merkwürdig festgehaltene Wesen Äpfel die erstaunliche Gewohnheit des Fallens zu haben scheinen. Jedenfalls aber wird er unsere Erfahrung über das Verhalten von Äpfeln nicht ernster genommen haben, als wir bisher die seine.

Sind wir nun in der Tat verpflichtet, seine Erfahrungen ernst zu nehmen? Oder genauer gesagt: Welche Bedeutung kommt dem Schema der Naturgesetze, wie es ein Beobachter im frei fallenden Lift bestimmt hat, im Vergleich mit demjenigen zu, welches auf *t e r r a f i r m a* abgeleitet wurde? Ist das eine wahrer als das andere? Oder ist es ihm sonst überlegen? Es ist klar, daß der Unterschied, wenn überhaupt ein solcher besteht, darauf beruhen muß, daß den beiden Systemen physikalischer Gesetze verschiedene raumzeitliche Bezugssysteme zugrunde liegen. In unserem System wird der feste Boden als ruhend angesehen, und ebenso betrachtet der Beobachter im Lift den Lift als ruhend. Wir haben früher Beispiele von Beobachtern angeführt, welche ebenfalls verschiedene Bezugssysteme benutzen, aber diese Bezugssysteme unterschieden sich dadurch, daß sie eine *g l e i c h f ö r m i g e G e s c h w i n d i g k e i t* relativ zueinander besaßen. Die Geschwindigkeit des Liftes ist jedoch in ständigem Zunehmen begriffen, d. h.

seine Bewegung ist beschleunigt. Können wir nun den Grundsatz, daß die Natur unabhängig von raumzeitlichen Bezugssystemen ist und daß kein Raum-Zeitgerüst mehr leistet als ein anderes, auch auf beschleunigte Systeme ausdehnen? Ich denke, wir können dies ruhig tun. Höchstens wäre es möglich, daß das System des Mannes im Lift unserem eigenen Bezugssystem nicht nur gleich, sondern sogar überlegen ist.

Wenn wir fest auf dem Boden stehen, so werden wir durch die Moleküle des Bodens getragen, welche gegen unsere Fußsohlen mit einer Kraft hämmern, die gleich einem Gewicht in der Größenordnung von 60 oder 80 Kilogramm ist. Ohne dieses Hämmern der Moleküle müßten wir durch die Zwischenräume des Bodens hindurchsinken. Wir werden also dauernd und heftig bombardiert. Ein solcher Zustand kann aber wahrhaftig nicht als ideale Bedingung für eine einwandfreie Beobachtung unserer Umwelt angesehen werden, und es dürfte uns nicht wundern, wenn unsere Sinne bei einer derartigen Behandlung nur ein entstelltes Bild der Welt wiedergeben würden. Wir müssen unseren Körper wie ein wissenschaftliches Instrument zur Beobachtung der Welt ansehen. Sicher würden wir niemandem erlauben, ein Galvanometer während der Beobachtung mit einem Hammer zu traktieren. Ebenso erwünscht ist es, daß unser Körper, wenn er als Instrument für wissenschaftliche Erkenntnis dienen soll, von einem derartigen Bombardement befreit wird. Wir entgehen aber sofort diesem Hämmern der Moleküle, sobald wir nicht mehr vom Boden getragen werden.

Also wollen wir in einen Abgrund springen, um uns ungestört der Naturbetrachtung hingeben zu können. Oder wenn Sie sich nicht auf diesem Wege überzeugen mögen, daß die Körper nicht fallen *, so wollen wir uns wieder dem hinuntersausenden Fahrstuhl anvertrauen. Hier braucht nichts unterstützt zu werden. Unsere Körper, Galvanometer und sonstigen Meßinstrumente sind befreit von dem Hämmern der Moleküle und wir können uns auf ihre Angaben durchaus verlassen. Das raumzeitliche Bezugssystem

* Soweit ich hierüber (ohne das Experiment zu machen) etwas sagen kann, würde der Mensch der in einen Abgrund springt, bald das Bewußtsein des Fallens verlieren. Er würde nur beobachten, daß alle Gegenstände mit immer wachsender Geschwindigkeit an ihm vorbeieilen.

des fallenden Lifts ist das natürliche Raum-Zeitgerüst für alle Beobachter, die von keinerlei Unterlage getragen werden. Naturgesetze, die unter so günstigen Bedingungen abgeleitet wurden, stehen zum mindesten auf keiner geringeren Stufe als Gesetze, die auf andere Systeme bezogen sind.

Ich will jetzt ein zweites Experiment ausführen: Diesmal nehme ich zwei Äpfel und lasse sie an entgegengesetzten Enden des Lifts fallen. Was geschieht? Zunächst nicht viel. Die Äpfel bleiben an der Stelle im Gleichgewicht schweben, an der ich sie losgelassen habe. Treten Sie nun einen Augenblick aus dem Lift heraus und betrachten Sie den Vorgang von außen. Die beiden Äpfel werden von der Schwerkraft gegen den Mittelpunkt der Erde gezogen. Daher konvergieren ihre Bahnen, bis sie im Erdmittelpunkt zusammentreffen. Nun kehren wir wieder in den Lift zurück. Zuerst schien es, daß die Äpfel im Lift oberhalb des Bodens schweben blieben. Plötzlich aber bemerken wir, daß sie langsam aufeinander zutreiben. Sie werden zusammenstoßen, wenn der Lift (für einen außenstehenden Beobachter) durch den Erdmittelpunkt hindurchgeht. Wenn also Äpfel (im Lift) auch nicht die Neigung haben, zu Boden zu fallen, so zeigen sie doch ein anderes mysteriöses Verhalten. Und der Newton des Lifts wird vielleicht die wunderbare Entdeckung machen, daß das Agens, welches den Sternen ihre Bahnen weist, dasselbe ist, welches im gewöhnlichen Leben verursacht, daß Äpfel so sonderbare Kunststücke ausführen.

Es verhält sich damit folgendermaßen: Die Gravitation zeigt sowohl relative wie absolute Eigenschaften. Die Eigenschaft, die sich uns am meisten bemerkbar macht (daß nämlich Äpfel zu Boden fallen), ist relativ, und zwar relativ zu einem Bezugssystem, dem nur dadurch scheinbar eine besondere Bedeutung zukommt, daß es gerade das Raum-Zeitgerüst ist, welches wir für gewöhnlich zu Hilfe nehmen. Diese Eigenschaft verschwindet jedoch vollkommen in dem Raum-Zeitgerüst des Mannes im Lift, und so müssen wir von ihr absehen, sobald wir versuchen, eine absolute Darstellungsweise der Gravitation zu finden. Für jedes Bezugssystem bleibt aber immer etwas Absolutes an der Gravitation bestehen, und dieses Absolute ist es, das wir in einem geeigneten Bilde zu fassen suchen müssen. Aus Gründen, die ich im folgenden näher auseinandersetzen werde, ist man

dazu gekommen, die absoluten Eigenschaften der Gravitation durch das Bild einer Krümmung von Raum und Zeit darzustellen.

Eine neue Darstellung der Gravitation. Newton stellte die Gravitation als eine Zugkraft dar, die auf einen Körper ausgeübt wird, dessen Bewegungszustand eine Änderung erfährt. Ich möchte Ihnen klarmachen, warum wir uns von dieser Darstellungsweise lossagen müssen. Wieder muß ich von dem berühmten Ereignis von Newton und dem Apfelbaum ausgehen. Der klassische Begriff der Gravitation beruht auf Newtons Darstellung des Vorganges. So ist es denn Zeit, endlich auch die andere Partei, den Apfel, zu hören. Natürlich hatte auch der Apfel die übliche egozentrische Einstellung und glaubte sich selbst in Ruhe. Er sah, wie Newton und all die verschiedenen Dinge auf der Erde mit wachsender Geschwindigkeit ihm entgegensausten. Wird er nun ein geheimnisvolles Agens oder eine Zugkraft erfinden, um dieses Verhalten zu erklären? Keineswegs, denn die Ursache der Beschleunigung liegt klar zutage. Newton wird von den Molekülen des Bodens bombardiert, und dieses Hämmern der Moleküle ist absolut, d. h. unabhängig von der Wahl des Bezugssystems. Mit Hilfe eines genügend starken Vergrößerungsapparates könnte jeder die Moleküle beobachten und ihre Stöße zählen. Nach Newtons eigenem Bewegungsgesetz erteilen diese Stöße ihm genau die Geschwindigkeit, die der Apfel beobachtet. Newton mußte erst eine geheimnisvolle unsichtbare Kraft einführen, die den Apfel herunterzieht. Der Apfel aber kann eine deutlich sichtbare Ursache für die Beschleunigung Newtons aufzeigen.

Der Fall liegt jetzt so außerordentlich günstig für den Apfel, daß es nur gerecht ist, wenn wir Newton Gelegenheit geben, sich eine bessere Position zu verschaffen. Ich glaube nämlich, der Apfel macht sich einen nur zufälligen Vorteil zunutze. Wir wollen daher Newton in den Mittelpunkt der Erde versetzen, wo die Schwere aufgehoben ist. Dort kann er ohne weitere Unterstützung in Ruhe bleiben, d. h. ohne durch das Hämmern der Moleküle getragen zu sein. Er blickt in die Höhe und bemerkt, daß an der Erdoberfläche Äpfel von Bäumen fallen, und sucht die Ursache genau wie vorher in einer geheimnisvollen Zugkraft, die er Gravitation nennt. Der Apfel hinwiederum gewahrt beim Hinunterschauen, daß

ihm Newton entgegenkommt; doch kann er das diesmal nicht mit einem sichtbaren Hämmern der Moleküle begründen. Auch er muß eine geheimnisvolle Kraft postulieren, die auf Newton einwirkt.

Es handelt sich hier um zwei verschiedene Bezugssysteme. In dem einen befindet sich Newton in Ruhe und der Apfel erfährt eine Beschleunigung, in dem andern bleibt der Apfel in Ruhe und Newton wird beschleunigt. In keinem der beiden Fälle ist eine sichtbare Ursache der Beschleunigung vorhanden, in keinem wird eine Partei durch Hämmern von außen gestört. Die Reziprozität ist vollkommen und keinerlei Grund ist dafür vorhanden, ein System vor dem andern auszuzeichnen. Es ist somit notwendig, daß wir uns ein Bild von dem störenden Agens formen, in dem diese Gleichberechtigung der Bezugssysteme zum Ausdruck kommt. Sind wir erst einmal so unparteiisch eingestellt, so kann uns die Darstellungsweise der Gravitation als Zugkraft nicht mehr genügen, denn lassen wir sie an dem Apfel angreifen, so ist dies gleichbedeutend mit einer einseitigen Bevorzugung von Newtons Raum-Zeitgerüst, und lassen wir sie an Newton angreifen, so bedeutet dies wieder eine Bevorzugung von dem System des Apfels*. Das Wesentliche und Absolute an der Gravitation kann nicht eine Kraft sein, die auf irgendeinen Körper ausgeübt wird, denn wir befinden uns ganz im Unklaren darüber, an welchem Körper sie angreifen soll. Wir müssen Gravitation durch ein vollkommen anderes Bild darstellen.

* Man wird vielleicht den Einwand erheben, daß Newtons System wegen seiner größeren Symmetrie der Vorzug zu geben sei. Die hier erörterten Erscheinungen sind nämlich offenbar von dem Vorhandensein eines massiven Körpers (der Erde) abhängig und Newton nimmt seine Zugkräfte symmetrisch zu diesem Körper an. Der Apfel hingegen verteilt seine Zugkräfte unsymmetrisch. (Sie sind gleich Null bei dem Apfel selbst und am stärksten bei den Antipoden.) Um Ihnen vollkommen verständlich zu machen, warum wir dieser Symmetrieeigenschaft keine entscheidende Bedeutung beimessen können, müßte ich die ganze Theorie eingehend erörtern. Hier können wir nur sagen, daß sich das Kriterium der Symmetrie nicht als ausreichend erwiesen hat, um als maßgebend für die Auswahl eines einzigen Bezugssystems zu gelten, und daß wir mit Hilfe dieses Kriteriums nicht imstande sind, eine scharfe Unterscheidung zu treffen, welche Systeme wir zulassen wollen und welche nicht. Es ist durchaus möglich, daß gewisse Bezugssysteme symmetrischer sind als andere, ohne daß deswegen die symmetrischen „richtig“, die unsymmetrischen „falsch“ genannt zu werden brauchen.

Die Alten hielten die Erde für eine flache Scheibe. Der kleine Teil, den sie erforscht hatten, ließ sich ohne nennenswerte Verzerrung auf eine ebene Karte abbilden, und so schien der Gedanke ganz natürlich, daß auch alle Länder, welche man noch neu entdecken würde, sich in derselben Weise auf der ebenen Karte hinzufügen lassen würden. Ein bekanntes Beispiel für eine solche ebene Darstellung der Erdoberfläche ist die Merkator-Projektion. Sie werden sich erinnern, daß die Größe von Grönland auf einer solchen Karte außerordentlich übertrieben erscheint. (Bei anderen Projektionen sind die Richtungen böse verzerrt.) Die Anhänger der Theorie von der flachen Erdscheibe müssen annehmen, daß die Karte die wahre Größe von Grönland wiedergibt, d. h. daß die Entfernungen in Wirklichkeit so sind, wie sie auf der Karte erscheinen. Wie aber werden diese Leute die Berichte der Reisenden erklären, daß die Entfernungen in Grönland viel kürzer erscheinen, als sie „in Wirklichkeit“ sind? Sicher werden sie irgendeine Theorie aufstellen, daß in Grönland ein Dämon sein Wesen treibe, der die Reisen der Wanderer beschleunige. Allerdings wird kein Naturwissenschaftler einen so unwissenschaftlichen Ausdruck gebrauchen. Er wird vielmehr einen vielsilbigen griechischen oder lateinischen Fachausdruck erfinden, um das geheimnisvolle Agens zu bezeichnen, das Reisen in Grönland so kurz erscheinen läßt. Doch das ist nur eine Verschleierung. Wir wollen nun annehmen, die Einwohner von Grönland bilden ihre eigene Geographie aus. Sie finden, daß der wichtigste Teil der Erde, nämlich Grönland, ohne wesentliche Verzerrung auf einer ebenen Karte dargestellt werden kann. Sobald sie aber ferne Länder einzeichnen wollen, wie z. B. Griechenland, so muß deren Größe übertrieben werden. Von ihrem Standpunkt aus werden nun die Grönländer behaupten, daß in Griechenland ein Dämon sein Spiel treibe und die Entfernungen anders erscheinen lasse, als sie, wie aus der Karte deutlich hervorgeht, in Wirklichkeit sind. Der Dämon ist niemals, wo wir selber sind. Immer ist es der andere, den er narrt. Heute wissen wir, daß die wahre Erklärung dieser Erscheinung in der Krümmung der Erde zu suchen ist. Daß ein Dämon am Werke zu sein scheint, rührt nur daher, daß man mit Gewalt die gewölbte Erdoberfläche einer ebenen Karte angleichen wollte und dadurch die Einfachheit der Dinge verzerrte.

Wie es der Theorie von der Erdgestalt ergangen ist, so geht es auch der Theorie von der raumzeitlichen Welt. Ein Beobachter, der sich im Erdmittelpunkt in Ruhe befindet, bildet das Geschehen in einem raumzeitlichen Bezugssystem ab, das auf den üblichen überlieferten Prinzipien beruht und gewissermaßen eine ebene Raumzeit darstellt. Die Ereignisse seiner nächsten Umgebung kann er seinem System einordnen, ohne ihre natürliche Einfachheit zu entstellen. Dinge, die sich in Ruhe befinden, bleiben in Ruhe; Dinge, die in gleichförmiger Bewegung begriffen sind, behalten diese Bewegung bei, es sei denn, daß eine sichtbare störende Ursache für eine Änderung vorhanden ist, wie z. B. das Hämmern von Molekülen. Licht pflanzt sich geradlinig fort. Nun bezieht aber der Beobachter auch die Erdoberfläche mit in sein ebenes System ein und stößt dort auf das Phänomen der fallenden Äpfel. Für diese Erscheinung muß er ein nicht wahrnehmbares Agens, einen Dämon, verantwortlich machen, Gravitation genannt, der die Äpfel veranlaßt, von ihrer eigenen gleichförmigen Bewegung abzuweichen. Ganz ebenso können wir von dem Bezugssystem des Apfels oder des Mannes im Lift ausgehen. Auch in dem System des Lifts beharren die Körper in ihrem Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung. Aber, wie wir gesehen haben, wird bereits in den Ecken des Lifts diese Einfachheit der Erscheinungen gestört. Und sobald wir unsere Beobachtungen weiter ausdehnen, wird es ebenfalls notwendig, die Existenz eines Dämons anzunehmen, der Körper, die z. B. im Erdmittelpunkt schwebend keiner wahrnehmbaren Einwirkung ausgesetzt sind, nach oben treibt (relativ zum Bezugssystem des Lifts natürlich). Jedesmal, wenn wir den Standort des Beobachters wechseln, d. h. von einem Raum-Zeitsystem zu einem andern übergehen, ändert auch der Dämon den Schauplatz seiner Tätigkeit. Niemals befindet er sich an demselben Ort wie unser Beobachter, sondern immer irgendwo anders. Liegt nun die Lösung nicht auf der Hand? Der Dämon ist einfach die Schwierigkeit, welche entsteht, weil wir eine gekrümmte Welt in ein ebenes Gerüst zwingen wollen. Indem wir die Welt einem ebenen System von Raum und Zeit einordnen, verzerren wir sie derart, daß die Erscheinungen sich nicht in ihrer ursprünglichen Einfachheit offenbaren können. Sobald wir aber eine Krümmung der Welt annehmen, verschwindet das geheimnisvolle Agens. Einstein hat den Dämon ausgetrieben.

Glauben Sie nun nicht, daß diese Veränderung in unserer Anschauung uns einer Erklärung der Gravitation sehr nahe bringt. Wir suchen keine Erklärung, wir suchen eine bildliche Darstellungsweise für die Gravitation. Und dieses Bild von der Weltkrümmung (so schwer es scheinen mag) ist doch leichter zu fassen als jene geheimnisvolle Zugkraft, die von einem Ding zum andern entgleitet, je nach dem Standpunkt, den wir einnehmen.

Ein neues Gravitationsgesetz. Wir haben die Gravitation durch ein neues Bild dargestellt. Nun müssen wir auch ein neues Gravitationsgesetz aufzeigen, denn das Newtonsche Gesetz, welches die Gravitation als eine Zugkraft ansah, gab auch den Betrag dieser Kraft an. Gemäß unserer neuen Einstellung ist aber Gravitation keine Kraft mehr. Da wir die Gravitation im Bilde einer Krümmung aufgefaßt haben, muß das neue Gesetz etwas über diese Krümmung aussagen, es muß ein Gesetz sein, das die mögliche Krümmung der raumzeitlichen Welt regelt und einschränkt.

Es läßt sich über eine solche Krümmung nicht viel Allgemeines aussagen. Als Einstein erst einmal die Notwendigkeit erkannt hatte, die Erklärung für die Gravitation in einer Krümmung der raumzeitlichen Welt zu suchen, fand er fast automatisch das richtige Gesetz. Ich will damit sagen, daß man vernünftigerweise nur ein ganz bestimmtes Gesetz annehmen konnte, und dieses hat sich auch tatsächlich bei der Prüfung an der Erfahrung als richtig erwiesen.

Einige von Ihnen werden nun glauben, daß es ihrem Verstand niemals möglich sein wird, die Vorstellung von einer Krümmung des Raumes zu erfassen, von einer Krümmung der Raum-Zeit ganz zu schweigen. Andere wieder, die davon ausgehen, daß ihnen eine Krümmung bei einer zweidimensionalen Oberfläche durchaus vertraut ist, werden keine unüberwindliche Schwierigkeit darin sehen, sich etwas Ähnliches für drei oder gar vier Dimensionen vorzustellen. Ich glaube fast, erstere werden sich die neuen Vorstellungen leichter zu eigen machen können, da sie darin durch keinerlei vorgefaßte Meinungen behindert sind. Ich habe gesagt, daß wir für die Gravitation ein „Bild“ gefunden haben, doch handelt es sich dabei um ein Bild, das eher analytisch beschrieben werden muß, als daß es anschaulich erfaßt werden

kann. Unsere gewöhnliche Vorstellung von Krümmung ist mit dem Begriff einer Oberfläche verknüpft, d. h. einer zweidimensionalen Mannigfaltigkeit, die in einem dreidimensionalen Raum eingebettet ist. Die absolute Krümmung in jedem Punkt ist durch eine einzige Größe, den sphärischen Krümmungsradius, gegeben. Die raumzeitliche Welt aber ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, eingebettet in — nun in so viele Dimensionen, als sie neue Wege, sich zu krümmen, finden kann. Tatsächlich ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit erstaunlich erfinderisch in der Entdeckung neuer Krümmungsmöglichkeiten, und noch sechs weitere Dimensionen sind erforderlich, bis alle Möglichkeiten erschöpft sind. Wir haben es somit im ganzen mit einer zehndimensionalen Mannigfaltigkeit zu tun. Und es sind sogar für jeden Punkt 20 verschiedene Maßzahlen notwendig, um die bestimmte Art und den Betrag der Krümmung daselbst angeben zu können. Diese Maßzahlen heißen Krümmungskoeffizienten. Zehn dieser Koeffizienten sind vor den andern zehn besonders ausgezeichnet.

Das Einsteinsche Gravitationsgesetz sagt aus, daß die zehn Hauptkoeffizienten der Krümmung im leeren Raume gleich Null sind.

Wenn überhaupt keine Krümmung vorhanden wäre, d. h. wenn alle Koeffizienten Null wären, so gäbe es auch keine Gravitation. Die Körper würden sich geradlinig und gleichförmig bewegen. Wenn andererseits die Krümmung durch kein Gesetz eingeschränkt wäre, d. h. wenn alle Krümmungskoeffizienten beliebige Werte annehmen könnten, würde auch die Gravitation vollkommen willkürlich und durch keinerlei Gesetz geregelt in Erscheinung treten. Die Körper würden ganz beliebige Bewegungen ausführen. Einstein wählt nun einen Mittelweg, indem er die Bedingung aufstellt, daß zehn Koeffizienten gleich Null, die übrigen aber willkürlich sind. Das Resultat ist eine Welt, in der die Gravitation einem Gesetze folgt. Die Krümmungskoeffizienten zerfallen ganz natürlich in zwei Gruppen von je zehn, so daß die Wahl der Koeffizienten, die gleich Null gesetzt werden, sich ohne Schwierigkeit ergibt.

Dem Laien mag es erstaunlich scheinen, daß ein exaktes Naturgesetz einige der Koeffizienten unbestimmt läßt. Dies ist jedoch notwendig, damit wir das Gesetz auf einen be-

stimmten Fall anwenden können, indem wir diese Koeffizienten gemäß den speziellen Bedingungen des Falles bestimmen. Ein allgemeines Gesetz beherrscht eine unbegrenzte Zahl von Spezialfällen. Das Verschwinden der zehn Hauptkoeffizienten findet überall im leeren Raume statt, gleichgültig, ob ein oder mehrere gravitierende Körper vorhanden sind. Die anderen zehn Koeffizienten können verschiedene Werte annehmen und sind entsprechend dem Spezialfall zu berechnen, der zur Untersuchung steht. Daran mögen Sie erkennen, daß mit der Aufstellung und mathematischen Formulierung des Einsteinschen Gravitationsgesetzes noch bei weitem nicht alles erreicht ist, und daß es noch ein langer Weg ist bis zur Anwendung dieses Gesetzes auch nur auf den einfachsten praktischen Fall. Jedenfalls aber ist das Gesetz von Hunderten von Mathematikern auf das sorgfältigste geprüft worden und wir können sicher sein, daß es mathematisch einwandfrei ist. Wir können also jetzt daran gehen, die Übereinstimmung des Gesetzes mit der Erfahrung zu untersuchen. Dabei zeigt sich, daß das Einsteinsche Gravitationsgesetz in erster Annäherung sich völlig mit dem Newtonschen deckt, so daß im wesentlichen alle Beweise, die das neue Gesetz bestätigen können, die gleichen sind, die für die Geltung des alten Gesetzes sprechen. Aber es gibt drei entscheidende astronomische Erscheinungen, bei denen der Unterschied zwischen den Aussagen beider Gesetze groß genug ist, um durch Beobachtung festgestellt zu werden. Und die Beobachtung dieser Erscheinungen spricht zugunsten Einsteins und gegen Newton*.

Eine physikalische Theorie wird nur dann Glauben finden, wenn alle ihre Voraussagen in Übereinstimmung mit der Erfahrung stehen, soweit sich nicht eine vernünftige Erklärung für eine etwaige Nichtübereinstimmung ergibt. Es ist somit außerordentlich wichtig, daß das Einsteinsche Gravitationsgesetz dieser äußerst subtilen astronomischen Prüfung hat standhalten können, bei der das Gesetz Newtons gerade zu versagen beginnt. Trotzdem ist das Versagen des alten Gesetzes gegenüber diesen astronomischen Be weisen nicht der ausschlaggebende Grund dafür, daß wir

* Eine dieser Erscheinungen — die Verschiebung der Spektrallinien nach dem roten Ende des Spektrums in dem von der Sonne und den Sternen ausgesandten Licht im Vergleich zu den Linien irdischer Lichtquellen — ist mehr als Beweis für die Einsteinsche Theorie als für sein Gravitationsgesetz aufzufassen.

uns von dem Gesetze Newtons losgesagt haben. Dieser liegt vielmehr darin, daß das alte Gesetz nicht Antwort auf die Fragen gibt, die wir von unserer neu gewonnenen, dem Newtonschen Geist ganz fernliegenden Einstellung aus an die Natur stellen. Oder in anderen Worten: Astronomische Untersuchungen haben erwiesen, daß innerhalb gewisser Genauigkeitsgrenzen sowohl das Gesetz Einsteins wie das Newtons richtig sind. Wenn das Newtonsche Gravitationsgesetz (angenähert) bestätigt wird, so wird damit eine Aussage gemacht über gewisse Erscheinungen relativ zu einem bestimmten raumzeitlichen Bezugssystem. Doch liegt kein Grund vor, gerade diesem System eine besondere Wichtigkeit zuzuschreiben. Wenn jedoch das Einsteinsche Gravitationsgesetz (angenähert) bestätigt wird, so bedeutet dies eine Aussage über die absoluten Eigenschaften der Welt, die für alle Bezugssysteme wahr ist. Für alle, welche bestrebt sind, hinter die Welt der Erscheinungen zu sehen, bedeutet somit die Einsteinsche Aussage ungleich mehr als die Newtons, denn sie zieht aus den beobachteten Tatsachen einen Schluß mit wirklichem physikalischen Inhalt im Gegensatz zu der bloßen Feststellung einer mathematischen Merkwürdigkeit. Die Tatsache, daß das Einsteinsche Gesetz sich als bessere Näherung erwiesen hat, ermutigt uns in unserer Anschauung, daß das Forschen nach dem Absoluten der beste Weg ist zum wirklichen Verständnis der relativen Welt der Erscheinungen. Aber auch wenn der Erfolg des neuen Gesetzes weniger unmittelbar gewesen wäre, hätten wir dieses Fragen nach dem Absoluten nicht aufgegeben.

Ich glaube, Newton selbst würde Freude darüber empfinden, daß 200 Jahre nach seinem Tode „dem Ozean unentdeckter Wahrheiten“ ein weiteres Stück Neuland abgerungen worden ist. Er würde uns nicht tadeln, daß wir seine Formeln nicht blind anwenden, sondern den inzwischen angehäuften Schatz des Wissens sowie die besonders günstigen Umstände, die ihm nicht beschieden waren, voll ausnützen.

Ich möchte von einer Beschreibung der drei Beweise des Einsteinschen Gesetzes an dieser Stelle absehen, da sie hinreichend bekannt sein dürften und außerdem in jedem der zahllosen Bücher über die Relativitätstheorie nachgeschlagen werden können. Nur über die Wirkung der Gravitation auf Lichtstrahlen, die den einen der Beweise betrifft, will ich einige Worte sagen. Wenn Lichtstrahlen an einem Körper von großer Masse, wie z. B. der Sonne, vorbeigehen, werden

sie um einen kleinen Winkel abgelenkt. Dies ist ein neuer Beweis dafür, daß das Bild einer Zugkraft, das Newton für die Gravitation gebraucht, unzutreffend ist. Man kann Lichtstrahlen nicht aus ihrer Bahn ablenken, indem man einen Zug auf sie ausübt, und so muß eine andere Darstellung für das ablenkende Agens gesucht werden.

Das Bewegungsgesetz. Erinnern Sie sich noch an Ihren ersten Mechanikunterricht, bevor Ihr Lehrer voll Eifer die natürliche Ahnung des wahren Sachverhaltes in Ihnen ausgerottet hat? Sie lernten das erste Bewegungsgesetz:

„Jeder Körper verharrt in seinem Zustande der Ruhe oder gleichförmiger Bewegung in geradliniger Bahn, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern.“

Wahrscheinlich hatten Sie vorher gedacht, Bewegung sei etwas, das sich von selbst erschöpft. Ihr Fahrrad hört von selbst zu laufen auf, wenn Sie keine Kraft anwenden, es in Gang zu halten. Der Lehrer hat Sie dann ganz richtig auf die Kräfte aufmerksam gemacht, die das Fahrrad zum Stehen bringen. Wahrscheinlich führte er auch das Beispiel von dem auf einer Eisfläche gleitenden Steine an, um Ihnen zu zeigen, daß die Bewegung länger anhält, sobald die widerstrebenden Kräfte vermindert sind. Aber auch Eis übt einen gewissen Reibungswiderstand aus. Warum hat der Lehrer das Beispiel nicht konsequent durchgeführt und alle widerstehenden Kräfte vollkommen vermieden, indem er den Stein in den leeren Raum warf? Unglücklicherweise ist in diesem Fall die Bewegung des Steines nicht geradlinig und gleichförmig. Der Stein beschreibt eine Parabel. Wenn Sie diesen Einwurf gemacht hätten, würde Ihnen der Lehrer sicher bedeutet haben, daß der Stein von einer unsichtbaren Kraft, der Gravitation, gezwungen wird, seinen Zustand der gleichförmigen geradlinigen Bewegung zu ändern. Woher aber wissen wir, daß diese unsichtbare Kraft existiert? Nun, wenn sie nicht existierte, würde doch der Stein seine gleichförmige geradlinige Bewegung beibehalten haben!

Ihr Lehrer ist nicht ohne Vorurteil an die Sache herangegangen. Er ist von vornherein entschlossen, die Idee der gleichförmigen geradlinigen Bewegung unter allen Umständen beizubehalten, und wenn wir ihm Körper zeigen, die seinem Gesetz nicht folgen, erfindet er einfach eine neue Kraft und macht sie für die Abweichung verantwortlich. Wir

können seine Fassung des ersten Bewegungsgesetzes folgendermaßen verbessern. Was er eigentlich sagen wollte, war:

„Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung in geradliniger Bahn, es sei denn, daß er es nicht tut.“

Reibung und Reaktionswiderstände sind sichtbare und absolute Einwirkungen, die den Bewegungszustand eines Körpers verändern können. Hiergegen sage ich gar nichts. Die Stöße der Moleküle können von jedem beobachtet werden, der diese Erscheinung eingehend untersucht, gleichgültig, welches Bezugssystem er benutzt. Wenn aber jedes Anzeichen für eine solche materielle Störung fehlt, wird das ganze Verfahren vollkommen willkürlich. Ohne Grund zerlegt man die Bewegung des Steines in zwei Teile und schreibt den einen Teil einer passiven Eigenschaft des Steines zu, die man Trägheit nennt, den anderen der Wirkung eines störenden Kraftfeldes. Die Annahme, daß der Körper in Wirklichkeit eine geradlinige Bahn beschreiben will, daß aber ein geheimnisvolles Agens ihn zwingt, einer krummen Bahn zu folgen, kommt zwar unserer Anschauung entgegen, ist aber durchaus unwissenschaftlich. Aus einer Eigenschaft werden zwei gemacht, und dann wundern wir uns, daß diese beiden einander proportional sind — daß die Gravitationskraft, die auf einen Körper ausgeübt wird, proportional seiner Trägheit oder Masse ist. Die Unzulässigkeit dieser Spaltung zeigt sich aber, sobald wir zugeben, daß alle Bezugssysteme einander gleichwertig sind. Ein Geschloß, das relativ zu einem Beobachter, der sich auf der Erdoberfläche in Ruhe befindet, eine Parabel beschreibt, wird relativ zu dem Mann im Lift eine gerade Linie beschreiben. Es würde unserem Lehrer nicht leicht fallen, den Mann im Lift, der den Apfel an der Stelle, wo er ihn losläßt, frei schweben sieht, entgegen dieser Beobachtung davon zu überzeugen, daß der Apfel von selbst in Wirklichkeit eine Bewegung nach oben ausführen würde, wenn nicht eine unsichtbare Kraft von genau abgemessener Größe ihn daran hinderte*.

Einsteins Bewegungsgesetz kennt keine derartige Aufspaltung des Geschehens. Es gibt gewisse Kurven, die auf einer gekrümmten Fläche unabhängig von jedem Bezugssystem definiert werden können, nämlich die geodätischen

* Der Leser wird erkennen, daß dies das Dogma ist, das der gravitationsgläubige Lehrer verkünden würde, falls er als Missionar zu dem Mann im Lift käme.

Linien oder die kürzesten Verbindungslinien auf der Fläche zwischen je zweien ihrer Punkte. Die geodätischen Linien unserer gekrümmten raumzeitlichen Welt bilden die natürliche Bahn, welche Körper beschreiben, falls sie keiner Störung unterliegen.

Wir beobachten einen Planeten, der eine elliptische Bahn um die Sonne beschreibt. Eine kurze Überlegung zeigt uns, daß infolge des gleichmäßigen Fortschreitens in der Zeitdimension die Ellipse sich zu einer Schraubenlinie auszieht, sobald wir die Zeit als vierte Dimension hinzufügen. Warum beschreibt der Planet diese Spiralbahn, anstatt sich auf einer geraden Linie zu bewegen? Dies liegt daran, daß er die kürzeste Bahn wählt. In der verzerrten Geometrie des gekrümmten Gebietes um die Sonne ist der Spiralweg kürzer als jede andere Verbindung zwischen denselben Punkten. Merken Sie den großen Unterschied in unserer Auffassung gegen früher? Die Gesetze Newtons sagen aus, daß der Planet bestrebt ist, eine geradlinige Bahn zu beschreiben, daß aber die Schwerkraft der Sonne ihn aus seiner Bahn zieht. Einstein sagt, daß der Planet bestrebt ist, den kürzesten Weg zu nehmen, und daß er dies auch tut.

Dies ist der allgemeine Gedankengang seines Gesetzes. Doch muß ich der Genauigkeit wegen noch eine ziemlich triviale Korrektur meiner Ausführungen vornehmen: Der Planet wählt nicht den kürzesten, sondern den l ä n g s t e n Weg.

Sie werden sich erinnern, daß die Punkte längs der Spur irgendeines materiellen Körpers (der sich notwendig langsamer fortbewegt als das Licht) zueinander in der absoluten Vergangenheit oder Zukunft liegen, niemals aber absolut „anderswo“. Infolgedessen setzt sich die Länge dieser Spur in vier Dimensionen aus zeitartigen Beziehungen zusammen und muß in Zeiteinheiten gemessen werden. Sie ist tatsächlich die Anzahl der Sekunden, wie sie eine Uhr anzeigt, die man auf dem die Bahn beschreibenden Körper befestigt*.

* Es wird vielleicht der Einwand erhoben werden, daß man nicht eine Uhr einen beliebig gekrümmten Weg beschreiben lassen kann, ohne daß Kräfte auf sie ausgeübt werden (z. B. das Hämmern von Molekülen). Aber diese Schwierigkeit ist genau derselben Art wie die Schwierigkeit, die entsteht, wenn wir die Länge einer Kurve mit einem geraden Maßstab messen, und wird auch in derselben Weise überwunden. Die übliche Theorie der „Rektifikation von Kurven“ bezieht sich auf diese Zeitspuren ebenso wie auf Raumkurven.

Die auf diesem Wege registrierte Anzahl von Sekunden kann sehr wohl von der auf einer anderen Verbindung zwischen denselben Punkten registrierten Zeit abweichen. Auf Seite 45 untersuchten wir die erlebte Zeit zweier Beobachter, von denen der eine zu Hause auf der Erde blieb, der andere aber mit außerordentlicher Geschwindigkeit nach einem entfernten Teil des Weltalls hin und zurück wanderte. Der erste verzeichnete inzwischen eine Zeitdauer von 70 Jahren, während für den schnellen Wanderer bei seiner Rückkehr nur ein Jahr verstrichen war. Beachten Sie wohl, daß gerade der Beobachter, der sich in Ruhe von der Erde auf ihrer ungestörten Bahn mitnehmen läßt, die längste Zeit registriert bzw. erlebt. Der andere aber, dessen Bahn gewaltsam geändert werden mußte, um ihn wieder zurückzuführen, hat inzwischen nur ein Jahr erlebt. Und dieser Verkürzung der Zeit ist keine Grenze gesetzt. Würde die Geschwindigkeit unseres Weltenwanderers sich der Lichtgeschwindigkeit nähern, so würde die erlebte Zeit bis auf Null reduziert werden. Es gibt in der raumzeitlichen Welt als ausgezeichneten Wert nicht eine kürzeste Spur, wohl aber eine längste. Wenn die Erde, statt ihre gewöhnliche Bahn zu beschreiben, plötzlich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Weltenraum sausen würde, könnte sie vom 1. Januar 1930 bis zum 1. Januar 1931 in Null Zeit gelangen, d. h. in Null von den Sekunden, die von einem mitfahrenden Beobachter an einer mitgenommenen Uhr abgelesen werden, obgleich man nach „Sternwartenzeit“ ein volles Jahr rechnen würde. Zum Glück tut unsere Erde so etwas nicht, denn es besteht ein Spezialabkommen in dem Handelsvertrag aller Materie untereinander, daß zu jedem Unternehmen die längste mögliche Zeit gebraucht werden muß⁹.

Bei der Berechnung von Gestirnbahnen und ähnlichen Problemen müssen somit zwei Gesetze in Betracht gezogen werden. Zunächst wird die Krümmung der Raumzeit mit Hilfe von Einsteins Gravitationsgesetz bestimmt, d. h. unter Benutzung der Tatsache, daß die zehn Hauptkrümmungskoeffizienten gleich Null sind. Sodann muß die Bewegung des Planeten durch das gekrümmte Gebiet mit Hilfe des Einsteinschen Bewegungsgesetzes berechnet werden, d. h. entsprechend der Regel, daß der Planet der längsten möglichen Spur folgt. So weit ist das Verfahren analog den Berechnungen, die man mit Hilfe des Gravitationsgesetzes und des Bewegungsgesetzes von Newton macht. Doch in einer

⁹ Eddington

wichtigen Beziehung sind die Einsteinschen Gesetze ausgezeichnet: Einsteins Bewegungsgesetz läßt sich aus seinem Gravitationsgesetz ableiten. Die Bestimmung der Planetenbahn beruht auf einem einzigen Gesetz, obgleich sie aus Bequemlichkeitsgründen in zwei Schritten geschieht.

Ich möchte Ihnen nun in großen Zügen verständlich zu machen suchen, wie es möglich ist, daß ein Gesetz, welches die Krümmung des leeren Raumes bestimmt, ohne Hinzunahme weiterer Bedingungen auch die Bahn materieller Teilchen festlegt. Abb. 5 zeigt zwei solche „Partikel“ in der vierdimensionalen Welt, nämlich Dich und Mich. Wir sind nicht leerer Raum, und so unterliegt die Art der Krümmung, die für unsere Gestaltung in Betracht kommt, keinerlei Einschränkung. Tatsächlich ist es gerade unsere ungewöhnliche Krümmungsweise, die uns von leerem Raum unterscheidet. Wir sind sozusagen zwei Falten in der vier-

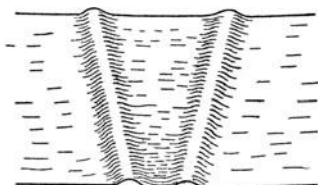


Abb. 5

dimensionalen Welt an einer Stelle, wo sie sich etwas zusammenbauscht. Der reine Mathematiker würde uns in seiner wenig schmeichelhaften Ausdrucksweise als „Singularitäten“ bezeichnen. Diese zwei nichtleeren faltigen Erhebungen sind durch leeren Raum miteinander verbunden, der frei von den Krümmungsarten sein muß, die durch die zehn Hauptkrümmungskoeffizienten bestimmt werden. Es entspricht nun unserer ganz gewöhnlichen Erfahrung, daß der Stoff zu einem Kleidungsstück, wenn er an einer Stelle Falten schlägt, auch im übrigen Teil widerspenstig wird und nicht so glatt liegen will, wie wir es gern möchten. Sie werden daher einsehen, daß es sehr wohl unmöglich sein kann, wenn zwei solche faltige Erhebungen wie in Abb. 5 in der vierdimensionalen Welt vorhanden sind, sie durch ein dazwischenliegendes Tal zu verbinden, das keinerlei unerlaubte Krümmung aufweist. Es ist auch in der Tat unmöglich, d. h.

es ist nicht möglich, daß zwei vollkommen gerade Falten als einzige in der Welt vorhanden sind, denn es ist unmöglich, sie durch leeren Raum miteinander zu verbinden. Sobald die Falten aber ein klein wenig gegeneinander geneigt sind, kann die Zwischenregion wieder schön glatt liegen und dem Krümmungsgesetz Genüge leisten. Neigen sie sich jedoch zu stark, so erscheint sofort wieder die unerlaubte Ausbuchtung. Das Bewegungsgesetz vertritt gleichsam einen Schneider, der nur sehr schwer zufriedengestellt werden kann und nicht das geringste Fältchen in dem Hauptteil des Gewandes dulden will (außer von einer ganz bestimmten zugelassenen Art). Daher müssen die Nähte einen solchen Verlauf haben, daß jedes unerlaubte Fältchen vermieden wird. Auch Du und Ich müssen uns dieser Regel beugen, und so kommt es, daß unsere Spuren in der vierdimensionalen Welt aufeinander zu laufen. Ein außenstehender Beobachter würde die Bemerkung machen, dies sei ein Beispiel für das Gesetz der Anziehung zwischen zwei schweren Körpern.

Auf diese Weise gelangen wir zu einer neuen, aber der vorigen äquivalenten Auffassung davon, wie der Spiralweg der Erde durch die vierdimensionale Welt zustande kommt. Die Ursache ist darin zu suchen, daß zwei faltige Erhebungen (die Spur der Sonne und die der Erde) notwendig so angeordnet sein müssen, daß jede nicht erlaubte Krümmung des leeren Teiles der Welt vermieden wird. Die Sonne, als die größere Falte, bleibt fast in gerader Bahn, aber die Erde, als die wesentlich kleinere von beiden, muß sich auf den Abhängen der Sonnenerhebung schon beträchtlich hin und her winden.

Angenommen, die Erde würde dem Schneider trotzen und eine gerade Bahn einschlagen, so würde das in dem Gewande eine schreckliche Falte hervorrufen; und da nun einmal Falten unvereinbar mit den Gesetzen des leeren Raumes sind, müßte irgend etwas dort sein, wo die Falte verläuft. Dies „Etwas“ braucht nicht Materie im strengen Sinne zu sein. Das, was den Raum erfüllen kann, so daß er nicht leer im Sinne des Einsteinschen Gesetzes ist, kann Masse (oder Energie als Äquivalent der Masse) sein oder Impuls oder Kraft. In dem vorliegenden Fall würde die Falte wohl einer Kraft entsprechen, und diese Annahme ist durchaus vernünftig. Sich selbst überlassen, folgt die Erde ihrer eigenen gekrümmten Bahn. Würde jedoch irgendeine Kraft zwischen Sonne und Erde neu hinzugefügt werden, so könnte die Erde

ebensogut eine andere Bahn beschreiben. Wenn wir beobachten würden, daß ein Planet plötzlich in gerader Bahn davonsaust, so müßten wir nach dem alten wie nach dem neuen Gesetze gleichermaßen folgern, daß irgendeine Kraft die Ursache dieses sonderbaren Benehmens sei. Es ist wahr, daß hierbei die kausale Folge offenbar auf den Kopf gestellt ist. Nach unserer Theorie scheint nämlich die Kraft dadurch hervorgerufen zu sein, daß der Planet die falsche Bahn nimmt, während es der gewöhnlichen Auffassung entspricht, daß der Planet die falsche Bahn einschlägt, weil eine Kraft auf ihn einwirkt. Doch ist dies eine Vertauschung ganz harmloser Art, wie sie innerhalb der Physik erster Art häufig genug vorkommt. Der Unterschied zwischen Ursache und Wirkung hängt von der Richtung des „Pfeiles der Zeit“ ab und kann daher nur durch Bezugnahme auf die Entropie festgestellt werden. Wenn es sich um Gesetze erster Art handelt, brauchen wir der Frage nach der Kausalität nicht viel Aufmerksamkeit zu widmen, denn es ist bei diesen immer ebenso möglich, daß wir eine Welt betrachten, die auf den Kopf gestellt ist.

Ogleich wir noch immer am Anfang der allgemeinen Relativitätstheorie stehen, brauche ich auf diese rein fachwissenschaftlichen Fragen nicht weiter einzugehen. Der Rest des Kapitels soll der Aufhellung von mehr elementaren Dingen gewidmet sein.

Die Relativität der Beschleunigung. Die Beweisführung in diesem Kapitel beruht auf der Relativität der Beschleunigung. Der Apfel hat eine Beschleunigung von $9,81 \text{ m/sec}^2$ (Geschwindigkeitszunahme um $9,81 \text{ m/sec}$ in der Sekunde) relativ zu einem gewöhnlichen Beobachter, aber die Beschleunigung Null relativ zu dem Manne im Lift. Wir schreiben also dem Apfel die eine oder die andere Beschleunigung zu, je nach dem Gerüst, von dem aus wir ihn zufällig betrachten. Keine dieser Beschleunigungen kann jedoch herausgegriffen und als „wahre“ oder absolute Beschleunigung bezeichnet werden. Diese Erkenntnis führt zur Verwerfung der Auffassung Newtons, der die Beschleunigung von $9,81 \text{ m/sec}^2$ herausgriff und zur Begründung ein störendes Agens von der erforderlichen Stärke erfand.

Es dürfte lehrreich sein, an dieser Stelle einen Einwand zu erörtern, der, wie ich glaube, ursprünglich von Lenard gegen die Relativitätstheorie erhoben wurde. Ein Zug fahre

mit einer Geschwindigkeit von 80 km in der Stunde an einer Station vorbei. Da Geschwindigkeit relativ ist, so kommt es auf dasselbe heraus, ob wir sagen, der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 80 km in der Stunde an der Station vorbei, oder die Station bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit an dem Zuge vorbei. Wir wollen nun annehmen, daß der Zug binnen weniger Sekunden zum Stehen gebracht wird, wie es zuweilen bei Eisenbahnunfällen vorkommt. Es hat eine Änderung der Geschwindigkeit, d. h. eine Beschleunigung stattgefunden, welcher Ausdruck auch eine Verzögerung bedeuten kann. Wenn Beschleunigung relativ ist, so können wir nach Belieben den Vorfall als Beschleunigung des Zuges relativ zur Station oder als Beschleunigung der Station relativ zum Zuge beschreiben. Warum aber werden durch das plötzliche Halten die Personen im Zuge empfindlich betroffen und nicht die auf dem Bahnsteig?

Ein ähnlicher Einwand wurde auch aus der Schar meiner Hörer laut: „Die Reise zwischen Edinburgh und Cambridge muß sehr ermüdend für Sie gewesen sein. Uns ist diese Ermüdung durchaus verständlich, wenn Sie nach Edinburgh fahren; aber warum sollten Sie sich ermüdet fühlen, wenn Edinburgh zu Ihnen kommt?“ Darauf habe ich folgendes zu erwidern: Die Ermüdung entsteht dadurch, daß ich 9 Stunden, in einem Eisenbahnabteil eingeschlossen, hin und her gerüttelt wurde. Dabei macht es gar keinen Unterschied, ob ich inzwischen nach Edinburgh gereist bin oder Edinburgh zu mir. Bewegung ermüdet niemanden. Mit der Erde als Fahrzeug reisen wir mit einer Geschwindigkeit von 30 Kilometern in der Sekunde rund um die Sonne; die Sonne trägt uns mit 20 Kilometer in der Sekunde durch das Milchstraßensystem; das Milchstraßensystem aber mit einer Geschwindigkeit von 420 Kilometern pro Sekunde durch die Menge der Spiralnebel; die Spiralnebel... Wenn Bewegung ermüden könnte, wir müßten wohl bald zu Tode ermüdet sein!

Ebensowenig wird irgend jemand durch einen Wechsel der Bewegung, d. h. durch Beschleunigung gestört, auch nicht, wenn dies (im Newtonschen Sinne) eine absolute Beschleunigung ist. Spüren wir auch nur das geringste von einer Bewegungsänderung, wenn die Erde ihre Kurve um die Sonne fährt? Wohl merken wir es, wenn der Eisenbahnzug eine Kurve fährt, aber was wir empfinden, ist nicht der Wechsel der Bewegung oder etwas, das notwendig damit verbunden

ist, sondern etwas, das rein zufällig mit gekrümmten Eisenbahnschienen verknüpft ist, nicht aber mit der ebenfalls gekrümmten Bahn der Erde. Die Ursache unseres Unbehagens bei dem Eisenbahnunfall ist leicht aufgedeckt. Etwas stieß gegen den Zug, d. h. die Lokomotive wurde von einem Schwarm von Molekülen bombardiert, und das Bombardement breitete sich über den ganzen Zug aus, einschließlich der Fahrgäste. Die Ursache ist deutlich erkennbar — grob, materiell, absolut —, und jedermann, gleichgültig, welches Bezugssystem er benutzt, kann unmittelbar erkennen, daß sie den Zug und nicht die Station betrifft. Abgesehen davon, daß diese Ursache an den Verletzungen der Reisenden schuld war, bewirkte sie die relative Beschleunigung zwischen Zug und Station. Jedoch hätte diese letztere Wirkung ebensogut durch ein Bombardement der Moleküle auf die Station hervorgerufen sein können, wenn es auch in diesem Beispiel nicht der Fall war.

Wahrscheinlich wird der kritische Leser seinen Widerspruch noch nicht aufgeben und einwenden: „Ist Ihre Behauptung nicht gar zu paradox, daß das Bombardement der Moleküle gegen den Zug eine Beschleunigung der Station hervorrufen kann — und somit auch der Erde und des ganzen übrigen Weltalls? Zugegeben, relative Beschleunigung ist gewissermaßen eine Beziehung mit zwei Enden, und es mag zuerst scheinen, daß wir freie Wahl hätten, welches Ende wir ergreifen sollen. In unserem Fall aber zeigt doch die Ursache der Beschleunigung, nämlich das Bombardement der Moleküle auf den Zug, deutlich an, welches Ende das richtige ist, und wenn Sie auf ihrer Behauptung beharren, es stehe Ihnen frei, auch das andere Ende zu wählen, so kann ich das nur als ganz paradoxe Phantasterei bezeichnen.“

Wenn es eine Absurdität sein soll, das falsche Ende der Beziehung zu ergreifen, so ist diese Absurdität in unserer üblichen Sprech- und Denkweise zu suchen. In Wirklichkeit ist Ihre Annahme weit revolutionärer als alles, was Einstein je zu behaupten gewagt hat. Betrachten wir das Beispiel eines fallenden Steines. Es ist eine relative Beschleunigung von $9,81 \text{ m/sec}^2$ vorhanden — entweder vom Stein relativ zu uns oder von uns relativ zum Stein. Welches Ende der Beziehung müssen wir nun wählen? Zeigt uns wieder das Bombardement der Moleküle das richtige Ende an? Schön, der Stein wird nicht bombardiert, er fällt frei im leeren Raum. Wohl aber werden wir von den Molekülen des

Bodens, auf dem wir stehen, dauernd bombardiert. Also haben wir die Beschleunigung, und der Stein ist ohne Beschleunigung, so wie es der Mann im Lift angenommen hat. Ihr Einwand würde bedeuten, daß das Bezugssystem des Mannes im Lift das einzig berechnigte sei. Ich bin mit meiner Behauptung nur so weit gegangen, es für gleichberechnigt mit unserem eigenen gewöhnlichen Bezugssystem zu halten.

Von Ihrem Standpunkt aus müssen Sie das Zeugnis jenes Trunkenboldes gelten lassen, der erklärte, „das Straßenpflaster sei plötzlich in die Höhe geflogen und habe ihn verletzt“, und den entgegenstehenden Bericht des Polizisten müssen Sie als „paradoxe Phantasterei“ verwerfen. In Wirklichkeit hatte es sich so abgespielt, daß das Pflaster mit ständig zunehmender Geschwindigkeit den Mann durch den Raum verfolgte, indem es ihn vor sich herschob, so daß beide die gleiche relative Stellung zueinander beibehielten. Dann geschah es plötzlich, daß der Mann, infolge eines unglücklichen Schwankens seiner Achse, seine Geschwindigkeit nicht mehr genügend steigern konnte, so daß der Pflasterstein ihn überholte und mit seinem Kopfe in unliebsame Berührung kam. Bitte, mißverstehen Sie mich nicht. Dies ist Ihre Auffassung, d. h. die Auffassung, die ich mir erlaubt habe, Ihnen in den Mund zu legen, weil Sie folgerichtig das Bezugssystem des Mannes im Lift anerkennen müssen. Es ist die konsequente Durchführung des Einwandes, der meistens gefühlsmäßig gegen die Relativitätstheorie erhoben wird. Einstein aber stellt sich so dazu, daß er diese Auffassung als vollkommen berechnigte Auslegung des Vorfalles mit dem Betrunknen ansieht, doch die gewöhnliche Ansicht, wie sie der Polizist vertreten hat, für ebenso berechnigt hält. So bemüht er sich als gerechter Richter beiden Parteien gleiches Recht zuzusprechen.

Zeit-Geometrie. Einsteins Gravitationsgesetz ist eine Aussage über eine geometrische Größe, die *K r ü m m u n g*, während Newtons Gesetz etwas über eine mechanische Größe, die *K r a f t*, aussagt. Um zu verstehen, wie die Relativitätstheorie dazu kam, die Welt in dieser Weise zu geometrisieren, müssen wir etwas zurückgreifen.

Geometrie ist die Wissenschaft von den Eigenschaften des Raumes und hatte die Zeit bisher nicht in ihren Bereich mit eingeschlossen. Nun aber sind Raum und Zeit so eng

miteinander verwoben, daß eine Wissenschaft entstehen muß — gewissermaßen eine erweiterte Geometrie —, welche beide umfaßt. Der dreidimensionale Raum ist nur ein Schnitt durch die vierdimensionale Raum-Zeit, und dieser Schnitt kann sogar in verschiedenen Richtungen verlaufen, verschiedene Räume bildend, die verschiedene Beobachter benutzen. Es ist kaum möglich, die Ansicht aufrechtzuhalten, daß nur ein ganz bestimmter Schnitt in einer ganz bestimmten Richtung Gegenstand der Geometrie sein kann, daß aber für Schnitte, die sich nur ganz wenig von diesem unterscheiden, eine völlig andere Wissenschaft eingeführt werden muß. Die Geometrie der Welt umfaßt die Zeit ebensowohl wie den Raum.

Sie werden sich erinnern, daß trotz dieser engen Verbundenheit von Raum und Zeit ein absoluter Unterschied zwischen räumlichen und zeitlichen Beziehungen zweier Ereignisse besteht. Drei Ereignisse bilden ein Raum-Dreieck, wenn die drei Seiten räumlichen Beziehungen entsprechen, d. h. wenn die Ereignisse zueinander absolut anderswo liegen *. Drei Ereignisse bilden ein Zeit-Dreieck, wenn die drei Seiten zeitlichen Beziehungen entsprechen, d. h. wenn die drei Ereignisse absolut vor- bzw. absolut nacheinander liegen. (Es sind auch gemischte Dreiecke möglich, von denen zwei Seiten zeitartig und eine raumartig sind oder umgekehrt.) Für Raum-Dreiecke lautet ein bekannter Satz, daß die Summe von zwei beliebigen Seiten immer größer ist als die dritte Seite. Es gibt einen analogen Satz auch für Zeit-Dreiecke, nur mit dem bedeutsamen Unterschied, daß für ein Zeit-Dreieck die Summe von zwei bestimmten Seiten (nicht von zwei beliebigen Seiten) kleiner ist als die dritte. Es mag schwer sein, sich so ein Dreieck vorzustellen, der Satz entspricht aber trotzdem den Tatsachen.

Um völlig sicher zu gehen, daß wir den Sinn dieses geometrischen Satzes richtig erfassen, wollen wir zunächst nochmals ein Raum-Dreieck betrachten. Der Satz bezieht sich auf die Länge der Seiten und es wird nützlich sein, wenn wir uns meine fiktive Auseinandersetzung mit den beiden Studenten über Längenmessung ins Gedächtnis

* Dies würde ein Augenblicks-Raum-Dreieck sein, während ein über gewisse Zeit dauerndes Dreieck eine Art vierdimensionales Prisma darstellt.

rufen (S. 30). Glücklicherweise ist jetzt jede Zweideutigkeit vermieden, da das Dreieck aus drei Ereignissen einen ebenen Schnitt durch die Welt bestimmt, und nur für einen solchen Schnitt ist das Dreieck rein räumlich. Der Satz bedeutet dann folgendes:

„Wenn wir mit einem Maßstab von A bis B und von B bis C messen, so wird die Summe unserer Ablesungen größer sein als die Ablesung, die wir erhalten, wenn wir mit dem Maßstab von A bis C messen.“

Für ein Zeit-Dreieck muß die Messung mit einem Instrument ausgeführt werden, das imstande ist, die Zeit zu messen. Dann bringt der Satz folgende Beziehung zum Ausdruck:

„Wenn wir mit einer Uhr von A bis B und von B bis C messen, so wird die Summe unserer Ablesungen kleiner sein als die Ablesung, die wir erhalten, wenn wir mit der Uhr von A bis C messen.“

Um mit einer Uhr die Zeit zwischen einem Ereignis A und einem Ereignis B messen zu können, müssen wir in ähnlicher Weise die Uhr justieren, wie wir es mit dem Maßstab tun, wenn wir ihn entlang der Linie AB anlegen. Worin besteht diese analoge Justierung? In beiden Fällen ist der Zweck, das Meßinstrument in möglichst nahe Berührung sowohl mit A als mit B zu bringen. Für die Uhr bedeutet dies folgendes: Nachdem mit ihrer Hilfe das Ereignis A registriert wurde, muß sie mit genau der richtigen Geschwindigkeit fortbewegt werden, damit sie den Ort von B gerade in dem Augenblick erreicht, in dem B stattfindet. Somit ist die Geschwindigkeit der Uhr vorgeschrieben. Aber achten Sie bitte noch auf einen weiteren Umstand: Wenn wir mit einem Maßstab von A nach B gemessen haben, können wir ihn umkehren und erhalten, wenn wir nun von B nach A messen, den gleichen Wert. Aber eine Uhr können Sie nicht „umkehren“, d. h. Sie können nicht bewirken, daß sie die Zeit in umgekehrter Richtung angibt. Dies ist insofern wichtig, als dadurch bestimmt wird, die Summe welcher beiden Seiten geringer ist als die dritte. Wenn Sie die falschen Seiten wählen, würde sich der Satz auf eine unmögliche Messung beziehen und sinnlos werden.

Erinnern Sie sich an unseren schnellen Wanderer (S. 44), der zu einem entfernten Stern reiste und bei seiner

Rückkehr so lächerlich jung geblieben war? Er war gleichsam eine Uhr, die zwei Seiten eines Zeit-Dreiecks gemessen hat. Und so zeigte er eine geringere Zeit an als der zu Haus gebliebene Beobachter, der als Uhr die dritte Seite gemessen hat. Muß ich erst begründen, warum ich die beiden als Uhren ansehe? Wir alle sind Uhren, deren Gesichtszüge den Ablauf der Zeit verkünden. Doch soll dieser Vergleich nur ein Beispiel für den geometrischen Satz über Zeit-Dreiecke sein (der als Spezialfall von Einsteins Gesetz des längsten Weges aufgefaßt werden kann). Das Resultat ist auch auf dem gewöhnlichen mechanischen Wege leicht erklärbar. Alle Teilchen im Körper des Wanderers nahmen infolge seiner hohen Geschwindigkeit an Masse zu nach dem Gesetz, das bereits besprochen und experimentell bewiesen wurde. Sie wurden dadurch träger und der Wanderer lebte langsamer, beurteilt nach unserer irdischen Zeitrechnung.

Die Erweiterung der gewöhnlichen Raum-Geometrie zu einer Geometrie, die Raum und Zeit gleicher Weise umfaßt, darf nicht bloß als Hinzufügung einer vierten Dimension zur euklidischen Geometrie angesehen werden, denn die geometrischen Sätze für die Zeit sind zwar analog, aber nicht identisch mit den Sätzen, die Euklid für den Raum aufgestellt hat. Doch geht der Unterschied zwischen Zeit-Geometrie und Raum-Geometrie nicht besonders tief, und der Mathematiker hilft sich leicht über ihn hinweg durch Benutzung des Symbols $\sqrt{-1}$. Wir bezeichnen auch diese erweiterte Geometrie (etwas willkürlich) noch als euklidisch, oder, wenn wir den Unterschied hervorheben wollen, als hyperbolische Geometrie. Der Ausdruck nichteuklidische Geometrie bezieht sich auf eine ungleich tiefergreifende Abänderung, die mit der Krümmung von Raum und Zeit verknüpft ist, durch welche wir jetzt die Erscheinung der Gravitation darstellen. Wir sind von der euklidischen Geometrie des Raumes ausgegangen und haben sie auf eine verhältnismäßig einfache Weise durch Hinzufügung der Zeitdimension erweitert. Aber auch diese Erweiterung enthebt uns noch nicht der Notwendigkeit, mit Gravitation zu rechnen, und wo immer Gravitationswirkungen beobachtet werden, zeigt dies an, daß auch die erweiterte Geometrie nicht exakt genug ist und die wahre Geometrie eine nichteuklidische ist, welche in derselben Weise den Verhältnissen eines gekrümmten Gebietes angepaßt ist, wie die euklidische Geometrie einem ebenen Gebiet.

Geometrie und Mechanik. Die Tatsache verdient besondere Beachtung, daß der Satz für Zeit-Dreiecke eine Behauptung über das Verhalten von Uhren bedeutet, die mit verschiedener Geschwindigkeit fortbewegt werden. Für gewöhnlich sind wir der Ansicht gewesen, das Verhalten von Uhren sei Gegenstand der Mechanik. Es hat sich nun als unmöglich erwiesen, die Geometrie auf den Raum allein zu beschränken, und wir mußten ihren Bereich erweitern. Aber statt des kleinen Fingers nahm sie gleich die ganze Hand und bemächtigte sich eines großen Teiles der Mechanik. Nun war kein Aufhalten mehr und die Geometrie hat allmählich die gesamte Mechanik in ihr Gebiet einbezogen. Auch an die Elektrodynamik hat sie sich bereits herangewagt. Ein Ideal schwebt uns vor, noch in weiter Ferne vielleicht, aber unwiderstehlich lockend, unsere gesamte Kenntnis von der physikalischen Welt werde sich einmal zu einer einzigen Wissenschaft vereinigen lassen, die vielleicht durch geometrische oder quasi-geometrische Begriffe ausdrückbar wird. Warum auch nicht? Alle Naturerkenntnis leitet sich aus Messungen ab, die mit allerlei Instrumenten gemacht werden. Die Meßinstrumente aber, die in den verschiedenen Forschungsgebieten Verwendung finden, unterscheiden sich keineswegs in irgendeiner fundamentalen Beziehung. Es ist kein Grund vorhanden, die Einteilung der Naturwissenschaften, wie sie auf früheren Stufen menschlichen Denkens entstand, als unabänderlich anzusehen.

Aber wenn auch die Mechanik geometrisch geworden ist, bleibt sie darum nicht weniger Mechanik. Nur die strenge Trennung zwischen Mechanik und Geometrie ist zusammengebrochen und die Eigenart beider erstreckt sich nunmehr über das gemeinsame Gebiet. Das scheinbare Überwiegen der Geometrie läßt sich in Wirklichkeit darauf zurückführen, daß diese Disziplin den reicheren und anpassungsfähigeren Wortschatz besitzt. Als nach der Verschmelzung von Geometrie und Mechanik eine doppelte Bezeichnungsweise sich erübrigte, wurden daher die erforderlichen Fachausdrücke im allgemeinen von der Geometrie übernommen. Tatsächlich aber entspricht der Geometrisierung der Mechanik auch eine Mechanisierung der Geometrie. Wie wir sahen, hat der obige Satz vom Raum-Dreieck grob materielle Folgen für das Verhalten von Maßstäben, die niemand richtig erkennen wird, der ihn rein mathematisch auffaßt.

Wir müssen unseren Geist von der Vorstellung befreien, das Wort Raum habe in der Naturwissenschaft irgend etwas mit Leere zu tun. Wie ich bereits auseinandersetzte, hat der Raum für den Physiker eine ganz andere Bedeutung. Der Physiker denkt dabei an Entfernung, Volumen usw., also an Größen, die physikalische Messungen darstellen, ebenso wie Kraft eine Größe ist, die eine physikalische Messung darstellt. Es darf also die (etwas naiv gefaßte) Behauptung, die Einsteinsche Theorie führe die Gravitationskraft auf eine bloße Eigenschaft des Raumes zurück, kein Mißverständnis hervorrufen. In keinem Fall faßt der Physiker den Raum als Leere auf. Wo nichts anderes mehr vorhanden ist, bleibt immer noch der Äther. Und die Physiker, die aus irgendeinem Grunde das Wort Äther nicht lieben, verstreuen auf das freigebigste mathematische Symbole durch das Vakuum. Ich nehme an, auch sie müssen sich irgend einen charakteristischen Hintergrund für diese Symbole vorstellen. Ich glaube, niemand denkt daran, irgend etwas aus dem vollkommenen Nichts zu formen, und sei es auch nur ein so relatives und schwer faßbares Ding wie die Kraft.

DIE GRAVITATION UND IHRE ERKLÄRUNG

Das Krümmungsgesetz. Es ist möglich, die Gravitation zu erklären. Aber die Einsteinsche Theorie gibt uns ursprünglich keine Erklärung der Gravitation. Wenn Einstein sagt, daß das Gravitationsfeld einer Krümmung von Raum und Zeit entspricht, so gibt er uns damit ein Bild, mit dessen Hilfe wir die nötige Einsicht in die Erscheinung gewinnen, um die verschiedenen beobachtbaren Folgen der Gravitation ableiten zu können. Doch läßt er die Frage offen, ob irgendein Grund für die Annahme vorliegt, daß der durch dieses Bild dargestellte Zustand der Dinge auch wirklich existiert. Die Beantwortung dieser Frage ist gemeint, wenn wir von einer Erklärung der Gravitation in tieferem Sinne sprechen.

Auf den ersten Blick scheint das neue Bild nicht viel für eine Erklärung übrig zu lassen. Es zeigt uns eine gewellte hügelige Welt im Gegensatz zu einer gravitationslosen Welt, die eben und gleichförmig wäre. Doch sicherlich bedarf die Existenz einer vollkommen ebenen Rasenfläche eher einer besonderen Erklärung, als das Vorhandensein eines hügeligen Feldes. Und ebenso wäre es schwieriger, einen genügenden Grund für die Existenz einer gravitationslosen Welt anzugeben, als für eine Welt mit Gravitation. Es ist kaum nötig, Rechenschaft über die Ursache einer Erscheinung abzulegen, die nur dann im Weltbilde fehlen könnte, wenn bei der Schöpfung besondere Vorsicht darauf verwendet worden wäre, sie zu vermeiden. Wäre die Krümmung vollkommen willkürlich, so würde dies das Ende für jede Erklärungsmöglichkeit bedeuten. Aber die Krümmung unterliegt einem Gesetz — dem Einsteinschen Gravitationsgesetz — und bei diesem müssen wir mit unserer Frage ansetzen. Gesetzmäßigkeit bedarf einer Erklärung, nicht aber Willkür. Unsere Wißbegierde wird nicht durch die Willkürlichkeit der zehn Hilfskoeffizienten der Krüm-

mung erregt, durch die sich die Welt von einer ebenen Welt unterscheidet, sondern durch das überall gleichmäßige Verschwinden der zehn Hauptkrümmungskoeffizienten.

Alle Erklärungen der Gravitation im Sinne Newtons waren zu zeigen bemüht, warum etwas, das ich respektloserweise einen Dämon genannt habe, in der Welt vorhanden ist. Eine Erklärung im Sinne Einsteins muß zeigen, warum etwas (das wir Hauptkrümmung nennen) in der Welt fehlt.

Im letzten Kapitel haben wir das Gravitationsgesetz in der Form ausgesprochen, daß die Hauptkrümmungskoeffizienten im leeren Raume gleich Null sind. Ich möchte dem Gesetz hier folgende, etwas veränderte Fassung geben:

Der Radius der sphärischen* Krümmung jedes dreidimensionalen Schnittes durch die Welt, der in irgendeiner Richtung an irgendeiner Stelle des leeren Raumes hindurchgelegt ist, hat immer dieselbe konstante Länge.

Abgesehen von der veränderten Form liegt auch tatsächlich ein kleiner Unterschied in dem Inhalte der beiden Fassungen vor. Die zweite entspricht einer späteren und, wie man glaubt, strengeren Formel, die Einstein zwei Jahre nach der Veröffentlichung seiner Theorie aufgestellt hat. Die Abänderung hat sich auf Grund der Erkenntnis als notwendig erwiesen, daß der Raum endlich und unbegrenzt ist (S. 84). Die zweite Fassung würde dem Inhalte nach mit der ersten identisch sein, wenn „unendliche Länge“ gesagt wäre statt „dieselbe konstante Länge“. Von einigen sehr gewagten Schätzungen abgesehen, wissen wir über die Größe dieser konstanten Länge nichts, als daß sie größer sein muß als die Entfernung des weitesten Sternnebels, also größer als ungefähr 10^{20} Kilometer. In den meisten Fällen wird es unnötig sein, zwischen einer so enormen Länge und einer unendlichen Länge zu unterscheiden, doch für dieses Kapitel ist die Unterscheidung wesentlich.

* Eine zylindrische Krümmung der Welt hätte nichts mit Gravitation zu tun, noch, soweit wir es beurteilen können, mit irgendeiner anderen Erscheinung, denn eine Zylindermantelfläche läßt sich ohne Verzerrung auf eine Ebene abrollen. Wir haben aber im letzten Kapitel die Krümmung gerade als Erklärung für die Verzerrung eingeführt, die bei der gewöhnlichen ebenen Darstellung der Welt in Erscheinung tritt. Die Krümmung muß daher vom Typus einer Kugel und nicht eines Zylinders sein.

Unsere Aufgabe ist es nun, zu dem lebendigen Sinn vorzudringen, der hinter der dunklen Phraseologie des oben ausgesprochenen Gesetzes liegt. Nehmen wir einmal an, Sie bestellen einen Hohlspiegel für ein Teleskop. Damit Sie genau das erhalten, was Sie brauchen, müssen Sie der Fabrik zwei Maße angeben: 1. die Öffnung und 2. den Krümmungsradius. Beides sind zum Spiegel gehörige Längen und beide sind zur Beschreibung notwendig, doch ist die Art ihrer Zugehörigkeit zu dem Spiegel ganz verschieden. Sie können einen Spiegel von 30 Meter Krümmungsradius bestellen und ihn als kleines Päckchen durch die Post zugestellt bekommen. In einem gewissen Sinn werden die 30 m Länge mit dem Spiegel mitbefördert, doch so, daß die Postbehörde nichts davon merkt. Die 30 m Länge sind der Oberfläche des Spiegels, also einem zweidimensionalen Kontinuum zugeordnet. Die raumzeitliche Welt ist ein vierdimensionales Kontinuum, und so werden Sie sich vielleicht den analogen Fall vorstellen können, daß auch einem kleinen Stück der Raumzeit in derselben Weise wie dem Stück Spiegel Längen zugeordnet sein können, die nichts mit der Größe oder Kleinheit des Stückes zu tun haben, aber nichtsdestoweniger einen wesentlichen Teil der Beschaffenheit dieses Ausschnitts der Welt bilden. In Anbetracht der zwei ExtraDimensionen sind aber der raumzeitlichen Welt erheblich mehr solche charakteristische Längen zugeordnet als der Spiegeloberfläche. Insbesondere gibt es nicht nur einen Hauptradius der sphärischen Krümmung, sondern einen besonderen Radius für jede mögliche Richtung, den ich der Kürze halber den „gerichteten Radius“ der Welt nennen möchte. Wir wollen nun annehmen, Sie bestellen ein Stückchen Raumzeit mit einem gerichteten Radius von 800 Trillionen Kilometer in der einen Richtung und von 1200 Trillionen Kilometer in einer anderen Richtung. Dann wird Ihnen die Natur zur Antwort geben: „Es tut mir leid, aber das führen wir nicht. Wir haben eine große Auswahl in anderer Beziehung, aber wir haben nichts, was in bezug auf den gerichteten Radius in verschiedenen Richtungen verschieden wäre. Ja, es hat sogar alles, was wir führen, einen Normalradius von x Trillionen Kilometer.“ Leider kann ich Ihnen nicht verraten, welche Zahl für x einzusetzen ist, denn das ist noch ein Geheimnis der Firma.

Die Tatsache, daß der gerichtete Radius, der, wie man glauben sollte, ohne weiteres von einem Punkt zum anderen

und von einer Richtung zur anderen verschiedene Werte annehmen könnte, einen einzigen Normalwert für die ganze raumzeitliche Welt hat, diese Tatsache bildet den Inhalt von Einsteins Gravitationsgesetz. Aus diesem Gesetz kann man die Bewegung der einzelnen Planeten mit mathematischer Strenge ableiten und z. B. die Finsternisse der nächsten tausend Jahre vorhersagen. Denn, wie wir gesehen haben, schließt Einsteins Gravitationsgesetz auch das Bewegungsgesetz ein. Newtons Gravitationsgesetz ist eine für die praktische Rechnung bequeme Approximation. Wir verstehen jetzt, was aus dem Einsteinschen Gesetz folgt. Was aber liegt ihm zugrunde? Was bedeutet diese unvorhergesehene Normung? Das zu erforschen, ist unsere nächste Aufgabe.

Die Relativität von Längen. Es gibt keine absolute Länge. Wir können den Betrag einer Länge nur durch das Verhältnis zu der Länge von etwas anderem ausdrücken*. Wenn wir also von der Länge des gerichteten Radius sprechen, so meinen wir seine Länge verglichen mit der Länge des Normalmeters. Und damit wir die beiden Längen vergleichen können, müssen sie sogar aneinander angelegt werden. „Fernvergleihung“ ist ebenso undenkbar wie „Fernwirkung“; sogar in verstärktem Maße, da Vergleichung eine weniger unbestimmte Vorstellung ist als Wirkung. Wir müssen also entweder das Normalmeter direkt an die zu messende Länge anlegen, oder aber irgendeinen Kunstgriff gebrauchen, von dem wir annehmen, daß er uns das gleiche Resultat liefert wie eine direkte Messung.

Ist es nun unbedingt sicher, daß ein Meterstab, den wir an einen anderen Punkt der raumzeitlichen Welt verlegen, immer noch genau ein Meter lang sein wird? Natürlich wird er das, denn als Normalmaß der Länge kann er nichts anderes als ein Meter sein. Aber bleibt er auch wirklich dasselbe Meter wie vorher? Ich weiß nicht, was Sie mit dieser Frage meinen. Es gibt nichts, im Vergleich zu dem wir ein Versagen des Normalmaßstabes feststellen könnten, nichts, im Vergleich zu dem wir die Art der eventuellen Ab-

* Diese Relativität in bezug auf eine zugrunde gelegte Normaleinheit hat nichts mit der Relativität in bezug auf die Bewegung des Beobachters zu tun, die wir im zweiten Kapitel besprochen haben, sondern tritt ganz unabhängig hinzu.

weichung begreifen könnten. Aber warum ist denn das Normalmeter so vorsichtig ausgewählt worden? Das Herstellungsmaterial mußte doch ganz bestimmten Anforderungen genügen, nämlich so wenig wie möglich durch zufällige Einwirkungen, wie Temperaturschwankungen, Spannungen, Witterungsverhältnisse beeinflusbar zu sein, damit man annehmen durfte, die Länge des Stabes sei einzig und allein von den wesentlichen Eigenschaften seiner Umgebung abhängig, und zwar den gegenwärtigen und vergangenen*. Man kann nicht sagen, daß das Normalmeter so gewählt wurde, daß es immer dieselbe absolute Länge beibehalten sollte, denn es gibt nichts dergleichen. Wohl aber wurde es so ausgewählt, daß nach Möglichkeit zufällige Einwirkungen ausgeschaltet wurden, die verhindern könnten, daß

* Da diese zufälligen Einwirkungen trotz sorgfältigster Auswahl des Materials und aller Vorsichtsmaßregeln bei der Benutzung des Maßstabes nicht vollkommen ausgeschaltet werden können, müssen gewisse Korrekturen angebracht werden. Solche Korrekturen dürfen sich jedoch niemals auf die wesentlichen Eigenschaften des Raumes erstrecken, der mit dem Maßstab ausgemessen werden soll. Wir korrigieren ein Voltmeter in bezug auf Temperatureinflüsse, es wäre aber sinnlos, es in bezug auf den Einfluß der angelegten Spannung korrigieren zu wollen. Die Unterscheidung zwischen zufälligen und wesentlichen Einwirkungen — zwischen Einflüssen, die ausgeschaltet werden müssen, und denen, die nicht korrigiert werden dürfen — beruht auf dem jeweiligen Zweck der vorgenommenen Messung. Der Normalmaßstab dient dem Zweck, den Raum auszumessen, und die wesentliche Eigenschaft des Raumes ist seine „Metrik“. Es wäre sinnlos, die Ablesungen unseres Maßstabes in bezug auf die Werte korrigieren zu wollen, die er angeben würde, wenn der Raum irgendeine andere Metrik hätte. Wenn aber das Gebiet der Welt, auf das sich die Metrik bezieht, zufällig auch ein elektrisches Feld enthält, so würde dieses als zufällige Eigenschaft angesehen werden müssen, da es nicht der Zweck des Maßstabes ist, elektrische Felder zu messen. Ich meine damit natürlich nicht, daß von einem umfassenderen Gesichtspunkt aus das elektrische Feld nicht ebenso wesentlich für dieses Gebiet der Welt sein kann wie seine Metrik. Es ist schwer zu sagen, inwieweit dieses Gebiet dasselbe bleiben würde, wenn irgendeine seiner Eigenschaften anders wäre, als sie tatsächlich ist. Nur kümmert uns das hier nicht, denn auf jeden Fall gibt es weite Regionen der Welt, die praktisch bar aller Eigenschaften sind, außer daß sie eine Metrik besitzen. Und auf diese wenden wir das Gravitationsgesetz in Theorie und Praxis an. Trotzdem scheint es mir wichtig, den Unterschied zwischen wesentlichen und zufälligen Eigenschaften hervorzuheben, denn immer wieder kommt jemand, der daraus, daß man Korrekturen wegen zufälliger Einflüsse nicht unter allen Umständen vermeiden kann, für sich die Erlaubnis herleitet, irgendein willkürliches System von Korrekturen anzubringen — ein Verfahren, das nur den Erfolg haben würde, das zu verstecken, was die Messungen uns über wesentliche Eigenschaften lehren können.

es immer dieselbe relative Länge beibehält — relativ wozu? Relativ zu einer Länge, die untrennbar dem Gebiet zugeordnet ist, in dem sich der Maßstab befindet. Ich kann mir keine andere Antwort vorstellen. Ein Beispiel aber für eine solche einem bestimmten Gebiet untrennbar zugeordnete Länge ist der gerichtete Radius.

Der langen Rede kurzer Sinn ist: Wenn wir das Normalmeter in eine neue Lage oder in eine neue Richtung versetzen, so mißt es immer sich selbst im Vergleich zu dem gerichteten Radius der Welt in diesem Gebiet und dieser Richtung, und nimmt eine Länge an, die ein ganz bestimmter Bruchteil eben dieses gerichteten Radius ist. Ich wüßte nicht, was es sonst tun sollte. Wir müssen uns vorstellen, wie der Maßstab etwas verwirrt ist in seiner neuen Umgebung und nicht recht weiß, wie groß er sein soll — wieviel von dem unbekanntem Gebiet er einnehmen darf. Er möchte sich ebenso benehmen, wie er sich vorher benommen hat. Aber Erinnerungen an den Teil des Raumes, den er vorher ausgefüllt hat, helfen ihm nichts, denn so etwas wie Kilometersteine gibt es weder hier noch da. Das einzige, was er erkennen kann, ist eine gerichtete Länge, die dem Gebiet, in dem er sich befindet, zugeordnet ist; so nimmt er denn eine Länge an, die demselben Bruchteil des gerichteten Radius entspricht wie vorher.

Wenn das Normalmeter immer denselben Bruchteil des gerichteten Radius beträgt, so beträgt seinerseits der gerichtete Radius immer dieselbe Anzahl Meter. Also hat der gerichtete Radius für alle Gebiete und in allen Richtungen dieselbe Länge, und damit haben wir das Gravitationsgesetz aufgestellt.

Als wir erstaunt waren, daß es ein Naturgesetz gibt, nach welchem der gerichtete Krümmungsradius für alle Gebiete und Richtungen gleich groß ist, waren wir uns nicht bewußt, daß unsere Längeneinheit sich bereits selbst zu einem konstanten Bruchteil des gerichteten Radius gemacht hatte. Das Ganze ist ein *circulus vitiosus*, das Gravitationsgesetz ist gleichsam eine leere Aussage.

Diese Erklärung der Gravitation bedeutet keine neue Hypothese. Wenn wir sagen, daß ein materielles System, das als Normalmaß benutzt wird, immer denselben Bruchteil des gerichteten Radius des Gebietes einnimmt, in dem es sich gerade befindet, so wiederholen wir damit einfach

das Einsteinsche Gravitationsgesetz — allerdings in umgekehrter Form. Sehen wir für den Augenblick von der Frage ab, ob dieses Verhalten des Maßstabes zu erwarten war oder nicht, jedenfalls sagt das Gravitationsgesetz aus, daß dies sein Verhalten ist. Um die Tragweite dieser Erklärung ermessen zu können, müssen wir uns irgendwie von der Relativität der Ausdehnung eine Vorstellung bilden. Ein Ausgedehntsein, das nicht relativ zu irgend etwas in der Umgebung ist, hat keinen Sinn. Versetzen Sie sich im Geiste ganz allein mitten ins Nichts, und dann versuchen Sie mir zu beschreiben, wie groß Sie sind. Daß ein Maßstab eine bestimmte Länge hat, kann nur heißen, daß seine Länge in bestimmtem Verhältnis zu irgendeiner anderen Länge steht. Wir sprechen aber hier von der Länge eines Stabes im leeren Raum, wo es nichts gibt, womit sie verglichen werden könnte, als die Ausdehnungsgrößen, welche die Metrik des Gebietes selbst ausmachen. Hieraus folgt, daß für unsere Messungen eine dieser Größen auf Grund ihres konstanten Verhältnisses zu unserer Längeneinheit überall konstant (homogen und isotrop) sein muß.

Wir haben das Problem zuerst von dem Gesichtspunkt aus in Angriff genommen, daß das Verschwinden der zehn Hauptkrümmungskoeffizienten (oder die Tatsache, daß die gerichtete Krümmung isotrop ist) für die wirkliche Welt eine Spezialisierung bedeutet, die der Erklärung bedarf. Indem wir diesen Standpunkt einnahmen, verglichen wir gewissermaßen im Geiste die wirkliche Welt mit einer Gedankenkonstruktion des reinen Mathematikers, nämlich einer Welt mit vollkommen willkürlicher Krümmung. Eine solche Welt aber ist eine Unmöglichkeit. Es muß auf jeden Fall eine gerichtete Länge, die allein aus der Metrik der Welt ableitbar ist, homogen und isotrop sein, wenn nicht der gerichtete Radius, so unbedingt eine andere derartige Länge. Als wir uns auf die Gedankenkonstruktion des reinen Mathematikers bezogen, übersahen wir, daß er sich eine Welt konstruiert hatte, die von außen erforscht wird mit Hilfe von Standardmaßen, die nicht zu ihr gehören und ihr deshalb fremd sind. Wir aber haben es mit einer Welt zu tun, die wir von innen erforschen mit Standardmaßen, die ihr angemessen sind, weil sie dazugehören.

Die Erklärung dafür, daß das neue Gravitationsgesetz gerade so lauten muß und nicht anders, ist somit darin zu suchen, daß wir in einer Welt leben, die wir von innen be-

trachten. Haben wir erst einmal diesen weiteren Gesichtspunkt gewonnen, so können wir dieselbe Beweisführung wie für das Messen mit Maßstäben allgemein auch auf Messungen mit optischen Methoden ausdehnen, die man in praktischen Fällen meistens anwendet. Wenn wir uns vergegenwärtigen, daß kein Meßinstrument für sich allein betrachtet irgendeine Ausdehnung haben kann, sondern nur im Vergleich zu der umgebenden Welt, so erkennen wir, daß das Ausmessen des Raumes seinem Wesen nach ein Vergleichen des Raumes mit sich selbst ist, und so muß es uns eher in Erstaunen setzen, daß durch ein derartiges Vergleichen mit sich selbst überhaupt irgendeine Ungleichartigkeit aufgezeigt werden kann. Und in der Tat kann man beweisen, daß die Metrik einer zweidimensionalen bzw. dreidimensionalen Welt von innen betrachtet notwendig gleichförmig ist. Sobald aber eine vierte oder noch mehr Dimensionen hinzukommen, wird eine Ungleichförmigkeit möglich, jedoch eine Ungleichförmigkeit, die durch ein Gesetz eingeschränkt ist, das ihr ein gewisses Maß der Gleichförmigkeit aufprägt.

Ich glaube, dieses Verhalten steht in enger Beziehung zu den von der gewöhnlichen Auffassung abweichenden Ansichten Dr. Whiteheads über Relativität, der sich von der Einsteinschen Theorie lossagt, weil er die in ihr geforderte Nicht-Gleichförmigkeit der raumzeitlichen Welt nicht zulassen will. „Ich schließe“, sagt er, „daß unsere Erfahrung eine Basis der Gleichförmigkeit verlangt und selber darstellt, und daß im Falle der Naturbetrachtung diese Basis in der Gleichförmigkeit raumzeitlicher Beziehungen zutage tritt. Diese Schlußweise schaltet die gelegentliche Ungleichförmigkeit dieser Beziehungen, die den Kern von Einsteins späterer Theorie ausmacht, vollkommen aus*.“ Wir haben aber jetzt gesehen, daß Einstein diese Ungleichförmigkeit nur für die eine Gruppe von zehn Koeffizienten zuläßt, für die anderen zehn jedoch strenge Gleichförmigkeit fordert. Er entzieht uns also keineswegs jene Basis der Gleichförmigkeit, deren Notwendigkeit Whitehead auf seine Art erkannt hat. Diese Gleichförmigkeit ist auch nicht das Resultat eines zufällig der Welt aufgezwungenen Gesetzes, sondern ist untrennbar von der Vorstellung einer von innen betrachteten Welt — was, glaube ich, gerade die Bedingung ist, die Whitehead fordern möchte. Wäre die raumzeitliche Welt zwei-

* A. N. Whitehead, *The Principle of Relativity*, Vorwort.

oder dreidimensional, so hätte Whitehead vollkommen recht, doch gäbe es dann überhaupt keine Einsteinsche Gravitationstheorie, die er kritisieren könnte. Da aber die Raumzeit vier Dimensionen aufweist, müssen wir zu dem Schluß kommen, daß Whitehead zwar eine wichtige Wahrheit über Gleichförmigkeit entdeckt, aber sie falsch angewendet hat.

Die Feststellung, daß die Ausdehnung eines Dinges in jeder Richtung der vierdimensionalen Welt durch sein Verhältnis zum Krümmungsradius in dieser Richtung bestimmt wird, führt zu einer merkwürdigen Folgerung. Solange die betrachtete Richtung der vierdimensionalen Welt raumartig ist, erhebt sich keinerlei Schwierigkeit. Sobald wir jedoch zu zeitartigen Richtungen (innerhalb des Kegels der absoluten Vergangenheit oder Zukunft) übergehen, hat der gerichtete Radius eine imaginäre Länge. Wenn also das Ding, um seine Ausdehnung in der Zeit-Dimension bestimmen zu können, nicht einfach das Warnungszeichen $\sqrt{-1}$ ignoriert, so gibt es kein Standardmaß, in bezug auf das es diese Bestimmung vornehmen könnte. Es hat keine Normaldauer. Ein Elektron entscheidet, wie groß es sein darf, indem es sich in ein bestimmtes Verhältnis zu dem Radius der Welt in ihren raumartigen Richtungen setzt. Aber es kann keine Entscheidung darüber treffen, wie lange es existieren darf, weil es keinen reellen Radius der Welt in ihrer zeitartigen Richtung gibt. Darum fährt es einfach unendlich lange fort zu existieren. Diese Betrachtung soll nicht etwa ein strenger Beweis für die unendliche Lebensdauer des Elektrons sein, denn bei allen diesen Schlußfolgerungen muß der Vorbehalt gemacht werden, daß nichts anderes als die Metrik der Welt bei der Ausdehnung ins Spiel kommt. Immerhin aber sieht man, daß das Elektron ein so einfaches Verhalten zeigt, wie wir nur erwarten durften*.

Voraussagen mit Hilfe des Gravitationsgesetzes. Ich vermute, es wird im ersten Augenblick recht merkwürdig erscheinen, daß ein Gesetz, das Sterne und Planeten auf ihren

* Andererseits ist mit einem Quant (siehe neuntes Kapitel) eine ganz bestimmte Periodizität verknüpft, so daß es imstande sein muß, sich im Vergleich zu einer zeitlichen Ausdehnung zu messen. Doch wird jeder, der die mathematischen Gleichungen der neuen Quantentheorie betrachtet, hinreichende Zeichen für einen Kampf mit dem sich entgegensetzenden Symbol $\sqrt{-1}$ erkennen.

ewigen Bahnen lenkt, im Grunde nur mit dem Verhalten von Maßstäben zu tun hat. Aber es ist noch keine Vorhersagung mit Hilfe des Gravitationsgesetzes gemacht, bei der nicht das Verhalten von Meßinstrumenten eine wichtige Rolle spielte. Eine typische solche Voraussagung aus dem Gesetz ist z. B., daß an einem bestimmten Tage 384 400 000 aneinandergelegte Metermaßstäbe gerade von der Erde bis zum Monde reichen würden. Wenn wir das gewöhnlich auch nicht in dieser Weise ausdrücken, so ist es doch jedenfalls damit gemeint. Daß wir, um die Behauptung zu prüfen, nicht wirklich alle diese Maßstäbe aneinanderlegen, sondern uns auf eine indirekte Meßmethode verlassen, ist unwesentlich. Die Prophezeiung ist in gutem Glauben gemacht und baut keineswegs auf unsere Nachlässigkeit bei der Kontrolle.

Wir haben das Gravitationsgesetz eine leere Aussage genannt. Wie aber, werden Sie fragen, ist es dann möglich, mit seiner Hilfe Sonnenfinsternisse und andere zukünftige Ereignisse richtig vorauszusagen?

Ein berühmter Philosoph hat gesagt:

„Die Bewegung der Himmelskörper ist nicht ein solches Hin- und Hergezogensein (durch mechanische Kräfte), sondern die freie Bewegung; sie gehen, wie die Alten sagten, als selige Götter einher *.“

Dies klingt zwar reichlich phantastisch, selbst für einen Philosophen, und doch glaube ich, daß es in einem bestimmten Sinne wahr ist.

Wir haben bereits in drei verschiedenen Fassungen gehört, was die Erde zu tun bestrebt ist, wenn sie ihre Ellipsenbahn um die Sonne beschreibt.

1. Sie ist bestrebt, sich in geradliniger Bahn fortzubewegen, wird jedoch durch eine von der Sonne auf sie ausgeübte Zugkraft gewaltsam abgelenkt.

2. Sie folgt der längsten möglichen Bahn durch das gekrümmte raumzeitliche Gebiet um die Sonne.

3. Sie wählt ihre Bahn so, daß sie es vermeidet, eine unerlaubte Krümmung in dem sie umgebenden leeren Raum heranzurufen.

Wir fügen jetzt noch eine vierte Fassung hinzu:

4. Die Erde kann sich bewegen, wie sie will.

Es ist gar kein weiter Schritt von der dritten zur vierten Fassung, denn wir haben gesehen, daß das mathematische

* Hegel, Werke (1842), Bd. 7, Abt. I, S. 97.

Bild des leeren Raumes mit „unerlaubter“ Krümmung in einer Welt, die wir von innen betrachten, eine vollkommene Unmöglichkeit bedeutet. Wenn aber unerlaubte Krümmung eine vollkommene Unmöglichkeit ist, so hat die Erde keine besonderen Vorsichtsmaßregeln nötig, um zu vermeiden, solche hervorzurufen, und kann tun, was sie will. Und dennoch: Daß diese unmögliche Krümmung nicht vorkommt, bildet den Inhalt des Gravitationsgesetzes, aus dem wir die Erdbahn berechnen!

Der Schlüssel zu dieser Paradoxie liegt darin, daß wir selbst, unsere überkommenen Meinungen und Ansichten über das, was wir der Beachtung für wert halten, in jeder Aussage über das Verhalten der uns umgebenden Objekte der physikalischen Welt eine weit größere Rolle spielen, als uns bewußt wird. Ein Objekt, das von unserem herkömmlichen Standpunkt aus ein äußerst bemerkenswertes Verhalten zeigt, wird, von einem andern Standpunkt betrachtet, vielleicht nichts tun, das einer besonderen Erklärung bedarf. Dieser Gedankengang wird Ihnen vermutlich an einem praktischen Beispiel deutlicher werden, das zugleich Fassung 4 rechtfertigen soll.

Sicher sind Sie der Ansicht, da die Erde unbedingt die richtige Stellung für die nächste Sonnenfinsternis erreichen muß, könne es ihr nicht gestattet sein, frei ihre Bahn zu wählen. Ich hingegen bleibe dabei, daß die Erde frei hingehen kann, wohin es ihr beliebt. Diesen Streit können wir nur dadurch entscheiden, daß wir herausfinden, wohin sie tatsächlich gegangen ist, d. h. welchen Platz wir ihr auf dem gewohnten Hintergrund von Raum und Zeit anweisen müssen. Wo sie sich in dem unergründlichen Absoluten, das hinter den Erscheinungen liegt, befinden mag, ist hier nicht die Frage. Wir müssen also Messungen über die Stellung der Erde vornehmen, z. B. ihre Entfernung von der Sonne bestimmen. In Abb. 6 bezeichnet SS_1 die faltige Erhebung in der raumzeitlichen Welt, die wir als Sonne kennen. Ich habe die entsprechende Falte für die Erde zweimal eingezeichnet (EE_1, EE_2), um dadurch anzudeuten, daß es noch unbestimmt ist, welchen Weg sie einschlagen wird. Wählt sie EE_1 , so müssen wir unsere Maßstäbe die Hänge herab und quer durch das Tal von S , bis E_1 aneinanderlegen, die Anzahl bestimmen und das Resultat als den Abstand zwischen Sonne und Erde verzeichnen. Wie Sie sich erinnern werden, gleichen die Maßstäbe ihre Länge immer einem be-

stimmten Bruchteil des Krümmungsradius der Welt an. Entlang $S_1 E_1$ ist nun die Krümmung ziemlich groß, d. h. der Krümmungsradius klein. Infolgedessen sind auch die Maßstäbe kurz und, um $S_1 E_1$ auszufüllen, werden mehr Stäbe nötig sein, als man nach dem Bilde erwarten sollte. Wählt aber die Erde den Weg $E E_2$, so ist die Krümmung weniger stark, und der größere Krümmungsradius bedingt zugleich eine größere Länge der aneinandergelegten Maßstäbe. Die Anzahl Stäbe, die wir brauchen, um das Tal S, E_2 auszufüllen, wird somit geringer sein, als das Diagramm vermuten läßt.

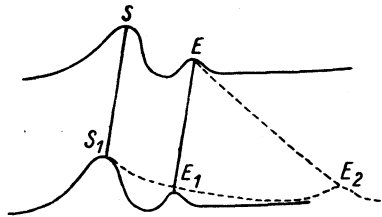


Abb. 6

Sie wird durchaus nicht in dem Maße zugenommen haben, wie es dem Verhältnis von $S_1 E_1$ zu $S_1 E_2$ auf unserer Abbildung entspricht. In der Tat würden wir uns nicht wundern, wenn es sich herausstellen sollte, daß beide Male die gleiche Anzahl Maßstäbe nötig ist. In diesem Fall wird aber der Beobachter immer die gleiche Entfernung der Erde von der Sonne verzeichnen, einerlei, welchen Weg die Erde gewählt hat. Der Herausgeber des Nautischen Almanach aber, der diese selbe Entfernung schon vor Jahren ausgerechnet und veröffentlicht hat, wird den Anspruch erheben, daß er den Ort der Erde ganz genau vorausgesagt habe.

Sie sehen also, daß die Erde beliebig weit von ihrem Wege abschweifen könnte, und trotzdem würden unsere Meßinstrumente ihre Lage genau so angeben, wie sie im Nautischen Almanach verzeichnet steht. Die Prophezeiungen dieser Autorität schenken den Launen der göttergleichen Erde keinerlei Beachtung. Sie betreffen das, was eintreten wird, wenn wir den von der Erde eingeschlagenen Weg ausmessen wollen. Dies geschieht mit Hilfe von Maßstäben, die sich der jeweiligen Krümmung der Welt anpassen, und der mathematische Ausdruck dieser Tatsache ist das Gravitationsgesetz, auf Grund dessen die Prophezeiung erfolgt ist.

Sie werden nun vielleicht einwenden, daß in der Praxis niemals ein Astronom durch den ganzen interplanetaren Raum hindurch einen Maßstab an den andern gelegt hat, um die Stellung der Planeten herauszufinden. Diese wird bei der wirklichen Messung mit Hilfe der Lichtstrahlen bestimmt. Aber ebenso wie das Normalmeter herausfinden muß, welche Länge es annehmen soll, muß der Lichtstrahl den Weg finden, der für ihn die „geradlinige“ Bahn bedeutet. Dient die Metrik, d. h. die Krümmung der raumzeitlichen Welt dem Normalmeter gleichsam als Eichmaß, so bedeutet sie für das Licht gewissermaßen einen Wegweiser. Die Bahn des Lichtstrahls wird durch die Krümmung so geleitet, daß sie deren scheinbares Gesetz nie in Gefahr bringen kann. Wohin auch immer Sonne, Mond oder Erde geraten mögen, niemals wird das Licht sie verraten. Sagt das Krümmungsgesetz eine Sonnen- oder Mondfinsternis voraus, so wird das Licht seinen Weg so nehmen, daß die Finsternis auch tatsächlich stattfindet. Das Gravitationsgesetz ist kein unerbittlicher Herrscher, der den Himmelskörpern nach ehernen Gesetzen ihre Bahnen weist, viel eher ist es ein guter Kamerad, der ihre Verfehlungen zu decken sucht.

Ich empfehle Ihnen nun nicht etwa, an Hand von Abb. 6 den Nachweis zu führen, daß die Anzahl der aneinandergelegten Maßstäbe auf $S_1 E_1$ (der ausgezogenen Linie) dieselbe sei wie auf $S_1 E_2$ (der punktierten Linie). In der Abbildung sind zwei Dimensionen der Raumzeit vernachlässigt, ganz abgesehen von den übrigen Dimensionen, in denen eine Krümmung der Raumzeit möglich ist. Außerdem bildet die sphärische Krümmung und nicht die zylindrische das Eichmaß für Längen. Einen solchen direkten Nachweis wirklich durchzuführen, würde vielleicht recht lehrreich, auf jeden Fall aber sehr mühsam sein. Doch nötig ist es nicht, denn wir wissen im voraus, daß die gemessene Entfernung der Erde von der Sonne für jede Bahn die gleiche sein muß. Das Gravitationsgesetz, das seinen mathematischen Ausdruck in der Formel $G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$ findet, sagt nicht mehr und nicht weniger aus, als daß die Längeneinheit in jedem Punkte der Welt gleich einem bestimmten Bruchteil des gerichteten Radius in eben diesem Punkte ist. Und da der Astronom, der die Stellung der Erde vorausberechnen will, von keiner weiteren Voraussetzung über das Verhalten der Erde ausgeht, als in dem Gesetz $G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$ enthalten ist, so müssen auch wir die gleiche Stellung der Erde finden, wenn wir keine

weitere Annahme machen, als daß die praktische Längeneinheit, auf der unsere Messungen beruhen, ein konstanter Bruchteil des gerichteten Radius ist. Wir brauchen also gar nicht zu entscheiden, ob der Weg der Erde durch EE_1 oder durch EE_2 dargestellt werden muß; auch würde die genaue Kenntnis der Darstellungsweise keinerlei Aufschluß über irgendeine beobachtbare Erscheinung liefern.

Ich werde noch an anderer Stelle hervorheben müssen, daß die Gesamtheit unseres physikalischen Wissens auf Messungen beruht, und daß die physikalische Welt sozusagen aus Meßgruppen besteht, die auf einem schattenhaften und außerhalb des Bereiches der Physik gelegenen Grunde ruhen. Als ich von der Welt so sprach, als ob sie unabhängig von den Messungen, die wir von ihr machen, existierte, überschritt ich die Grenzen dessen, was wir physikalische Wirklichkeit nennen. Doch bleibe ich durchaus bei der Ansicht, daß einem seiner Natur nach durch Messungen nicht feststellbaren launenhaften Umherschweifen, wie wir es bei der Erdbewegung ins Auge faßten, unmöglich physikalische Existenz zugesprochen werden kann. Niemand weiß, was man sich unter einer solchen Laune vorstellen soll. Ich habe gesagt, die Erde könne frei wählen, wohin sie gehen wolle, ich habe ihr aber kein „wohin“ für diese Wahl zur Verfügung gestellt, denn unser Begriff „wohin“ beruht auf Raummessungen, die hier versagten. Ich glaube nicht, daß ich unlogisch gewesen bin. Ich habe behauptet, daß die Erde, was auch immer sie anstellen möge, unmöglich der Bahn entringen kann, die für sie durch das Gravitationsgesetz festgelegt ist. Um dies zu zeigen, muß ich für den Augenblick annehmen, daß die Erde den Versuch gemacht und sich heimlich näher an die Sonne herangeschlichen habe. Dann zeige ich, daß alle unsere Messungen sich im stillen verschworen haben, die Erde auf ihre rechte Bahn zurückzusetzen, und am Ende muß ich zugeben, daß die Erde die rechte Bahn niemals verlassen hatte*. Aber das, worauf es mir ankommt, habe ich trotzdem bewiesen. Die Tatsache, daß ein voraussagbarer Weg durch Raum und Zeit für die Erde besteht, ist keine wirkliche Einschränkung ihres mög-

* Ich kann nämlich mit „Bahn“ nur als einer Bahn in Raum und Zeit, d. h. einer Bahn, die durch Messungen bestimmt ist, irgendeinen Sinn verbinden. Doch konnte ich nicht ohne weiteres voraussetzen, daß jede andere Bahn sinnlos sei (d. h. unvereinbar mit möglichen Messungen), bevor ich nicht den Versuch, sie zu messen, angestellt hatte.

lichen Verhaltens, sondern hat ihren Ursprung in dem formalen Schema, innerhalb dessen wir uns über ihr Verhalten Rechnung ablegen.

Nichtleerer Raum. Das Gesetz von dem konstanten Werte des gerichteten Radius hat nur Bezug auf den vollkommen leeren Raum. Ist der Raum nicht vollkommen leer, so ist kein Grund mehr vorhanden, die Gültigkeit des Gesetzes zu erwarten. Die Feststellung, daß ein Gebiet nicht leer ist, bedeutet, daß es außer der Metrik noch andere charakteristische Eigenschaften hat, und infolgedessen kann in diesem Gebiet ein Metermaß außer den durch die Krümmung gegebenen noch andere Längen finden, im Vergleich zu denen es seine eigene Länge bestimmen kann. Nach der früheren (angenähert richtigen) Fassung des Gesetzes sind die zehn Hauptkrümmungskoeffizienten im leeren Raume gleich Null, im nichtleeren Raume jedoch von Null verschieden. Diese zehn Koeffizienten liefern somit ein natürliches Maß für die Erfülltheit des Raumes.

Einer der Koeffizienten entspricht der Masse (oder Energie) und überwiegt in den meisten praktischen Fällen die anderen an Wichtigkeit. Schon die alte Definition der Masse als „Quantität der Materie“ bringt diesen Begriff mit der Erfülltheit des Raumes in Verbindung. Drei weitere Koeffizienten ergeben den Impuls — eine gerichtete Größe mit drei unabhängigen Komponenten. Die übrigen sechs Hauptkrümmungskoeffizienten bestimmen das System der Zug- und Druckkräfte. Dementsprechend stellen Masse, Impuls und Kraft die Nichtleere eines Gebietes dar, soweit diese imstande ist, die gewöhnlichen Apparate zur Erforschung des Raumes, wie z.B. Uhren, Maßstäbe, Lichtstrahlen, zu beeinflussen. Doch möchte ich hinzufügen, daß ich hiermit nur eine zusammenfassende Beschreibung und nicht etwa eine erschöpfende Darstellung der Nichtleere des Raumes geben will, denn wir besitzen noch andere Meßapparate, wie Magnete, Elektroskope usw., durch die weitere Einzelheiten erfaßt werden. Im allgemeinen herrscht die Ansicht, daß wir mit diesen Instrumenten nicht den Raum selbst, sondern ein Feld im Raume untersuchen. Die so geschaffene Unterscheidung ist jedoch ziemlich künstlich und wird kaum dauernd aufrechterhalten bleiben. Es scheint uns natürlicher, daß die Ergebnisse einer Erforschung der Welt mit Maßstab und magnetischem Kompaß ebenso zu einer ein-

heitlichen Beschreibung verwebt werden sollten, wie dies bereits für Maßstab und Uhr geschehen ist. Auch sind bereits einige Fortschritte in dieser Richtung zu verzeichnen. Andererseits aber ist ein reeller Grund für eine gewisse Trennung beider Beschreibungsweisen vorhanden, indem die eine die symmetrischen, die andere die antisymmetrischen Eigenschaften der zugrunde liegenden Weltstruktur bestimmt*.

Es sind besonders von philosophischer Seite Einwände gegen die Primitivität der Hilfsmittel erhoben worden, auf deren Anwendung Einstein seine Theorie ursprünglich aufbaut, nämlich Uhr und Maßstab. Aber die Grundelemente unserer experimentellen Kenntnis von der Welt, welche die Einsteinsche Theorie aufzuzeigen und zu ordnen sucht, sind keineswegs durch göttliche Inspiration in unser Bewußtsein gelangt, sie sind vielmehr das Ergebnis von Beobachtungen, in denen Uhr und Maßstab die Hauptrolle spielen. Wohl mögen solchen Forschern, die gewohnt sind, mit Atomen und Elektronen umzugehen, Uhr und Metermaß grobe Instrumente scheinen, aber es sind auch entsprechend grobe Erkenntnisse, die wir in diesen Kapiteln über die Einsteinsche Theorie behandelt haben. Allerdings hat es sich bei der weiteren Entwicklung der Relativitätstheorie als wünschenswert erwiesen, bewegte Partikelchen und Lichtstrahlen wegen ihrer einfacheren Struktur an die Stelle von Uhr und Maßstab als elementare Meßapparate treten zu lassen. Aber auch diese sind grob im Vergleich zu atomaren Vorgängen. Zum Beispiel kann man bei Messungen, die so subtil sind, daß die Beugung des Lichtes in Rechnung gezogen werden muß, nicht mehr Lichtstrahlen verwenden. Unsere Kenntnis der Außenwelt kann nicht von der Natur der Hilfsmittel abgelöst werden, mit deren Hilfe wir zu dieser Kenntnis gelangt sind. Die Wahrheit des Gravitationsgesetzes darf man nicht als unabhängig von den experimentellen Beweisen ansehen, durch die wir diese Wahrheit erhärtet haben.

Die Vorstellung von raumzeitlichen Bezugssystemen und von der Nichtleere der Welt, die als Energie, Impuls usw. bezeichnet wird, ist an die Beobachtung mit verhältnismäßig groben Hilfsmitteln gebunden. Sobald sie nicht mehr durch derartige Messungen gestützt werden können, verlieren diese Vorstellungen Inhalt und Sinn. Insbesondere ist das Innere

* Siehe S. 233.

des Atoms groben Beobachtungsmethoden unzugänglich. Wir können nicht Uhr und Maßstab in ein Atom hineinstellen¹⁰. Es kann somit nicht genug Nachdruck darauf gelegt werden, daß Ausdrücke wie Entfernung, Periodendauer, Masse, Energie, Impuls und dergleichen zur Beschreibung eines Atoms niemals in demselben Sinne gebraucht werden dürfen, den sie für die Tatsachen unserer gröberen Erfahrung besitzen. Behält der Atomphysiker diese Ausdrücke bei, so muß er einen neuen Sinn damit verbinden, muß die Hilfsmittel angeben, mit denen er diese Größen zu messen glaubt. Es wird manchmal die Ansicht vertreten, daß (neben den elektrischen Kräften) eine winzige Gravitationsanziehung zwischen Atomkern und Umlaufelektronen besteht, die denselben Gesetzen gehorcht, wie die Gravitationskraft zwischen Sonne und Planeten. Diese Annahme scheint mir einigermaßen phantastisch zu sein. Doch ist es unmöglich, darüber zu diskutieren, wenn nicht gesagt wird, auf welche Weise das Gebiet innerhalb des Atoms ausgemessen sein soll. Ohne derartige Ausmessung läuft auch das Elektron, wie es ihm beliebt, gleich „den seligen Göttern“.

Wir sind hier zu einem Punkt vorgedrungen, der sowohl für den Naturwissenschaftler wie für den Philosophen von außerordentlichem Interesse ist. Die zehn Hauptkrümmungskoeffizienten der Welt sind keine Unbekannten für uns. Wir erkennen in ihnen Größen wieder, die der physikalischen Betrachtungsweise unter anderem Namen längst vertraut sind, nämlich Masse, Impuls und Kraft. Dieser merkwürdige Tatbestand ist jenem berühmten Wendepunkt in der Theorie des Elektromagnetismus vergleichbar, der mit dem Namen Maxwell verknüpft ist. Die Entwicklung seiner Theorie hatte zur Betrachtung von Wellen der elektrischen und magnetischen Kraft geführt, die sich durch den Äther fortpflanzen. Und plötzlich wurde es Maxwell blitzartig klar, daß diese Wellen nichts Fremdartiges, Neues, sondern unter dem Namen „Licht“ unserer Erfahrung längst vertraut waren. Die Methode der Identifizierung ist hier wie dort die gleiche. Die Rechnung ergab, daß elektromagnetische Wellen genau dieselben Eigenschaften haben müßten, die man beim Licht beobachtet hatte. Ebenso ergab die Rechnung für die zehn Hauptkrümmungskoeffizienten genau dieselben Eigenschaften, wie sie an Energie, Impuls und Kraft beobachtet sind. Natürlich bezieht sich das nur auf physikalische Eigenschaften. Man kann nicht erwarten, daß

irgendeine physikalische Theorie imstande sei, die Entstehung und besondere Art des Bildes zu erklären, das in unserem Geiste mit der Vorstellung des Lichtes verknüpft ist, oder daß sie eine Erklärung dafür geben könne, warum in unserem Bewußtsein in Zusammenhang mit den Teilen der Welt, die Masse enthalten, die Vorstellung von Substanz entsteht.

Dies führt zu einer bedeutenden Vereinfachung unserer wissenschaftlichen Auffassung, indem Ursächlichkeit durch Identität ersetzt wird. Vom Newtonschen Standpunkt aus konnte keine Erklärung der Gravitation als vollständig angesehen werden, wenn sie nicht einen Mechanismus beschrieb, durch den ein Stück Materie das umgebende Medium erfaßt und zum Träger des von der Materie ausstrahlenden Gravitationseinflusses macht. Nichts dergleichen fordert die neue Theorie. Wir fragen nicht, auf welche Weise Masse die raumzeitliche Umgebung erfaßt und die Krümmung hervorbringt, die unsere Theorie fordert. Dies wäre ebenso müßig wie die Frage, auf welche Weise das Licht das elektromagnetische Medium erfaßt und zum Schwingen bringt. Licht ist Schwingung. Masse ist Krümmung. Man braucht der Masse keinen kausalen Effekt zuzuschreiben, noch weniger der Materie. Die Vorstellung von Materie, die wir mit Gebieten ungewöhnlicher Krümmung verbinden, ist gewissermaßen ein Denkmal, das der Geist errichtet, um einen solchen Schauplatz der Verzerrung zu markieren. Fragen Sie etwa beim Besuche eines Schlachtfeldes, auf welche Weise das Mal, das dort zum Gedächtnis errichtet ist, so viel Blutvergießen verursachen konnte?

Die philosophische Auswirkung dieser Identifizierung wird uns in späteren Kapiteln stark beschäftigen. Doch möchte ich, bevor ich diese Betrachtungen über Gravitation abschließe, noch einiges über räumliche Krümmung und nichteuklidische Geometrie sagen.

Nichteuklidische Geometrie. Ich habe Sie dazu ermutigt, sich die Raumzeit gekrümmt zu denken, doch war ich sorgfältig darauf bedacht, diese Vorstellung als ein Bild, nicht als eine Hypothese hinzustellen. Es ist eine graphische Darstellungsweise, die uns als Richtschnur dienen und eine tiefere Einsicht vermitteln soll. Was wir dem Bilde entnehmen, kann man vorsichtiger so ausdrücken, daß die Raumzeit eine nichteuklidische Geometrie besitzt. Die Ausdrücke „gekrümmter Raum“ und „nichteuklidischer

Raum“ werden praktisch gleichbedeutend angewendet, aber sie entsprechen recht verschiedenen Standpunkten. Als wir versuchten, uns die Vorstellung eines endlichen und unbegrenzten Raumes zu eigen zu machen (S. 85), bestand der schwierigste Schritt darin, von der Ansicht loszukommen, daß etwas innerhalb und außerhalb der Hypersphäre sei. Einen ähnlichen Schritt bedeutet der Übergang von einem gekrümmten zu einem nichteuklidischen Raum, denn dies bedeutet zugleich, daß wir jede Bezugnahme auf ein äußeres (und imaginäres) Gerüst fallen lassen und nur diejenigen Beziehungen beibehalten, die innerhalb des Raumes selbst Existenz haben.

Wenn Sie nach der Entfernung zwischen Glasgow und New York fragen, so gibt es zwei mögliche Antworten. Der eine wird Ihnen die Entfernung mitteilen, die auf der Oberfläche des Ozeans zurückzulegen ist, ein anderer hingegen wird sich erinnern, daß es noch eine kürzere Entfernung zwischen diesen beiden Orten gibt, nämlich quer durch das Erdinnere gemessen. Hierbei macht der Zweite Gebrauch von einer Dimension, die der Erste nicht in Betracht gezogen hatte. Wenn aber zwei Menschen nicht in der Messung von Entfernungen übereinstimmen, so wird auch ihre Geometrie eine verschiedene sein, denn Geometrie ist die Wissenschaft von den Gesetzen über Entfernungen. Vernachlässigt man eine Dimension oder kennt sie nicht, so kommt man zu einer anderen Geometrie. Für den zweiten Mann unterliegen die Entfernungen den Gesetzen einer dreidimensionalen euklidischen Geometrie, für den ersten einer nichteuklidischen Geometrie von zwei Dimensionen. Wenn sie also Ihre Gedanken so stark auf die Oberfläche der Erde konzentrieren, daß Sie völlig vergessen, daß es noch irgend etwas innerhalb oder außerhalb dieser Oberfläche gibt, so werden Sie sagen, daß die Erdoberfläche eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit mit einer nichteuklidischen Geometrie darstellt. Sobald Sie sich aber ins Bewußtsein rufen, daß ringsherum ein dreidimensionaler Raum ist, der kürzere Verbindungen zwischen je zwei Punkten zuläßt, können Sie jederzeit wieder zur euklidischen Geometrie zurückkehren. Sie werden dann die nichteuklidische Geometrie „wegerklären“, indem Sie sagen, was Sie zuerst für die Entfernung zwischen zwei Punkten gehalten haben, sei gar nicht ihre wirkliche Entfernung. Durch dieses Beispiel wollte ich Ihnen auf möglichst einfache Weise

zeigen, wie eine nichteuklidische Geometrie durch Vernachlässigung einer Dimension entstehen kann, doch dürfen Sie daraus nicht schließen, daß eine nichteuklidische Geometrie nur aus dieser Ursache entstehen kann.

In unserer vierdimensionalen, von Gravitation durchsetzten Welt fügen sich die Entfernungen einer nichteuklidischen Geometrie. Liegt dies nun daran, daß wir unser Augenmerk ausschließlich auf diese vier Dimensionen gelenkt und dadurch die kürzeren Wege übersehen haben, die durch außerhalb liegende Regionen führen? Mit Hilfe von sechs weiteren Dimensionen kann man in der Tat zur euklidischen Geometrie zurückkehren. In diesem Falle sind unsere gewöhnlichen Abstände zwischen zwei Weltpunkten nicht die „wahren“ Entfernungen, die kürzeren Wegen durch eine achte oder neunte Dimension entsprechen. Ich bin durchaus der Ansicht, daß dieses Bild einer Welt, die in einer Überwelt von zehn Dimensionen gekrümmt ist und somit kürzere Verbindungen zwischen je zwei Punkten ermöglicht, uns einen deutlicheren Begriff von den Eigenschaften einer Welt mit nichteuklidischer Geometrie geben kann. Auf jeden Fall liefert es uns einen brauchbaren Wortschatz zur Beschreibung dieser Eigenschaften. Doch glaube ich nicht, daß wir diese sechs Extra-Dimensionen ganz buchstäblich als Tatsache hinnehmen müssen, es sei denn, daß wir eine nichteuklidische Geometrie als etwas ansehen, das unter allen Umständen wegerklärt werden muß.

Welche von diesen beiden Auffassungen — eine gekrümmte Mannigfaltigkeit in einem euklidischen Raum von zehn Dimensionen oder eine Mannigfaltigkeit mit nichteuklidischer Geometrie, aber ohne Extra-Dimensionen — ist nun die richtige? Ich möchte eine direkte Antwort auf diese Frage lieber vermeiden, da ich befürchten muß, dabei in einen Nebel von Metaphysik zu geraten. Doch will ich wenigstens sagen, daß ich diese zehn Dimensionen nicht ernst nehme, während ich die nichteuklidische Geometrie der Welt sehr ernst nehme und keineswegs als etwas auffasse, das wegerklärt werden müßte. Die Auffassung, die die meisten von uns noch auf der Schule gelernt haben, daß die Wahrheit der Axiome Euklids unmittelbar einleuchtet, ist heutzutage allgemein fallengelassen. Wir können die Gesetze des Raumes ebensowenig unmittelbar durch reine Intuition festlegen, wie wir dies z. B. mit den Vererbungsgesetzen tun könnten. Wenn aber die Intuition ausscheidet,

so bleibt nur das Experiment, und zwar das echte, durchsichtige und durch keinerlei vorgefaßte Meinungen über das zu erwartende Ereignis gehemmte Experiment. Wir dürfen unsere Experimente nicht hinterher revidieren, weil sie ergeben, daß der Raum ein ganz klein wenig nichteuklidisch ist. Es ist wahr, daß es einen Ausweg gibt. Durch Hinzufügen von sechs Extra-Dimensionen kann die nichteuklidische Geometrie der Welt auf eine zehndimensionale euklidische Geometrie zurückgeführt werden. Aber hätte es sich herausgestellt, daß die Welt euklidisch ist, so könnte man vielleicht in derselben Weise ihre Geometrie aus einer zehndimensionalen nichteuklidischen Geometrie ableiten. Doch würde niemand das letztere ernsthaft versuchen, und ich sehe keinen Grund dafür, die erstere Möglichkeit ernster zu nehmen.

Ich glaube nicht, daß jemand mit großer Hartnäckigkeit auf der Existenz dieser sechs Extra-Dimensionen bestehen wird, doch versucht man oft, die Herrschaft der euklidischen Geometrie auf anderem Wege wieder herzustellen. Häufig wird ganz naiv der Vorschlag gemacht: Wenn die gemessenen Längen sich der euklidischen Geometrie nicht fügen, so muß man Korrekturen anbringen — sie so lange zurechtschustern — bis sie passen. Eine nahe verwandte Ansicht, die ebenfalls häufig vertreten wird, behauptet, daß der Raum weder euklidisch noch nichteuklidisch sei; alles sei nur Sache der Konvention und wir könnten frei eine Geometrie wählen, welche wir wollen*. Natürlich, sobald wir jede beliebige Korrektur an unseren experimentellen Meßergebnissen für erlaubt halten, können wir immer bewirken, daß sie jedem Gesetz Genüge leisten. Die Behauptung, daß jede Geometrie zulässig sei, schließt die Annahme ein, daß Längen keinen bestimmten Wert haben, — daß somit der Physiker nichts Bestimmtes meint (oder meinen dürfte), wenn er von Länge spricht. Ich fürchte, es wird

* Als ein Beispiel für diese Auffassung möchte ich Bertrand Russells *Analysis of matter*, S. 78, anführen (Deutsch von K. Grelling, *Philosophie der Materie*, Teubner 1929); ein Buch, zu dem ich mich nur selten in ernstlichem Gegensatz befinde: „Während also Eddington es für notwendig zu halten scheint, Einsteins veränderlichen Raum anzunehmen, sieht Whitehead gerade seine Verwerfung als notwendig an. Ich für mein Teil sehe weder bei der einen noch bei der anderen Ansicht ein, wie man ihr beipflichten soll. Meiner Meinung nach handelt es sich dabei um eine Übereinkunft hinsichtlich der Deutung einer Formel.“ Russells Ansicht wird auch von C. D. Broad empfohlen. — Vgl. auch Anm. auf S. 145.

schwer halten, denjenigen meine Ansicht verständlich zu machen, die von der Annahme ausgehen, daß ich mit meinen Worten keinen bestimmten Sinn verbinde, doch will ich wenigstens versuchen, die Zweifel derer zu zerstreuen, die das Vertrauen haben, daß meinen Ausführungen doch ein gewisser Sinn zugrunde liegt. Der Physiker ist gewohnt, einer großen Anzahl von charakteristischen Figuren bestimmte Längen zuzuordnen. Um uns über die Bedeutung dieser Längen klar zu werden, müssen wir darauf achten, auf welche Weise sie bestimmt werden, und da finden wir, daß dies durch Vergleich mit der Raumausdehnung eines Normalmaßes von genau definierter materieller Beschaffenheit geschieht. (Hier möchte ich einschieben, daß die Frage nach der Ausdehnung materieller Standards eine der ersten Fragen ist, die wir bei der physikalischen Erforschung unserer Umgebung stellen.) Diese Längen bilden gleichsam das Tor, durch das wir zur Erkenntnis unserer Umwelt vordringen. Ob sie auch ein wesentlicher Bestandteil im endgültigen physikalischen Bilde der Weltstruktur bleiben werden, wird sich im Laufe unserer weiteren Untersuchungen ergeben. Vorläufig wollen wir diese Frage noch offen lassen. In der Tat finden wir, daß räumliche Länge und zeitliche Länge, jede für sich betrachtet, relativ sind, und daß somit nur eine Vereinigung von beiden voraussichtlich in dem innersten Bau der Welt eine wenn auch noch so geringe Rolle spielen kann. Inzwischen führt uns der erste Schritt durch das „Tor“ zu der Geometrie, der diese Längen gehorchen. Sie ist fast euklidisch, aber in Wirklichkeit doch nichteuklidisch und vertritt, wie wir gesehen haben, einen ganz bestimmten nichteuklidischen Typus, in dem die zehn Hauptkrümmungskoeffizienten Null sind. Wir haben gezeigt, daß diese Einschränkung nicht willkürlich ist. Sie ist eine vollkommen natürliche Eigenschaft für Längen, die wir durch Vergleich mit einem materiellen Normalmaß ausdrücken, obgleich sie an anders definierten Längen überraschend sein würde. Aber müssen wir denn besonders hervorheben, daß wir eine andere Geometrie gefunden hätten, wenn wir unter Länge etwas anderes verstehen würden? Natürlich hätten wir das; und wenn wir unter elektrischer Feldstärke etwas anderes verstehen würden, so hätten wir andere Gleichungen gefunden als Maxwell. Nicht nur empirisch, auch durch rein theoretische Überlegungen gelangen wir zu dieser Geometrie und

zu keiner anderen, weil wir unter Länge gerade dies verstehen und nichts anderes.

Es ist Zeit, daß ich mich endlich mit dem reinen Mathematiker auseinandersetze, der die Vorstellung hat, die Geometrie sei eine Wissenschaft, über die nur er zu befinden habe. Jeder Zweig experimenteller Wissenschaft hat die Tendenz, sich mit einem besonderen mathematischen Rüstzeug zu versehen. Aber der reine Mathematiker, der zuerst als Diener gerufen wird, wirft sich nur allzu gern zum Meister auf. Die Verknüpfung mathematischer Sätze wird für ihn zur Hauptsache und er denkt nicht daran, die Natur um Erlaubnis zu fragen, wenn er die ursprünglichen Voraussetzungen abändern oder verallgemeinern will. Was er auf diese Weise erreicht, ist eine Geometrie, die keinerlei Einschränkung durch die wirklichen Maßverhältnisse des Raumes unterliegt, oder eine Potentialtheorie, die in keiner Weise durch die Frage nach dem wirklichen Verhalten des elektrischen oder des Gravitationspotentials beschränkt ist, oder eine Hydrodynamik idealer Flüssigkeiten, die ein Verhalten zeigen, gegen das die Natur jeder materiellen Flüssigkeit sich sträubt. Aber nur bei der Geometrie scheint der Mathematiker ganz vergessen zu haben, daß es jemals eine physikalische Disziplin dieses Namens gegeben hat, und will nicht einmal die Anwendung des Namens auf irgend etwas außerhalb seines Netzwerkes von abstrakten mathematischen Beziehungen gelten lassen. Es dürfte wohl kaum zu bestreiten sein, daß die Geometrie sowohl der Bedeutung des Namens nach als nach ihrer ursprünglichen Entstehung die Wissenschaft von der Ausmessung des uns umgebenden Raumes ist; und wie sehr auch jetzt das mathematische Gebäude die ursprüngliche, aus der Erfahrung abgeleitete Basis überwuchern mag, muß doch die Geometrie genau genommen eine experimentelle Wissenschaft genannt werden. Dieser Tatsache wird in dem „reformierten“ Lehrplan der Geometrie für Schulen voll Rechnung getragen. Die Schüler werden angewiesen, durch Messungen die Gültigkeit gewisser geometrischer Sätze nachzuweisen. Niemand stellt den Vorteil eines ungehinderten Ausbaus der Geometrie als rein mathematischer Wissenschaft in Frage. Aber nur insofern die Geometrie mit den aus Beobachtung und Messung hervorgegangenen Größen verknüpft ist, kann sie in einer Untersuchung über das Wesen der physikalischen Welt ihren Platz finden.

DIE STELLUNG DES MENSCHEN IM WELTALL

Die Sternenwelt. Unsere stärksten Fernrohre erfassen an tausend Millionen Sterne. Jede Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit vergrößert noch diese Anzahl, und es ist kaum möglich, ihr eine Grenze zu setzen. Nichtsdestoweniger sind Anzeichen für ein gewisses Nachlassen vorhanden, und es steht fest, daß die uns umgebende Sternverteilung sich nicht gleichförmig in die Unendlichkeit des Raumes fortsetzt. Betrachtet man den Himmel mit immer stärkeren Fernrohren und wählt diese so, daß bei jedem neuen Fernrohr der Bereich der erfaßten Sterne um eine Größenklasse wächst, so steigt anfangs die Zahl der erfaßten Sterne bei jeder Stufe auf das Dreifache. Doch nimmt dieser Faktor ab, so daß an der Grenze der Sichtbarkeit, die unsere Riesen-Teleskope erreichen, das Hinzukommen einer Größenklasse die Anzahl der gesehenen Sterne nur mit 1,8 multipliziert; auch erfolgt die Abnahme des Faktors auf den letzten Stufen außerordentlich schnell. Man gewinnt somit den Eindruck, daß wir uns einer Grenze nähern, bei der durch lichtstärkere Fernrohre keine erhebliche Zunahme der in unseren Sehbereich gelangenden Sterne mehr zu erreichen ist.

Es sind Versuche gemacht worden, die Gesamtzahl aller Sterne durch eine gewagte Extrapolation aus diesen Zahlen abzuschätzen, und man hat Gesamtsummen von drei bis dreißig Milliarden angegeben. Es liegt aber eine große Schwierigkeit darin, daß der Teil der Sternenwelt, der uns zunächst umgibt und den wir hauptsächlich beobachten, eine lokale Verdichtung oder Sternwolke darstellt, die nur einen Teil eines weit größeren Systems bildet. In bestimmten Richtungen dringen unsere Fernrohre bis zu den Grenzen dieses Systems vor, in anderen jedoch ist die Ausdehnung viel zu ungeheuer, um sie ermessen zu können. Die Milchstraße, die in dunkler Nacht einen leuchtenden Gürtel rings

um den Himmel bildet, zeigt die Richtung an, in der Stern hinter Stern liegt, bis sich in den Fernen der Blick verliert. Diese große abgeplattete Sternenschicht wird Galaktisches System genannt. Sie hat die Gestalt eines Diskus, dessen Dicke gering ist im Vergleich zu seiner Flächenausdehnung. Sie zerfällt in Teilverdichtungen, die wahrscheinlich eine Spirale bilden, gleich den Spiralnebeln, die man in großer Zahl am Himmel findet.

Das Zentrum des Milchstraßensystems liegt irgendwo in der Richtung des Sternbilds des Schützen. Es ist nicht nur infolge der großen Entfernung, sondern bis zu einem gewissen Grad auch durch dazwischenliegende kosmische Staubmassen verborgen, sogenannte dunkle Nebel, die das Licht der dahinterliegenden Sterne abschneiden.

Wir müssen also zwischen unserer lokalen Sternwolke und dem großen Galaktischen System unterscheiden, von dem diese einen Teil bildet. Im wesentlichen (aber nicht ausschließlich) beziehen sich die Sternzählungen nur auf die lokale Wolke, und diese ist es, die wir mit unseren stärksten Fernrohren zu erschöpfen beginnen. Sie hat ebenfalls eine abgeplattete Gestalt — und zwar ungefähr in derselben Ebene abgeplattet wie das Galaktische System selbst. Wenn wir letzteres mit einem Diskus verglichen haben, könnte man unsere lokale Sternwolke mit einem flachen Kuchen vergleichen, dessen Dicke ungefähr ein Drittel seiner seitlichen Ausdehnung beträgt. Sie ist so groß, daß ein Lichtstrahl mindestens 2000 Jahre braucht, um von einer Seite zur anderen zu gelangen. Das ist natürlich nur eine rohe Abschätzung, da sie sich auf eine Sternanhäufung von unbestimmter Gestalt bezieht, die wahrscheinlich gar nicht scharf von benachbarten Anhäufungen getrennt ist. Die Ausdehnung der gesamten Spirale ist von der Größenordnung 100 000 Lichtjahre. Es kann kaum einem Zweifel unterliegen, daß die abgeplattete Gestalt des Systems auf eine äußerst schnelle Rotation zurückzuführen ist, und tatsächlich bestehen direkte Beweise für eine starke Rotationsbewegung. Aber es ist eines der vielen ungeklärten Geheimnisse der Entwicklungsgeschichte, daß fast alle Himmelsgebilde sich in schneller Rotation befinden.

Inmitten dieser zahlreichen Bevölkerung ist die Sonne nur ein unbedeutender Einzelkörper. Sie ist ein ganz gewöhnlicher Stern von ungefähr mittlerer Lichtstärke. Wir kennen Sterne, die 10 000 mal soviel Licht ausstrahlen wie

die Sonne, und wir kennen auch Sterne, die nur den 10000sten Teil ihres Lichtes geben. Aber die Sterne mit geringerer Leuchtkraft überwiegen an Zahl bei weitem diejenigen mit höherer. In bezug auf Masse, Oberflächentemperatur und Volumen gehört die Sonne einer sehr häufig vorkommenden Klasse von Sternen an. Auch ihre Geschwindigkeit entspricht ungefähr dem Durchschnitt. Sie weist keinerlei in die Augen springende Eigenschaft auf, wie z. B. eine Veränderlichkeit der Leuchtstärke, die bei den Astronomen besondere Aufmerksamkeit erregt. In der Gemeinde der Sterne hat die Sonne den Platz eines achtbaren Bürgers des Mittelstandes inne. Zufälligerweise liegt sie sehr nahe dem Zentrum unserer lokalen Sternwolke, aber dieser scheinbare Vorrang wird dadurch entwertet, daß die Sternwolke selber sehr exzentrisch in bezug auf das Galaktische System, ja in Wirklichkeit fast an der Grenze desselben liegt. Wir können also durchaus nicht den Anspruch erheben, der Nabel der Welt zu sein.

Die Betrachtung des Milchstraßensystems bringt uns die Nichtigkeit unserer eigenen kleinen Welt zum Bewußtsein, und doch müssen wir noch tiefer in das Tal der Demut steigen. Das Galaktische System ist einer unter Millionen von Spiralnebeln. Was man längst vermutet hatte, scheint jetzt keinem Zweifel mehr zu unterliegen, nämlich, daß jeder Spiralnebel ein „Insel-Universum“ bildet, losgelöst von unserm eigenen. Sie alle sind große Sternsysteme — oder Systeme, die im Begriffe sind, sich zu Sternen zu verdichten —, alle nach demselben diskusartigen Vorbild angelegt. Einige bieten sich unserem Auge von der Schmalseite dar, so daß wir die Flachheit des Diskus abschätzen können; andere wieder kehren uns ihre Breitseite zu und zeigen uns, wie die Verdichtungen spiralförmig angeordnet sind. Viele zeigen die Wirkung dunkler Nebel, welche die Regelmäßigkeit ihrer Gestalt durchbrechen und das Licht der Sterne auslöschen. In einigen der am nächsten gelegenen Spiralnebel ist es möglich, die hellsten Sterne gesondert zu erkennen. Es wurden veränderliche Sterne und auch sogenannte Novae (neue Sterne) genau wie in unserm eigenen System beobachtet. Aus der scheinbaren Größe der Sterne, deren Charakter wir erkennen können (namentlich der Veränderlichen vom Cepheiden-Typus), sind Rückschlüsse auf die Entfernung dieser Nebel möglich. Der nächste Spiralnebel ist 850 000 Lichtjahre entfernt.

Aus dem geringen bis jetzt gesammelten Tatsachenmaterial scheint hervorzugehen, daß unser eigener Sternnebel, das Galaktische System, ganz ausnehmend groß ist. Man hat sogar die Vermutung aufgestellt, daß, wenn die übrigen Nebel „Inseln“ sind, das Milchstraßensystem einen „Kontinent“ darstellt. Solange jedoch nicht stärkere Beweise vorliegen, können wir uns kaum unterfangen, einen Vorrang für uns in Anspruch zu nehmen. Auf jeden Fall bedeutet jedes solche Universum eine Anhäufung von wenigstens rund 100 Millionen Sternen.

Und wieder erhebt sich die Frage: Wie weit dehnt sich diese Verteilung aus? Nicht um einzelne Sterne handelt es sich jetzt, sondern um Sternwelt hinter Sternwelt, so weit das Auge reicht. Nähert sich auch diese Verteilung schließlich einem Ende? Vielleicht müssen wir unsere Einbildungskraft noch zu einem weiteren Sprung anspannen, müssen wir uns noch übergeordnete Systeme vorstellen, die sich zu den Spiralnebeln verhalten wie diese zu den Einzelsternen. Aber es gibt eine schwache Wahrscheinlichkeit, daß wir bereits auf der Höhe der Rangordnung angelangt sind, und daß das System der Spiralnebel wirklich das Weltall umfaßt. Wir haben uns bereits mit der modernen Auffassung auseinandergesetzt, daß der Raum endlich ist, — endlich, obgleich unbegrenzt. In einem derartigen Raume werden die Schwingungen solchen Lichtes, das bereits einen großen Teil des Weges „rund um die Welt“ zurückgelegt hat, verlangsamt, d. h. alle Spektrallinien erscheinen gegen Rot verschoben. Gewöhnlich wird (auf Grund des Dopplereffektes) eine solche Rotverschiebung auf eine von uns weg gerichtete Bewegung des betreffenden Himmelskörpers zurückgeführt. Nun ist es eine erstaunliche Tatsache, daß die überwiegende Mehrzahl der Spiralnebel, die gemessen worden sind, große von uns weg gerichtete Geschwindigkeiten zeigen, die häufig 1000 km/sec noch übersteigen¹¹. Es gibt nur zwei ernstlich in Betracht kommende Ausnahmen, und das sind gerade die größten Spiralnebel, die uns näher liegen müssen als die meisten andern. Es dürfte schwer sein, plausible Gründe anzugeben, warum uns diese fernen Welten so schnell und so einmütig fliehen. Warum sollten sie uns wie eine Plage meiden? Aber die Erscheinung wird sogleich verständlich, wenn wir die tatsächlich beobachtete Rotverschiebung auf eine Verlangsamung der Schwingungen des von diesen Objekten ausgesandten Lichtes zurück-

führen, die darum eintreten muß, weil das Licht bereits einen beträchtlichen Teil des Weges rund um die Welt zurückgelegt hat. Nach dieser Theorie ergibt sich der Radius des Raumes von der Größenordnung des zwanzigfachen mittleren Abstandes der beobachteten Sternnebel, also etwa zu 100 Millionen Lichtjahren. Dies würde Raum geben für einige Millionen Spiralnebel; aber dahinter kommt nichts. Es gibt kein „dahinter“, denn in einem sphärischen Raume bringt uns ein „dahinter“ aus der entgegengesetzten Richtung zur Erde zurück*.

Die Zeitskala. Der Gang der Zeit erstreckt sich weit zurück in die Vergangenheit. Von einem Anfang können wir uns keine Vorstellung machen. Aber irgend einmal, so nehmen wir an, füllte sich die Leere mit Materie, feiner noch verteilt, als in den allerzartesten Nebeln. Die spärlich verstreuten Atome bewegen sich in formloser Willkür.

Seht da den Thron des Chaos und das Zelt,
Das dunkel über öder Tiefe gähnt.

Allmählich setzt die Wirkung der Gravitation ein. Einzelne Verdichtungscentren entstehen und ziehen andere Materie in ihren Bereich. Zuerst sondern sich Sternsysteme gleich dem Galaktischen voneinander ab; Teile ballen sich zu Sternwolken und Haufen, die sich wieder in einzelne Sterne teilen.

Die Entwicklung ist nicht überall gleich weit fortgeschritten. Wir beobachten Nebel und Sternhaufen in verschiedenen Entwicklungsstufen. Manche Sterne sind noch äußerst „diffus“, andere haben sich schon so weit zusammengezogen, wie die Sonne und eine Dichte erreicht, die größer ist als die des Wassers, andere auf noch höherer Stufe haben sich zu unvorstellbaren Dichten zusammengezogen. Aber man kann heute nicht mehr daran zweifeln, daß die Entstehung der Sterne auf einen einzigen großen

* Hubble hat kürzlich einen sehr viel größeren Wert (10^{11} Lichtjahre) für den Radius in Vorschlag gebracht. Aber obgleich auch er von den Spiralnebeln ausgeht, ist die Voraussetzung zu seiner Berechnung eine andere und meiner Ansicht nach unannehmbar. Sie beruht auf einer Theorie über den geschlossenen Raum, die Einstein früher aufgestellt hatte, die jetzt aber allgemein fallen gelassen ist. Die oben auseinandergesetzte Theorie (wir verdanken sie W. de Sitter) ist wohl äußerst spekulativ, aber sie ist der einzige Schlüssel, den wir zu den Größenverhältnissen des Raumes besitzen.

Evolutionsprozeß zurückzuführen ist, der die uranfängliche Verteilung der Materie ergriff und auch jetzt noch nicht abgeschlossen ist. Man hat früher willkürlich angenommen, daß die Geburt eines Sternes ein Einzelereignis sei wie die Geburt eines Lebewesens. Von Zeit zu Zeit sollten zwei längst erloschene Sterne zusammenstoßen und sich durch die Energie des Stoßes in Dampf auflösen. Dann sollte wieder Verdichtung einsetzen und mit einem neuen leuchtenden Himmelskörper neues Leben beginnen. Wir können zwar kaum behaupten, daß dies unmöglich wäre und daß es der Sonne nicht bestimmt sei, ein zweites oder drittes Mal zu erstehen, aber es geht aus gewissen Beziehungen, die man zwischen den Sternen hat verfolgen können, klar hervor, daß die gegenwärtige Daseinsstufe der Himmelskörper ihr erstes Dasein bedeutet. Man hat Sternfamilien gefunden, deren Glieder sich mit gemeinsamer Eigengeschwindigkeit durch den Weltraum bewegen. Diese müssen einen gemeinsamen Ursprung haben und können ihre Entstehung nicht zufälligen Zusammenstößen verdanken. Eine andere überwundene Hypothese nahm an, die leuchtenden Sterne bildeten nur eine Ausnahme, und Tausende von toten Sternen kämen auf jeden, dessen Licht wir beobachten. Es gibt aber Methoden, um die Gesamtmasse der Materie im interplanetaren Raum durch ihre Gravitationswirkung auf die mittlere Geschwindigkeit der Sterne abzuschätzen, und man hat gefunden, daß die Masse der leuchtenden Himmelskörper schon fast die gesamte zulässige Masse erschöpft, so daß für dunkle Sterne nur noch ein sehr beschränkter Betrag übrigbleibt.

Biologen und Geologen datieren die Geschichte der Erde auf einige tausend Millionen Jahre zurück. Physikalische Beweisführungen, die sich auf die Lebensdauer radioaktiver Substanzen stützen, scheinen die Schlußfolgerung notwendig zu machen, daß die älteren (archaischen) Gesteine der Erdkruste vor ungefähr 1200 Millionen Jahren entstanden sind. Die Sonne muß jedoch bereits seit noch längerer Zeit ihre Strahlen versenden, indem sie (wie wir jetzt annehmen) von ihrer eigenen Substanz zehrt, die sich nach und nach in Strahlung auflöst. Nach der theoretischen Zeitskala, die durch astronomische Beweise aufs beste gestützt scheint, muß der Beginn des Leuchtens der Sonne auf etwa fünf Billionen ($5 \cdot 10^{12}$) Jahre zurückverlegt werden. Wenn man auch der Theorie, die dieses Datum liefert, nicht absolut

sicher vertrauen kann, so scheint doch der Schluß vernünftig und begründet, daß das Alter der Sonne jene Zahl nicht übersteigt. Die Zukunft erscheint nicht so eng begrenzt, und es ist möglich, daß die Sonne als Stern von immer schwächer werdender Leuchtkraft noch 50 bis 500 Billionen Jahre fortbestehen kann. Die Theorie der Erschließung von subatomarer Energie hat das Leben der Sterne von Millionen auf Billionen Jahre verlängert, und man könnte sich Verjüngungsprozesse vorstellen, die diese Billionen wieder in Trillionen wandeln würden. Solange wir jedoch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nicht umgehen können, oder, was dasselbe ist, solange wir nicht bewirken können, daß die Zeit rückwärts läuft, rücken wir dem schließlichen Ende mit Sicherheit immer näher, und die Welt wird zum Schluß in einen Zustand gleichmäßig starrer Veränderungslosigkeit versinken.

Findet nun diese unendliche Verschwendung an Materie, an Raum, an Zeit ihre letzte Krönung im Menschen?

Vielheit der Welten. An dieser Stelle möchte ich eine Zusammenstellung des astronomischen Beweismaterials geben, das bis jetzt über die Bewohnbarkeit anderer Weltkörper gesammelt worden ist. Die populäre Ansicht, daß die Beantwortung dieser Frage eines der Hauptziele bei Erforschung der Himmelskörper ist, bringt den Astronomen etwas in Verlegenheit. Denn alles, was er beisteuern kann, sind nur einige fragmentarische Fingerzeige, auf die er gelegentlich bei seinen Beobachtungen gestoßen ist, die im allgemeinen auf mehr praktische und weniger hochfliegende Ziele gerichtet sind. Nichtsdestoweniger fühlt sich der menschliche Geist unwiderstehlich zu diesem Spiel mit dem Gedanken hingezogen, daß irgendwo im Weltall andere Wesen — nicht gerade Engel — sein möchten, die der Mensch als seinesgleichen — oder auch als übergeordnet ansehen könnte.

Es ist müßig, die Formen erraten zu wollen, die das Leben unter Bedingungen annehmen könnte, die völlig anders sind als auf unserem Planeten. Wenn ich die Ansicht der Paläontologen recht verstanden habe, so bedeutet die Herrschaft der Säugetiere die dritte Dynastie im Leben der Erde — den dritten Versuch der Natur, eine Lebensform hervorzubringen, die sich wechselnden Bedingungen genügend anpassen kann und geeignet ist, die Erde zu be-

herrschen. Kleine Veränderungen im harmonischen Verhältnis aller Umstände müssen bereits starken Einfluß auf die Möglichkeit von Leben überhaupt und auf den Typus des Organismus ausüben, der zur Vorherrschaft bestimmt ist. Vorerst müssen einige kritische Wendepunkte im Gang der Entwicklung überwunden sein, bevor Leben sich bis zur Ebene des Bewußtseins erheben kann. All dies liegt außerhalb des Forschungsgebietes eines Astronomen. Um die Diskussion einer endlosen Reihe von Mutmaßungen zu vermeiden, will ich annehmen, daß die Bedingungen für die Bewohnbarkeit eines Himmelskörpers denen auf unserer Erde nicht unähnlich sind, und daß Leben zwangsläufig in Erscheinung tritt, sobald solche Bedingungen erfüllt sind.

Nehmen wir zuerst die Planeten des Sonnensystems, von denen nur Mars und Venus in Betracht kommen. So weit unsere Kenntnis reicht, könnte die Venus sehr wohl für ein dem irdischen ähnliches Leben geeignet sein. Sie hat ungefähr dieselbe Größe wie die Erde, ist zwar der Sonne etwas näher, aber wahrscheinlich nicht wärmer und besitzt eine Atmosphäre von hinreichender Dichte. Merkwürdigerweise ist es der spektroskopischen Forschung bis jetzt nicht gelungen, irgendeinen Nachweis für das Vorhandensein von Sauerstoff in der oberen Atmosphäre zu erbringen, und so erhebt sich ein Zweifel, ob auf diesem Planeten Sauerstoff überhaupt frei vorkommt; doch dürfen wir vorläufig noch keinen so bestimmten Schluß ziehen. Es ist vielleicht möglich, daß wir, auf die Venus verpflanzt, weiterleben könnten, ohne unsere Lebensgewohnheiten sehr zu verändern — außer, daß ich persönlich einen andern Beruf ergreifen müßte, denn die Venus ist kein guter Platz für Astronomen. Sie ist vollkommen in Wolken oder Nebel eingehüllt. Dies ist auch der Grund, warum man keine festen Marken auf ihrer Oberfläche finden kann, mit deren Hilfe sich feststellen ließe, wie schnell sie um ihre Achse rotiert und in welcher Richtung diese liegt. Es mag hier eine merkwürdige Theorie erwähnt werden, obgleich man sie vielleicht nicht zu ernst nehmen darf. Man hat gedacht, daß die große Höhlung, die vom Stillen Ozean ausgefüllt wird, eine Narbe sein könnte, die nach der Losreißung des Mondes von der Erde zurückgeblieben ist. Diese Höhlung hat offenbar die wichtige Funktion, überflüssiges Wasser aufzunehmen, und wenn sie ausgefüllt wäre, würden alle Kontinente überflutet werden. So könnte auf indirekte Weise das Vorhandensein

trockenen Landes mit dem Vorhandensein des Mondes zusammenhängen. Die Venus aber besitzt keinen Mond, und da sie in anderer Beziehung der Erde so ähnlich scheint, könnte man vielleicht schließen, daß sie eine Welt ist, die nur aus Ozean besteht, in der also die Fische die höchstentwickelten Wesen sind. Die Aufstellung dieser merkwürdigen Hypothese führt uns jedenfalls anschaulich vor Augen, wie das Geschick organischen Lebens durch Umstände bestimmt werden kann, die auf den ersten Blick als belangloser Zufall erscheinen.

Die Sonne ist ein ganz gewöhnlicher Stern, und die Erde ein ganz gewöhnlicher Planet, aber der Mond ist kein gewöhnlicher Trabant. Kein anderer uns bekannter Satellit ist auch nur annähernd so groß im Vergleich zu seinem Planeten. Die Masse des Mondes ist etwa $\frac{1}{80}$ der Erdmasse. Der Bruchteil scheint nur gering zu sein, ist aber abnorm groß im Vergleich mit den Verhältnissen bei anderen Satelliten. Das nächst höchste Verhältnis wird im System des Saturn gefunden, dessen größter Satellit Titan $\frac{1}{4000}$ der Saturnmasse hat. Es müssen in der Entwicklungsgeschichte der Erde ganz besondere Umstände zusammengetroffen sein, die zur Lostrennung eines so ungewöhnlich großen Massenteiles geführt haben. Die Erklärung, die Sir George Darwin aufgestellt hat und die als wahrscheinlichste angenommen wird, besagt, daß eine Resonanz stattgefunden haben muß zwischen den Perioden der Sonnengezeiten und der freien Eigenschwingung der Erdkugel. Die Gezeiten-Deformation der Erde wuchs infolgedessen zu so großer Amplitude an, daß sie in einer ungeheuren Katastrophe endete, bei der ein großer Klumpen Materie abgerissen und der Mond gebildet wurde. Andere Planeten entgingen diesem gefährlichen Zusammentreffen der Perioden und ihre Satelliten wurden im Laufe einer normaleren Entwicklung abgetrennt. Sollte ich jemals einem Wesen aus einer anderen Welt begegnen, so würde ich wohl in den meisten Beziehungen sehr bescheiden sein, nur mit dem Mond würde ich vermutlich etwas prahlen.

Mars ist der einzige Planet, dessen feste Oberfläche wir sehen und beobachten können, und so liegt es nahe, eingehender zu untersuchen, ob organisches Leben auf ihm möglich sei. Seine geringere Größe bringt erheblich andere geartete Bedingungen mit sich, doch sind die beiden wichtigsten Erfordernisse, Wasser und Luft, wenn auch nur in geringer Menge vorhanden. Die Atmosphäre des Mars ist

dünnere als die unsrige, aber in ihrer Beschaffenheit vielleicht angemessener. Auch ist bewiesen, daß sie Sauerstoff enthält. Es gibt keinen Ozean; Abgrenzungen auf der Oberfläche bedeuten nicht ein Abwechseln von Wasser und Land, sondern von roter Wüste und einem dunkleren Grunde, der möglicherweise feucht und fruchtbar ist. Eine auffallende Erscheinung bilden die weißen Polkappen, die sicherlich Schneebedeckungen sind. Doch kann der Schnee nur oberflächlich liegen, da er im Sommer vollständig wegschmilzt. Von Zeit zu Zeit zeigen Photographien des Mars zweifellose Wolkenbildungen, die vorübergehend weite Gebiete der Oberfläche unsichtbar machen, doch ist klares Wetter der Häufigere. Auch wenn die Luft wolkenlos ist, bleibt sie doch leicht neblig. W. H. Wright hat dies sehr einleuchtend durch Vergleichen von Photographien bewiesen, die er mit Licht von verschiedenen Wellenlängen aufnahm. Kurzwelliges Licht wird durch Nebel stark gestreut und die gewöhnlichen Photographien sind infolgedessen unangenehm verschwommen. Die Einzelheiten der Oberfläche treten jedoch weit schärfer hervor, wenn sichtbares gelbes Licht verwendet wird. (Eine Gelbscheibe wird meistens benutzt, um visuelle Fernrohre zum Photographieren geeignet zu machen.) Infolge ihrer größeren Wellenlänge durchdringen die sichtbaren Strahlen den Nebel viel leichter*. Noch klarer treten die Feinheiten bei Photographien mit langwelligem, infrarotem Licht hervor.

In letzter Zeit hat die Bestimmung der Temperatur der Marsoberfläche große Beachtung erregt. Man kann sie aus direkten Messungen der Wärme bestimmen, die uns von den einzelnen Teilen der Oberfläche zugestrahlt wird. Obgleich die Ergebnisse in mancher Beziehung sehr aufschlußreich sind, so ist ihre Genauigkeit und Übereinstimmung doch nicht groß genug, um eine bestimmte Vorstellung von den klimatischen Verhältnissen zu geben. Natürlich ist ein starker Temperaturwechsel zwischen Tag und Nacht und zwischen den einzelnen Breiten vorhanden, doch scheint im Mittel ziemliche Kälte zu herrschen. Sogar am Äquator fällt

* Es scheint ein besonders glücklicher Umstand gewesen zu sein, daß die ersten Forscher, welche den Mars photographierten, keine für Photographie geeigneten Teleskope hatten, sondern zu diesem Zwecke erst visuelle Teleskope herrichten mußten und infolgedessen auf die Verwendung gelben Lichtes angewiesen waren, das, wie wir gesehen haben, zur Erzielung guter Resultate wesentlich ist.

die Temperatur bei Sonnenuntergang unter den Nullpunkt. Wenn wir den jetzigen Stand der Beobachtungen als endgültig betrachten wollten, so müßten wir einigen Zweifel hegen, ob organisches Leben derartige Bedingungen überdauern kann.

In einer der Abhandlungen Huxleys kommt der Satz vor: „Bevor das Leben nicht länger währt, und die Pflichten des Tages nicht weniger schwer auf uns lasten, kann ich mir nicht denken, daß sich weise Männer mit der Naturgeschichte des Jupiter oder Mars beschäftigen sollten.“ Heutigentags scheint es nicht mehr zu stimmen, daß die Naturgeschichte des Mars so völlig außerhalb des Bereiches ernster Wissenschaft liegt. Jedenfalls zeigt die Oberfläche des Mars eine mit den Jahreszeiten erfolgende Veränderung, wie ihn die waldbekleidete Erde vermutlich einem Beschauer auf dem Mars zeigen würde. Dieser Jahreszeitenwechsel im Aussehen der Marsoberfläche ist für den aufmerksamen Beobachter sehr deutlich. Je mehr der Frühling (natürlich der Mars-Frühling) auf der einen Halbkugel fortschreitet, desto mehr breiten sich die dunklen Gebiete, die zuerst gering an Zahl und schwach sind, aus und heben sich stärker ab. Jahraus, jahrein sind es dieselben Gegenden, die fast am selben Datum des Marskalenders dunkler werden. Es ist zwar möglich, daß die Erscheinung anorganisch erklärt werden muß. Die Frühlingsregen befeuchten die Oberfläche und verändern deren Färbung. Doch ist es eigentlich unwahrscheinlich, daß der Regen in genügender Menge fällt, um diese Veränderung als direkte Wirkung hervorrufen zu können. Wahrscheinlicher ist es, daß wir Zeuge des jährlichen Erwachens der Vegetation sind, das uns auf unserem eigenen Planeten so wohlvertraut ist.

Das Vorkommen von Sauerstoff in der Atmosphäre des Mars bedeutet eine weitere Stütze für die Annahme, daß pflanzliches Leben auf diesem Planeten existiert. Freier Sauerstoff verbindet sich mit vielen Elementen, und die Gesteine der Erdkruste nehmen Sauerstoff begierig auf. Sie würden ihn im Laufe der Zeit vollkommen aus der Luft verschwinden lassen, wären nicht die Pflanzen, die ihn wieder aus dem Boden ziehen und frei machen. Wenn nun der Sauerstoff in der irdischen Atmosphäre auf diese Weise erhalten bleibt, scheint mir die Annahme vernünftig, daß auch für die Erhaltung des Sauerstoffs in der Mars-Atmosphäre das vegetabile Leben dieselbe Rolle spielt. Zieht man außer-

dem die Veränderungen im Aussehen der Oberfläche in Betracht, die mit den Jahreszeiten so deutlich hervortreten, so muß man sagen, daß recht starke Gründe für ein pflanzliches Leben auf dem Mars sprechen.

Wenn wir nun mit großer Wahrscheinlichkeit eine Flora auf dem Mars annehmen müssen, wie verhält es sich mit der Fauna? Hier bin ich am Ende mit den astronomischen Daten und kann keine Verantwortung für irgendwelche weiteren Schlußfolgerungen übernehmen. Es ist wahr, daß der verstorbene Professor Lowell sich dafür eingesetzt hat, daß gewisse bei der Betrachtung der Marsoberfläche sich zeigende mehr oder weniger geradlinige Markierungen ein künstliches Bewässerungssystem darstellen und Anzeichen für eine fortgeschrittene Zivilisation sind. Aber diese Theorie hat in wissenschaftlichen Kreisen nicht viel Anklang gefunden. Um ihrem Urheber Gerechtigkeit widerfahren zu lassen, muß jedoch hervorgehoben werden, daß seine Arbeiten und die aus seinem Observatorium hervorgegangenen einen wundervollen Beitrag zu unserer Kenntnis vom Mars geliefert haben; aber seinen phantastischen Schlußfolgerungen werden nur wenige beistimmen können*. Zum Schluß möchte ich noch eins hervorheben: Seinem ganzen Aussehen nach ist der Mars ein Planet, der längst das Stadium seiner Jugend überschritten hat. Und es ist jedenfalls unwahrscheinlich, daß zwei Planeten, die im Alter so verschieden sind wie Mars und Erde, gleichzeitig sich im Höhepunkt ihrer biologischen Entwicklung befinden sollten.

Die Bildung von Planetensystemen. Sollten nun auch die Planeten unseres Sonnensystems die Bedingungen nicht erfüllen, so bleiben doch einige tausend Millionen Sterne, die wir uns gewöhnt haben, als ebensolche planetenbeherrschende Sonnen anzusehen wie die unsrige. Zu leugnen, daß auf gleicher Schöpfungsstufe dort wie bei uns das Leben blühe, scheint eine Vermessenheit zu sein, die an Gottlosigkeit grenzt. Ganz gewiß wäre die Annahme voreilig, die Natur habe nirgends im ganzen Weltall das seltsame Experiment wiederholt, zu dem sie die Erde ausersehen hat. Trotz

* Der Mars kann nur auf niedrigen Breiten und aus großer Höhe unter günstigen Bedingungen beobachtet werden. Daher sind Astronomen, die sich nicht in dieser vorteilhaften Lage befinden, wenig geneigt, sich aus so vielen strittigen Punkten eine feste Meinung zu bilden.

dem aber gibt es Überlegungen, die uns davor zurückhalten, das Universum gar zu freigebig zu bevölkern.

Wenn wir die Sterne mit einem Fernrohr beobachten, sind wir überrascht, wie viele von ihnen, die dem bloßen Auge als einzelne Pünktchen erscheinen, in Wirklichkeit zwei Sterne sind, die ganz nahe beieinander liegen. Und auch, wenn das Fernrohr keine Auflösung ergibt, so enthüllt oft das Spektroskop zwei Sterne, die sich in schnellem Umlauf umeinander drehen. Von drei Sternen ist mindestens einer ein solcher Doppelstern — ein Paar selbstleuchtender Kugeln, deren jede an Größe mit der Sonne vergleichbar ist. Die in ihrer Einsamkeit erhabene Sonne ist demnach nicht das einzige Ergebnis des Entwicklungsprozesses; nicht viel weniger häufig hat die Entwicklung einen anderen Verlauf genommen und zwei nahe benachbarte Sonnen hervorgebracht. Wahrscheinlich können wir die Möglichkeit von Planeten bei Doppelsternsystemen ausschließen. Es besteht nämlich nicht nur die Schwierigkeit, den Planeten in dem komplizierteren Gravitationsfeld bleibende Bahnen zuzuordnen, sondern vor allem scheint eine Ursache zu ihrer Entstehung zu fehlen. Der Stern hat seinem Drang, sich zu teilen, auf andere Weise bereits Genüge getan. Er hat sich in zwei fast gleich große Teile zerspalten, statt eine Folge von kleineren Bruchstücken abzustoßen.

Die einleuchtendste Ursache für eine Teilung ist übermäßige Rotationsbewegung. In dem Maße, wie sich die gasförmige Kugel zusammenzieht, rotiert sie schneller und schneller, bis der Augenblick kommt, wo sie nicht länger zusammenhalten kann und irgendeine Art Befreiung gefunden werden muß. Nach der Kant-Laplaceschen Nebel-Hypothese verschaffte sich die Sonne diese Befreiung, indem sie nacheinander Materieringe abwarf, die sich ihrerseits zu Planeten zusammenballten. Aber wäre nicht dieses einzige uns bekannte Beispiel eines Planetensystems, so würden wir aus den Tausenden von Doppelsternsystemen am Himmel geschlossen haben, daß die gewöhnliche Folge übermäßiger Rotationsbewegung die Aufspaltung in zwei Himmelskörper ungefähr gleichen Ranges ist.

Immerhin könnte man die Meinung aufrechterhalten, daß die Abstoßung eines Planetensystems und die Spaltung in einen Doppelstern zwei gleichwertige Lösungen des Problems der übermäßigen Rotation sind, indem der Stern je nach den besonderen Umständen die eine oder die andere

Entwicklung nimmt. Wir kennen Myriaden von Doppelsternen und nur ein einziges Planetensystem; aber auf jeden Fall reichen unsere Hilfsmittel nicht aus, um andere Planetensysteme zu entdecken, auch wenn sie existierten. Wir müssen uns daher auf die theoretischen Ergebnisse des Studiums rotierender Gasmassen stützen. Diese Untersuchungen sind außerordentlich kompliziert und die Resultate mögen vielleicht nicht endgültig sein. Jedenfalls aber führen die Untersuchungen von Sir J. H. Jeans zu dem Schluß, daß eine durch Rotation hervorgerufene Aufspaltung immer ein Doppelsternsystem hervorbringt und niemals ein Planetensystem. Das Sonnensystem ist nicht das typische Entwicklungsprodukt eines Sternes; es ist auch nicht eine gewöhnliche Abweichung von dieser Entwicklung, sondern es ist eine ganz eigenartige Laune der Natur.

Wenn wir somit die Gleichberechtigung der beiden Entwicklungsprozesse ausschließen, so scheint eine Konfiguration, die dem Sonnensystem entspricht, nur dadurch möglich, daß in einem bestimmten Stadium der Verdichtung ein ungewöhnlicher Zwischenfall stattgefunden hat. Nach Jeans bestand dieser Zwischenfall darin, daß ein anderer Stern auf seinem Wege durch den Weltenraum zufällig in engste Sonnennähe kam. Dieser Stern müßte etwas außerhalb der Neptunbahn vorbeigeflogen sein und dürfte die Sonne nur langsam überholt haben oder von ihr überholt sein. Durch Gezeitenverzerrung verursachte er ungeheure Protuberanzen auf der Sonne und bewirkte das Ausstoßen von Materiefäden, die sich bis zur Bildung von Planeten verdichteten. Dies geschah vor mehr als tausend Millionen Jahren. Der eindringende Stern hat seitdem seinen Weg weiter verfolgt und ist zwischen den anderen Sternen untergetaucht. Sein Vermächtnis aber ist zurückgeblieben in Form eines Systems von Planeten, deren einer von Menschen bewohnt wird.

Selbst in dem langen Leben eines Sternes müssen Ereignisse dieser Art äußerst selten sein. Man hat die Verteilungsdichte der Sterne im Raume mit derjenigen von zwanzig Tennisbällen verglichen, die in der Höhlung einer Kugel von der Größe der Erde umherschwärmen. Das Ereignis, das die Geburt des Sonnensystems hervorgerufen hat, entspricht somit der zufälligen Annäherung zweier dieser Bälle auf eine Entfernung von wenigen Metern, wobei noch dazu ihre Geschwindigkeiten nahe gleich und gleich-

gerichtet sein müssen. Die Anhaltspunkte sind zu unbestimmt, um eine genaue Bestimmung der Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses zu ermöglichen, doch würde ich schätzungsweise sagen, daß kaum einer unter hundert Millionen Sternen einem derartigen Ereignis im richtigen Stadium und unter den notwendigen Bedingungen ausgesetzt gewesen sein mag, daß es zur Bildung eines Planetensystems kommen konnte.

Ich will nicht leugnen, daß diese Schlußfolgerungen über die Seltenheit von Planetensystemen sehr stark angezweifelt werden können, glaube aber, daß sie auf jeden Fall ganz nützlich sind, um die sehr verbreitete populäre Anschauung richtigzustellen, die in jedem Stern eine bewohnte Welt erblicken will. Wir kennen die Verschwendung der Natur. Wie viele Eicheln streut sie aus, damit ein einziger Eichbaum wachsen kann? Und muß sie ihre Sterne sorgfältiger hüten als ihre Eicheln? In der Tat, wenn die Natur kein erhabeneres Ziel kennt, als für ihr größtes Experiment, den Menschen, eine Heimstätte zu schaffen, so bleibt sie sich nur selber treu, wenn sie Millionen von Sternen ausstreut, damit ein einziger vielleicht ihren Zwecken dienen mag.

Unter den für organisches Leben möglichen Wohnsitzen, deren Anzahl wir in dieser Weise von Anfang an stark eingeschränkt haben, kann zweifellos noch weiter gesucht werden. Auf unserer Wohnungssuche werden wir es nötig finden, viele anscheinend geeignete Wohnungen auf Grund von Nebenumständen wieder auszuschließen. Kleinigkeiten können entscheidend dafür werden, ob überhaupt organische Formen entstehen, und von weiteren Zufälligkeiten wird es abhängen, ob das Leben sich zu der Höhe des unsrigen erhebt, oder auf niedrigeren Stufen stehen bleibt. Trotzdem nehme ich an, daß am Ende dieser sorgfältigen Sichtung einige wenige Erden als Rivalen übrigbleiben, die hier und da im Weltall verstreut sind.

Noch schärfer aber müssen wir auslesen, wenn wir nur nach solchem Leben fragen, das mit uns gleichzeitig ist. Die Zeit, während welcher Menschen auf der Erde gelebt haben, ist außerordentlich kurz im Vergleich zu dem Alter der Erde oder der Sonne. Zwar ist kein physikalischer Grund erkennbar, warum es nicht noch weitere zehn Billionen Jahre Menschen auf der Erde geben soll, nachdem sie einmal darauf entstanden sind. Wir müssen aber trotzdem annehmen, daß das Auftreten hochentwickelten Lebens

nur ein sehr schmaler Ausschnitt aus der unorganischen Geschichte eines Sternes ist, und darum werden die Rivalen der Erde im allgemeinen Sterne sein, auf denen Leben unserer Bewußtseinsstufe bereits wieder verschwunden oder noch gar nicht entstanden ist. Ich glaube nicht, daß der gesamte Schöpfungs zweck auf den einen Planeten gestellt ist, auf dem wir leben; mitten in dem endlosen Ablauf der Zeit dürfen wir uns nicht einbilden, das einzige Geschlecht zu sein, das mit dem Mysterium des Bewußtseins begabt worden ist oder noch begabt werden wird. Aufrecht erhalten aber möchte ich diesen Anspruch: In gegenwärtiger Zeit ist unser Geschlecht das vollkommenste; nicht einer aus dem Übermaß der Sterne in der Milchstraße und all den anderen Himmelswelten blickt jetzt auf ein Schauspiel herab, wie es unsere Sonne mit ihren Strahlen bescheint.

DIE QUANTENTHEORIE

Der Ursprung der Schwierigkeiten. Wenn heutzutage eine Gesellschaft von Physikern zusammenkommt, um Fragen der theoretischen Physik zu diskutieren, so wird das Gespräch früher oder später eine ganz bestimmte Wendung nehmen. Vielleicht haben Sie die Gesellschaft verlassen, als gerade die eigenen Spezialfragen oder die neuesten physikalischen Entdeckungen besprochen wurden; aber wenn Sie nach einer Stunde zurückkommen, können Sie jede Wette eingehen, daß man inzwischen bei einem alles überwuchernden Gesprächsthema angelangt sein wird: bei dem verzweifelten Stand der eigenen Unwissenheit. Und das ist keine Phrase. Es ist nicht einmal wissenschaftliche Bescheidenheit. Im Gegenteil, häufig ist die Einstellung eher ein naives Erstaunen darüber, daß die Natur ihr letztes Geheimnis so erfolgreich vor dem scharfsinnigen menschlichen Intellekt hat verbergen können. Die Sache liegt einfach so, daß wir auf dem Wege des Fortschritts um eine Ecke gelangt sind, und nun steht plötzlich unsere Unwissenheit unverhüllt vor uns, erschreckend und unabweisbar. Irgend etwas ist wesentlich falsch in unserer physikalischen Grundfassung und wir wissen nicht, wie wir es richtigstellen sollen.

Die Ursache dieser Verwirrung ist ein kleines Ding, h genannt, das immer wieder bei einer sehr umfangreichen Gruppe von Experimenten auftaucht. In gewissem Sinne wissen wir ganz genau, was h ist, denn es gibt eine ganze Anzahl Wege, es zu messen. h ist gleich

0,0000000000000000000000000655 Erg·Sekunden.

Dies erweckt in Ihnen (mit Recht) die Vorstellung von etwas außerordentlich Kleinem. Aber nicht das, sondern die Benennung Erg·Sekunde ist das Wesentliche an obigem Ausdruck. Ein Erg ist die Einheit der Energie und eine Sekunde die Einheit der Zeit. Wir erfahren somit, daß h

seiner Natur nach von der Art eines Produktes aus Energie und Zeit ist.

Im praktischen Leben werden wir nicht oft vor die Aufgabe gestellt, eine Energie mit einer Zeit zu multiplizieren. Wohl dividieren wir oft Energie durch Zeit. Der Motorfahrer z. B. dividiert den Energiebetrag, den seine Maschine hergegeben hat, durch die Zeit und erhält die Anzahl ihrer Pferdestärken. Umgekehrt multipliziert die Elektrizitätsgesellschaft die Pferdestärken oder Kilowatts mit der Anzahl der Verbrauchsstunden und richtet ihre Rechnung danach. Dieses Produkt aber dann nochmals mit einer Zeit zu multiplizieren, würde zunächst recht unverständlich erscheinen.

Doch wirkt das Produkt Erg-Sekunden nicht ganz so befremdend, wenn wir es in der absoluten vierdimensionalen Welt betrachten. Größen wie die Energie, deren Existenz sich auf den Augenblick bezieht, gehören dem dreidimensionalen Raume an. Sie müssen mit einer Dauer multipliziert werden, damit sie Ausdehnung gewinnen, bevor wir sie in unsere vierdimensionale Welt stellen können. Betrachten wir einmal einen Ausschnitt des Raumes, sagen wir Großbritannien. Den Betrag an Menschheit innerhalb dieses Gebietes würden wir als 40 Millionen Menschen bezeichnen. Wenn wir aber einen Ausschnitt der Raum-Zeit betrachten, etwa Großbritannien im Jahrzehnt 1915—1925, so müssen wir den darin enthaltenen Betrag an Menschheit als 400 Millionen Menschen-Jahre bezeichnen. Wollen wir den Menschheitsinhalt der Welt von einem raum-zeitlichen Standpunkt aus angeben, so müssen wir eine Einheit wählen, die nicht nur im Raume, sondern auch in der Zeit abgegrenzt ist. Wird eine andere Art Rauminhalt als soundsoviel Erg bezeichnet, so muß in ähnlicher Weise der entsprechende Inhalt in einem Gebiet der Raum-Zeit als soundsoviel Erg-Sekunden bezeichnet werden.

Wir nennen die Größe, die in der vierdimensionalen Welt das Analogon zur Energie der dreidimensionalen Welt bildet, mit dem Fachnamen Wirkung. Zwar scheint dieser Name nicht irgendwie besonders angemessen, doch ist er einmal so eingeführt. Was wir Erg-Sekunden oder Wirkung nennen, gehört der allen Beobachtern gemeinsamen Minkowskischen Welt an, und somit ist es absolut. Es ist eine der wenigen absoluten Größen, die man in der vorrelativistischen Physik gekannt hat. Mit Ausnahme von Wir-

kung und Entropie (die einer ganz anderen Klasse von physikalischen Begriffen angehört) beziehen sich alle Größen, die in der vorrelativistischen Physik Bedeutung hatten, auf dreidimensionale Schnitte, die für verschiedene Beobachter verschieden sind.

Lange bevor uns die Relativitätstheorie gezeigt hat, daß der Wirkungsgröße in Anbetracht ihrer Absolutheit wahrscheinlich eine besondere Bedeutung in dem Abbild, das wir uns von der Natur machen, zukommen müsse, lange bevor das spezielle Wirkungsteilchen h angefangen hat, in den Experimenten aufzutauchen, wurde bereits in der Theorie der Dynamik ausgiebig von dieser Größe Gebrauch gemacht. Es waren besonders die Arbeiten Sir William Hamiltons, die sie berühmt gemacht haben, und seitdem hat von dieser Grundlage aus eine gewaltige Entwicklung der Theorie der Dynamik eingesetzt. (Ich brauche nur die grundlegende Abhandlung über Analytische Dynamik von unserem Edinburgher Professor E.T. Whittaker anzuführen, die voll davon ist.) Es war nicht schwer, die fundamentale Wichtigkeit und Bedeutung des Hauptprinzips zu erkennen. Doch muß man zugeben, daß dem Nichtspezialisten der Vorteil der weiteren Entwicklungen nicht sehr einzuleuchten schien — es sei denn als ein kunstvoller Weg, einfache Dinge möglichst kompliziert zu machen. Schließlich ist aber der Instinkt, der zu diesen Untersuchungen geführt hat, glänzend gerechtfertigt. Seit ungefähr 1917 muß man, um irgendeinem Fortschritt der Quantentheorie des Atoms folgen zu können, tief in die Hamiltonsche Theorie der Dynamik eingedrungen sein. Es ist eine merkwürdige Tatsache, daß ebenso wie Einstein den Tensorkalkül, gerade als er ihn brauchte, durch die Mathematiker wohlausgearbeitet vorfand, auch die Quantenphysiker eine weit ausgebaute Wirkungstheorie der Dynamik vorfanden, ohne die sie unmöglich hätten Erfolg haben können.

Aber weder die absolute Bedeutung der Wirkungsgröße in der vierdimensionalen Welt, noch ihre Wichtigkeit für die Hamiltonsche Theorie kann uns auf die Entdeckung vorbereiten, daß ein bestimmtes Klümpchen davon eine so ganz besondere Bedeutung haben soll. Und doch taucht ein solches Klümpchen von der Standard-Größe $6,55 \cdot 10^{-27}$ Erg-Sekunden immer wieder in unseren Experimentaluntersuchungen auf. Es wäre nun ganz schön, zu sagen, daß wir uns Wirkung atomistisch vorstellen und dieses Klümpchen h

als Atom derselben ansehen müssen. Leider können wir das nicht, trotzdem wir uns in den letzten zehn Jahren redlich darum bemüht haben. Das Bild, das wir uns gegenwärtig von der Welt machen, zeigt die Wirkungsgröße in einer Form, die mit dieser Art atomistischer Struktur gänzlich unvereinbar ist, und so muß das Bild von neuem gezeichnet werden. Es muß in der Tat eine radikale Änderung der Grundanschauungen stattfinden, die den Bau unserer Physik tragen. Die Frage ist nur, wo und in welcher Weise der Umschwung einsetzen muß. Seit 1925 sind neue Ideen in das Problem getragen worden, welche die Schwierigkeiten nicht mehr ganz so unüberwindlich erscheinen lassen und uns eine Ahnung von der Art der Revolution geben, die kommen muß. Aber eine allgemeine Lösung der Schwierigkeiten haben sie noch nicht gebracht. Die neuen Ideen werden den Gegenstand des nächsten Kapitels bilden. An dieser Stelle aber scheint es mir das Beste, uns auf den Standpunkt von 1925 zu beschränken, außer ganz am Schlusse des Kapitels, wo wir den Übergang zur neuen Theorie vorbereiten werden.

Das Wirkungsatom. Da die Wirkung zwei Bestandteile, nämlich Energie und Zeit enthält, müssen wir in der Natur nach einer bestimmten Energiemenge suchen, die in enger Verbindung mit einer bestimmten Zeitperiode auftritt. Dies ist der Weg, wie wir zwanglos ein besonderes Klümpchen Wirkung von der übrigen Wirkung, die das Universum erfüllt, absondern können. Zum Beispiel ist die Energie, die zur Bildung eines Elektrons nötig ist, eine solche wohlbestimmte und bekannte Energiemenge; es ist eine Anhäufung von Energie, die überall in der Natur, in allen Teilen des Universums vorkommt. Doch kennen wir (1925) keine bestimmte Zeitdauer, die mit ihr verbunden wäre, und daher liefert sie uns kein natürliches Wirkungsklümpchen. Wir müssen uns einer Energieform zuwenden, die in Verbindung mit einer bestimmten erkennbaren Zeitperiode auftritt, wie z. B. ein Lichtwellenzug. Ein solcher führt eine ganz bestimmte Zeiteinheit mit sich, nämlich seine Schwingungsdauer. So macht das gelbe Natriumlicht in jeder Sekunde 510 Billionen Schwingungen. Im ersten Augenblick scheinen wir nun der entgegengesetzten Schwierigkeit gegenüberzustehen. Zwar haben wir jetzt eine bestimmte Zeitperiode, wie aber sollen wir die Energie, die eine Natriumflamme

ausstrahlt, in natürliche Einheiten aufteilen? Wir müßten das Licht, das von einem einzigen Atom ausgeht, absondern; aber auch dies wird nicht in Einheiten zerfallen, es sei denn, daß das Atom das Licht diskontinuierlich aussendet.

Das trifft nun wirklich zu. Das Atom sendet einen langen Wellenzug aus, hört dann auf und muß aufs neue angeregt werden, bevor es wieder emittiert. Wir sehen diese Unterbrechungen nicht, weil Myriaden von Atomen zusammenwirken, um einen wahrnehmbaren Lichtstrahl hervorzubringen.

Man hat gefunden, daß der Energiebetrag, den ein Atom während einer dieser diskontinuierlichen Emissionen ausstrahlt, $3,4 \cdot 10^{-12}$ Erg beträgt. Diese Energie ist, wie wir gesehen haben, durch die Periode $1,9 \cdot 10^{-15}$ sec gekennzeichnet. Wir besitzen somit die beiden Bestandteile, aus denen wir das natürliche Wirkungsklumpchen zusammensetzen können. Wir brauchen sie nur zu multiplizieren und erhalten $6,55 \cdot 10^{-27}$ Erg·Sekunden. Das ist die Größe h .

Das merkwürdige Naturgesetz, das dieses Klumpchen zu etwas besonderem stempelt, besteht darin, daß wir immer dasselbe Resultat erhalten, welche Lichtquelle wir auch wählen mögen, Wasserstoff, Kalzium oder irgendein anderes Element. Die Energie wird eine andere Anzahl Erg betragen und die Periode eine andere Anzahl Sekunden, immer aber wird ihr Produkt denselben Betrag an Erg·Sekunden liefern. Das gleiche gilt für Röntgenstrahlen, γ -Strahlen und jede andere Strahlenart. Es gilt ebensogut für Licht, das von einem Atom absorbiert wird, wie für solches, das emittiert wird, denn auch die Absorption geht diskontinuierlich vor sich. Offenbar ist h selber eine Art Atom — eine Einheit, die mit dem Strahlungsvorgang verknüpft ist. Es ist kein Atom irgendeiner Materie, sondern ein Atom, oder wie es gewöhnlich genannt wird, ein **Q u a n t** einer nicht so greifbaren physikalischen Größe der Wirkung. Während es 92 verschiedene Arten materieller Atome gibt, gibt es nur ein Wirkungsquantum. Es ist immer dasselbe, in welchem Zusammenhang es auch auftreten mag. Ich sage d a s s e l b e ohne Vorbehalt. Sie werden vielleicht denken, daß doch ein Qualitätsunterschied zwischen einem Wirkungsquant von rotem Licht und einem Wirkungsquant von blauem Licht sei, obgleich beide dieselbe Anzahl Erg·Sekunden enthalten. Aber der scheinbare Unterschied ist nur relativ zu einem raumzeitlichen Bezugssystem und be-

trifft nicht das Wirkungsklumpchen, das absolut ist. Wenn wir uns der Lichtquelle mit außerordentlicher Geschwindigkeit nähern, so wandelt sich das rote Licht durch den Dopplereffekt in blaues Licht, und gleichzeitig erfährt die Energie der Wellen eine Änderung, da sie auf ein neues Bezugssystem bezogen wird. Eine Natriumflamme und eine Wasserstoffflamme schleudern uns die gleichen Wirkungsteilchen entgegen, nur sind diese Teilchen verschieden orientiert in bezug auf die Jetztlinien, die wir durch die vierdimensionale Welt gezogen haben. Wenn wir unsere Bewegung und somit die Richtung unserer Jetztlinien entsprechend verändern, können wir die vom Natrium ausgehenden Klumpchen in derselben Orientierung sehen wie vorher die vom Wasserstoff ausgehenden und somit erkennen, daß sie in Wirklichkeit von ganz gleicher Beschaffenheit sind.

Wir haben im vierten Kapitel gesehen, daß das Mischen von Energie vollständig werden kann, so daß ein endgültiger Zustand erreicht wird, der uns als thermodynamisches Gleichgewicht bekannt ist. Und wir erkannten, daß dies nur beim Mischen von unteilbaren Einheiten möglich ist. Wenn die einzelnen Karten eines Spiels unbegrenzt in immer kleinere und kleinere Stückchen gerissen werden können, so gibt es kein Ende für den Prozeß des Mischens. Die unteilbaren Einheiten, um die es sich beim Mischen von Energie handelt, sind die Quanten. Durch Strahlung, Absorption und Streuung wird die Energie zwischen den verschiedenen Trägern in Materie und Äther gemischt, doch kann bei jedem Schritt nur ein ganzes Quantum ausgetauscht werden. Und wirklich war es die Tatsache, daß es einen wohlbestimmten Zustand thermodynamischen Gleichgewichts gibt, die Prof. Max Planck ursprünglich auf die Spur seines Wirkungsquantums gebracht hat; und die Größe von h wurde zuerst aus der theoretischen Untersuchung der beobachteten Zusammensetzung der Strahlung im Endzustand idealer Unordnung berechnet. Weitere Fortschritte der Quantentheorie in ihrem Anfangsstadium verdanken wir in hohem Maße Einstein, soweit es sich um die allgemeinen Prinzipien handelt, und Bohr, soweit es den Zusammenhang mit dem inneren Aufbau des Atoms betrifft. Die paradoxe Natur des Wirkungsquantums offenbart sich darin, daß es zwar unteilbar, aber nicht zusammenhängend ist. Wir haben zuerst den Fall einer offensichtlich zusammenhängenden

Energiemenge betrachtet, nämlich ein Elektron. Doch haben wir dabei h nicht gefunden. Sobald wir jedoch unser Augenmerk auf einen Fall lenkten, bei dem sich die Energie offenbar durch den Raum hindurch auflöste, trat h unmittelbar in Erscheinung. Das Wirkungsatom scheint keinen Zusammenhang im Raume zu besitzen, es hat eine Einheit, die über den Raum hinausgeht. Wie aber kann eine solche Einheit in dem Bilde einer Welt zum Ausdruck kommen, die in Raum und Zeit ausgebreitet ist?

Der Konflikt mit der Wellentheorie des Lichtes. Wer sich das Verhalten des Wirkungsquantums näher ansieht, erlebt manche Überraschung; aber wohl keine wirft unsere hergebrachten Vorurteile so sehr über den Haufen, wie das Wiedereinfangen des Lichts und anderer Strahlungsenergie in h -Einheiten, während alle klassischen Vorstellungsbilder die Strahlung als etwas zeigen, dessen Energie sich immer mehr und mehr zerstreut. Betrachten wir Lichtwellen, die aus einer einzigen Emission eines einzelnen Atoms auf dem Sirius hervorgegangen sind. Diese führen einen gewissen Betrag an Energie, verbunden mit einer bestimmten Periode, mit sich, und das Produkt beider ist h . Die Periode wird von den Wellen unverändert mitgenommen, aber die Energie verbreitet sich in immer wachsenden Kreisen. Acht Jahre und neun Monate nach der Emission wird die Wellenfront die Erde erreichen. Einige Minuten vor ihrer Ankunft fällt es irgendeinem Menschen plötzlich ein, ins Freie zu gehen und die Pracht des Sternenhimmels zu bewundern und — um es kurz zu sagen — sein Auge gerade in den Strahlengang zu bringen. Bei ihrer Abreise vom Sirius konnten die Lichtwellen keine Ahnung davon haben, wo sie auftreffen würden. Sie wußten nicht mehr, als daß sie auf eine Reise durch den endlosen Raum geschickt wurden wie die meisten ihrer Kollegen. Man sollte annehmen, daß ihre Energie, die sich über eine Kugel von 80 Billionen Kilometer Radius verteilt zu haben scheint, unmöglich wieder gesammelt werden könnte. Und doch, wenn diese Energie jemals wieder in Materie eintritt, wenn sie in der Retina die chemischen Veränderungen bewirkt, die eine Lichtempfindung hervorrufen, so kann sie nur zu einem einzigen Quant von der Wirkungsgröße h zusammengefaßt eintreten. Genau $6,55 \cdot 10^{-27}$ Erg-Sekunden müssen eintreten oder nichts. Gerade so wie das emittierende Atom, ohne irgendwelche Gesetze der klassi-

schen Physik zu beachten, fest entschlossen ist, nur genau h auszusenden, so ist das empfangende Atom entschlossen, nur genau h einzulassen. Es gehen sicher nicht alle Lichtwellen am Auge vorbei, ohne einzudringen, denn auf irgendeine Weise sind wir ja imstande, den Sirius wahrzunehmen. Wie ist das möglich? Schicken vielleicht die ersten Schwingungen, die das Auge treffen, eine Botschaft rund zu den übrigen Teilen der Welle: „Wir haben ein Auge gefunden, drängt euch alle hinein“?

Die Versuche, diese Erscheinung zu erklären, bedienen sich alle im wesentlichen zweier Kunstgriffe, die ich als „Sammelbüchsen“-Theorie und als „Haupttreffer“-Theorie bezeichnen möchte. Ohne erst den Versuch zu machen, diese Namen in eine wissenschaftlichere Sprache zu übersetzen, möchte ich gleich sagen, worauf es dabei ankommt: Nach der ersten Theorie hält das Atom gewissermaßen eine Sammelbüchse hin, in welche jede ankommende Wellengruppe einen ganz geringen Beitrag zahlt. Sobald der Betrag in der Büchse ein ganzes Quantum erreicht, verschluckt ihn das Atom. Nach der zweiten Theorie benutzt das Atom den geringen Bruchteil eines Quants, der ihm geboten wird, dazu, sich ein Los in einer Lotterie zu kaufen, in der die Preise aus ganzen Quanten bestehen. Einige der Atome werden ganze Quanten gewinnen, die sie dann absorbieren können, und diese gewinnenden Atome sind es, welche uns Mitteilung von der Existenz des Sirius machen.

Die Sammelbüchsen-Erklärung ist nicht haltbar. Wie Jeans einmal gesagt hat, verbietet uns die Quantentheorie nicht nur, zwei Vögel mit einem Steine zu erschlagen, sondern auch einen Vogel mit zwei Steinen. Ich kann die Einwände gegen diese Erklärungsweise hier nicht ausführlich angeben, doch will ich eine oder zwei von den Schwierigkeiten schildern, die aus ihr folgen. Eine ernste Schwierigkeit erwächst z. B. aus halbgefüllten Sammelbüchsen. Dies wird uns klar werden, wenn wir statt Atome Moleküle betrachten, die ebenfalls nur ganze Quanten absorbieren. Ein Molekül habe bereits mit dem Sammeln der verschiedenen Lichtarten begonnen, die es absorbieren kann, aber bevor es Gelegenheit hatte, ein volles Quant irgendeiner Lichtart einzusammeln, nimmt es teil an einem chemischen Prozeß. Es bildet eine neue Verbindung, die nicht mehr die gleichen Lichtarten absorbiert, sondern ein vollkommen

anderes Absorptionsspektrum besitzt. Unser Molekül muß also von neuem mit dem Sammeln der entsprechenden Lichtarten beginnen. Was aber geschieht mit dem Inhalt der halbgefüllten Sammelbüchsen, der jetzt nutzlos geworden ist, da er niemals zur vollen Höhe aufgefüllt werden kann? Eines ist jedenfalls sicher: er wird nicht während des chemischen Vorganges wieder in den Äther ausgeleert.

Wir kennen ferner im photoelektrischen Effekt eine Erscheinung, die in direktem Gegensatz zu jeder Art Sammelbüchsen-Erklärung steht. Wenn Licht auf einen metallischen Belag von Natrium, Kalium, Rubidium usw. auftrifft, so werden aus diesem freie Elektronen ausgelöst. Sie fliegen unter hohen Geschwindigkeiten heraus und es ist möglich, diese Geschwindigkeiten und damit ihre Energie experimentell zu bestimmen. Ohne Zweifel ist es das auffallende Licht, das die Energiequelle für diese Explosionen bildet. Die Erscheinung unterliegt jedoch einem äußerst merkwürdigen Gesetz. Erstens: Die Geschwindigkeit der ausgeschleuderten Elektronen wird durch Anwendung einer stärkeren Lichtquelle nicht erhöht. Eine größere Konzentration des auffallenden Lichtes bewirkt eine größere Anzahl von Explosionen, nicht aber stärkere Explosionen. Zweitens: Die Geschwindigkeit wird erhöht durch Anwendung einer blauerer Lichtquelle, d. h. durch Licht von kürzerer Periode. Zum Beispiel verursacht das schwache Licht, das uns vom Sirius erreicht, ein heftigeres Ausstoßen der Elektronen als das volle Sonnenlicht, da es blauer ist als letzteres. Die weitere Entfernung des Sirius setzt nur die Zahl der ausgelösten Elektronen herab, schwächt aber nicht die Stärke der Einzelexplosionen.

Es handelt sich hier um ein ausgesprochenes Quantenphänomen. Jedes aus dem Metall ausgestoßene Elektron hat genau ein Quant des auffallenden Lichtes aufgenommen. Nach der h -Regel ist die größere Energie mit der kürzeren Schwingungsdauer verbunden, und blaues Licht liefert infolgedessen die intensivere Energie. Das Experiment ergibt, daß (nach Abrechnung eines konstanten Schwellenwertes der Energie, die notwendig ist, um das Elektron aus dem Belag frei zu machen) jedes Elektron mit einer kinetischen Energie herausgeschleudert wird, die gleich der Energie des einfallenden Lichtquants ist.

Der Belag kann im Dunkeln präpariert werden. Sobald er auch nur schwachem Lichte ausgesetzt wird, beginnt un-

mittelbar das Ausstoßen der Elektronen, längst bevor sich die „Sammelbüchsen“ hätten irgend auffüllen können. Auch können wir uns nicht darauf berufen, daß dem Licht vielleicht nur die Funktion des Auslösens zukommt und das Elektron bereits vorher mit der für seine Reise notwendigen Energie beladen ist, denn es ist ja gerade die jeweilige Natur des einfallenden Lichtstrahles, die den Betrag dieser Ladung bestimmt. Wer den Ton angibt, muß die Zeche bezahlen, und das ist in diesem Falle das Licht. Aber die klassische Theorie versieht das Licht mit keiner Tasche, aus der es zahlen kann.

Es ist immer schwierig, die Einwände gegen eine bestimmte Erklärung so vollständig zu gestalten, daß jede Weiterverfolgung derselben unmöglich gemacht wird. Aber wenn wir überhaupt einen Instinkt dafür besitzen, ein Fundamentalgesetz der Natur, wenn es sich uns bietet, als ein solches zu erkennen, so sagt uns dieser Instinkt, daß der quantenhafte Austausch zwischen Strahlung und Materie etwas ist, das an der Wurzel des Weltgefüges liegt und nicht eine zufällige Einzelheit im Mechanismus des Atoms bildet. Aus diesen Gründen fällt unsere Entscheidung unbedingt zugunsten der „Haupttreffer“-Theorie, die in diesem Phänomen den Ausgangspunkt zu einer tiefgreifenden Überprüfung der klassischen Vorstellungen erblickt.

Wir wollen eine solche Intensität der Lichtwellen voraussetzen, daß nach der gewöhnlichen Berechnungsweise gerade der millionste Teil der Energie eines Quants in den Bereich jedes Atoms gelangt ist. Unerwarteterweise absorbiert nun nicht jedes Atom den millionsten Teil eines Quants, sondern jedes millionste Atom absorbiert ein volles Quantum. Daß in der Tat nur ganze Quanten absorbiert werden, beweist der oben beschriebene photoelektrische Effekt, denn jedes ausgelöste Elektron hat es auf irgendeine Weise fertiggebracht, sich die Energie eines ganzen Wirkungsquantums anzueignen.

Es erweckt den Eindruck, als ob das, was die Lichtwellen wirklich in den Bereich jedes Atoms tragen, nicht der millionste Teil eines Quants selbst ist, sondern ein Millionstel der Wahrscheinlichkeit, sich das ganze Quant aneignen zu können. Die Wellentheorie des Lichts liefert uns das Bild und die Beschreibung von etwas, das gleichmäßig über die ganze Wellenfront verteilt ist, und das man gewöhnlich mit Energie identifiziert hat. Wenn wir so wohlbegründete Er-

scheinungen wie Interferenz und Beugung betrachten, so scheint es unmöglich, die Gleichmäßigkeit dieser Verteilung zu leugnen. Wir müssen ihr jedoch eine andere Deutung geben: es handelt sich um die gleichmäßige Verteilung der Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Energie. Nach der etwas altväterischen Definition der Energie als der „Fähigkeit, Arbeit zu leisten“, können wir jetzt sagen: die Wellen führen auf ihrer ganzen Front eine gleichmäßige Wahrscheinlichkeit mit, Arbeit zu leisten. Es ist die Ausbreitung einer Wahrscheinlichkeit, die wir in der Wellentheorie untersuchen.

Die Preisverteilung in der Haupttreffer-Theorie kann man sich auf verschiedene Weise vorstellen. Einige glauben, daß der erfolgreiche Teil der Wellenfront bereits vorher bezeichnet ist, bevor das Atom überhaupt erreicht ist. Das Fortschreiten der gleichförmigen Wellen könnte etwa mit dem Fortschreiten eines Photons oder „Strahls des Glücks“ verknüpft sein. Ich glaube jedoch, daß diese Auffassung aus der allgemeinen Richtung der modernen Quantentheorie herausfällt, und obgleich sich die meisten Autoritäten ihr anschließen, da gewisse Experimente sie entschieden bestätigen sollen, so habe ich doch kein Vertrauen zu der Beständigkeit dieser Ansicht.

Atomtheorie. Wir wenden uns nun weiteren experimentellen Bestätigungen der Quantentheorie zu. Die geheimnisvolle Größe h taucht nicht nur außerhalb, sondern auch innerhalb des Atoms auf. Lassen Sie uns das einfachste Atom, das des Wasserstoffs, betrachten. Es besteht aus einem Proton und einem Elektron, d. h. aus einer Einheitsladung positiver Elektrizität und einer Einheitsladung negativer Elektrizität. Das Proton ist Träger fast der gesamten Atommasse und bleibt gleichsam wie ein Fels im Mittelpunkt ruhen, während das leichtbeschwingte Elektron in Kreis- oder Ellipsenbahnen herumläuft, wie es das Anziehungsgesetz vom umgekehrten Quadrat der Entfernung vorschreibt. Auf diese Weise stellt das Atom gewissermaßen ein Sonnensystem im kleinen dar. Aber während beim Sonnensystem die Bahn eines Planeten jede beliebige Größe und Exzentrizität besitzen kann, ist das Elektron auf eine Reihe von Bahnen bestimmter Größe und Gestalt beschränkt. Nichts in der klassischen Theorie des Elektromagnetismus läßt auf eine derartige Einschränkung schließen, dennoch

besteht sie, und das Gesetz, dem sie unterliegt, ist aufgezeigt worden. Sie besteht, weil das Atom es immer so einrichtet, daß irgend etwas in seinem Innern gleich h wird. Dazwischenliegende Bahnen sind ausgeschlossen, denn sie würden die Existenz eines Bruchteiles von h bedingen, und h ist unteilbar.

Das Gesetz ist jedoch nicht ganz so streng. Wenn das Atom Energie in Form von Wellen aussendet oder absorbiert, so muß das Produkt aus Energiebetrag und Periode genau h entsprechen. Aber was die inneren Vorgänge betrifft, so hat das Atom gegen Werte wie $2h$, $3h$, $4h$ usw. nichts einzuwenden; nur darauf besteht es, daß keine Bruchteile vorkommen. Infolgedessen gibt es für das Elektron eine Anzahl möglicher Bahnen entsprechend den ganzen Vielfachen von h . Den ganzzahligen Faktor nennt man „Quantenzahl“ und spricht von der ersten Quantenbahn, zweiten Quantenbahn usw. Ich kann hier keine exakte Definition davon geben, was eigentlich im Atom ein ganzes Vielfaches von h sein muß; es ist jedoch etwas, das, in der vierdimensionalen Welt betrachtet, sich sofort als Wirkungsgröße enthüllt, obgleich dies nicht so offensichtlich geschieht, wenn wir es in der gewöhnlichen Weise in dreidimensionalen Schnitten sehen. Verschiedene Eigenschaften des Atoms werden unabhängig voneinander durch die Quantenregel beherrscht und es gibt infolgedessen mehrere Quantenzahlen, nämlich für jede Eigenschaft eine. Um die Sache nicht zu kompliziert zu machen, werde ich mich hier nur auf Quantenzahlen beziehen, die einer wesentlichen Eigenschaft des Atoms zugeordnet sind.

Wenn wir das Atommodell betrachten, das wir den Arbeiten Niels Bohrs verdanken, so besteht die einzig mögliche Zustandsänderung in dem Übergang eines Elektrons von einer Quantenbahn auf eine andere. Ein derartiger Sprung muß jedesmal stattfinden, wenn Licht emittiert oder absorbiert wird. Angenommen, ein Elektron, das sich auf einer höheren Quantenbahn befindet, springt auf eine Bahn von geringerer Energie, so wird das Atom einen gewissen Betrag überschüssiger Energie besitzen, den es loswerden muß. Der Energiebetrag liegt damit fest, und es handelt sich nun um die Schwingungsdauer, mit welcher dieser als Welle in den Äther ausgestrahlt werden soll. Man sollte es für unglaublich halten, daß das Atom den Äther fassen und in Schwingungen von ganz anderer Periode versetzen kann

als eine, in der es selber schwingt. Trotzdem ist es experimentelle Tatsache, daß das Atom, wenn es den Äther durch Strahlung in Schwingungen versetzt, die Umlaufperioden seiner eigenen Elektronen nicht beachtet, und daß die Periode der Ätherwellen durch keinerlei anschaulichen Mechanismus, sondern nur durch die anscheinend künstliche h -Regel bestimmt wird. Es sieht aus, als würde das Atom achtlos ein Klümpchen Energie über Bord, das sich dem Äther mitteilt und aus sich ein Wirkungsquantum formt, indem es gerade die Periode annimmt, die nötig ist, um das Produkt aus Energie und Periode gleich h zu machen. Wenn schon dieser nicht mechanistisch erklärbare Vorgang der Emission im Widerspruch zu unserer ursprünglichen Anschauung steht, so gilt dies noch weit mehr für den entgegengesetzten Vorgang der Absorption. In diesem Fall muß sich nämlich das Atom ein Energieklümpchen von genau dem Betrage verschaffen, der nötig ist, um ein Elektron auf eine höhere Quantenbahn zu heben. Ein solches Klümpchen kann es nur aus Ätherwellen von einer ganz bestimmten Periode ziehen, nicht einer Periode, die sich mit dem Atom selbst in Resonanz befindet, sondern der genau bestimmten Periode, die in Verbindung mit der gesuchten Energie ein ganzes Quantum bildet.

Die merkwürdige Beziehung, die zwischen der Energie eines Bahnsprunges und der Periode des die Energie fortführenden Lichtes besteht, und aus beiden immer die konstante Größe h zustande kommen läßt, ist vielleicht der schlagendste Beweis für die absolute Herrschaft des Wirkungsquantums. Es dürfte daher an dieser Stelle von Interesse sein, zu zeigen, wie die Energie eines Bahnsprunges im Atom (meist Quantensprung genannt) gemessen werden kann. Es ist möglich, einem einzelnen Elektron einen bekannten Energiebetrag zu erteilen, indem man es ein elektrisches Feld von gemessenem Potentialgefälle durchlaufen läßt. Wenn ein solches Geschöß ein Atom trifft, so kann es, falls seine Energie groß genug ist, eines der Umlaufelektronen des Atoms auf eine höhere Quantenbahn heben. Wenn die Energie des Geschosses hierzu nicht ausreicht, so kann es überhaupt nichts ausrichten und fliegt mit unverminderter Energie weiter. Wir wollen nun eine Gruppe von Atomen mit einem ganzen Geschößhagel von Elektronen der gleichen bekannten Energie beschießen. Ist diese Energie kleiner als die zu einem Quantensprung erforderliche, so wird der Strom

der Elektronen ohne andere Störung als gewöhnliche Streuung durch die Atomgruppe hindurchfliegen. Lassen wir nun (wie es als erste Franck und Hertz im Jahre 1913 taten) die Energie der Geschoßelektronen schrittweise anwachsen, dann werden wir plötzlich wahrnehmen, daß die Elektronen nach dem Durchgang einen großen Teil ihrer Energie verloren haben. Dies bedeutet, daß die kritische Energie erreicht ist und Quantensprünge angeregt worden sind. Auf diese Weise haben wir ein Mittel, die kritische Energie der Elektronen zu erkennen und zu messen. Sie ist genau gleich der eines Quantensprunges, d. h. gleich der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen des Atoms. Diese Meßmethode hat den Vorteil, daß sie keinerlei Kenntnis der Konstante h voraussetzt, so daß wir keinen circulus vitiosus zu fürchten brauchen, wenn wir die gemessenen Energiewerte benutzen, um die h -Regel zu prüfen*. Gleichzeitig liefert dieses Experiment einen neuen Einwand gegen die „Sammelbüchsen“-Theorie. Kleine Zuwendungen an Energie werden nicht dankbar angenommen, und Elektronen, die weniger als den vollen Betrag für einen Sprung anbieten, dürfen überhaupt nichts einzahlen.

Zusammenhang zwischen klassischen und Quantengesetzen. Wollte ich Ihnen hier den Beweis für die Richtigkeit der Quantengesetze und ihre erfolgreiche Anwendung ausführlich auseinandersetzen, so würde dies zu einer eingehenden Untersuchung des größten Teils der modernen Physik führen, die spezifische Wärme, Magnetismus, Röntgenstrahlen, Radioaktivität usw. umfassen würde. Da eine solche Untersuchung im Rahmen dieses Buches unmöglich ist, möchte ich zu einer allgemeineren Betrachtung des Zusammenhanges zwischen den Gesetzen der klassischen und denen der Quantenphysik übergehen. Seit mehr als 15 Jahren haben wir klassische und Quantengesetze nebeneinander angewandt, ungeachtet der Unvereinbarkeit der ihnen zugrunde liegenden Begriffe. Bei der Konstruktion unseres Atommodells wird angenommen, daß die Elektronen ihre Bahnen gemäß den klassischen Gesetzen der Elektrodynamik be-

* Seitdem die h -Regel sicher begründet ist, werden gewöhnlich die Energien der verschiedenen Zustände eines Atoms mit ihrer Hilfe berechnet. Es wäre also ein circulus vitiosus, wenn wir aus diesen Energien wieder die h -Regel bestätigen wollten.

schreiben, während der Sprung von einer solchen Bahn auf eine andere in einer Weise vor sich geht, die völlig unvereinbar mit diesen Gesetzen ist. Die Bahnenergien beim Wasserstoff werden nach klassischen Überlegungen berechnet, aber gleichzeitig wird durch diese Berechnung auch der Zweck verfolgt, die Beziehung von Energie und Periode zu der Größe h zu verifizieren, die im Gegensatz zu den klassischen Strahlungsgesetzen steht. Das ganze Verfahren ist in sich voller Widersprüche, dafür aber hervorragend erfolgreich.

In meinem Observatorium befindet sich ein Fernrohr, mit dessen Hilfe ich Sternenlicht auf einen Natriumbelag in einer photoelektrischen Zelle fallen lasse. Ich stütze mich auf die klassische Theorie, wenn ich das Licht durch die Linsen in die Zelle leite. Dann aber gehe ich zu den Quantengesetzen über und lasse das Licht aus dem Natriumbelag Elektronen auslösen, die im Elektrometer gesammelt werden. Wenn ich nun zufällig die Rolle der beiden Theorien verwechseln würde, so käme ich durch die Quantentheorie zur Überzeugung, daß es mir niemals gelingen würde, das Licht in der Zelle zu konzentrieren, und die klassische Theorie würde mir zeigen, daß das Licht niemals imstande wäre, Elektronen auszulösen, auch wenn es in die Zelle gelangen würde. Ich kann keinen logischen Grund dafür anführen, warum ich die beiden Theorien nicht auch in dieser Reihenfolge anwenden soll; nur die Erfahrung lehrt mich, daß es nicht geht. Sir William Bragg übertrieb nicht, als er sagte, daß wir die klassische Theorie Montag, Mittwoch und Freitag anwenden, die Quantentheorie aber Dienstag, Donnerstag und Sonnabend. Vielleicht sollte uns dies nachsichtiger gegen den Mann stimmen, dessen Weltanschauung an Wochentagen eine andere ist als Sonntags.

Im letzten Jahrhundert — und wohl auch in diesem — hat es viele Gelehrte gegeben, die ihre wissenschaftlichen und ihre religiösen Überzeugungen in wasserdichten Abteilungen getrennt hielten. Ein Teil ihrer Glaubenssätze war gut für das Laboratorium, ein anderer für die Kirche, und niemand versuchte ernsthaft, beide Teile in Einklang zu bringen. Diese Einstellung läßt sich verteidigen. Die Glaubenssätze auf ihre Verträglichkeit hin zu prüfen, hieße für den Naturwissenschaftler sich auf ein Gebiet des Denkens begeben, in dem er nicht zuständig ist, und jede Lösung, die er vielleicht finden würde, könnte doch keinen Anspruch

auf strenge Glaubwürdigkeit erheben. Lieber von vornherein zugeben, daß Wahrheit in beiden ist, in Naturwissenschaft und Religion. Und wenn sie kämpfen müssen, soll der Schauplatz wenigstens nicht das Gehirn eines schwer arbeitenden Gelehrten sein. Sollten wir jemals diese Einstellung verachtet haben, so hat uns jetzt die Vergeltung ereilt. Seit 10 Jahren müssen wir die moderne Naturwissenschaft in zwei getrennten Abteilungen unterbringen. Einen Teil unserer Glaubenssätze haben wir in dem klassischen Abteil und einen anderen in dem Quantenabteil. Unglücklicherweise sind diese Abteile nicht wasserdicht.

Es ist offenbar, daß wir einer vollkommenen Neuordnung unserer gesamten Auffassung der physikalischen Welt entgegengehen, die klassische und Quantengesetze einheitlich umfassen wird. Manche Physiker glauben noch, daß dieser Ausgleich sich im Rahmen einer Weiterentwicklung der klassischen Begriffsbildungen abspielen könne. Aber die Physiker „der Kopenhagener Schule“, wie ich sie nennen will, sind der Ansicht, daß die Neuordnung am anderen Ende ansetzen muß, und daß wir mit Hilfe der Quantenphänomene tiefer in die Werkstatt der Natur eindringen als mit Hilfe der groben Erfahrung, die zu den klassischen Gesetzen geführt hat. Nachdem die klassische Schule die Überzeugung gewonnen hat, daß diese gleich großen Wirkungsklümpchen tatsächlich existieren, grübelt sie über die Herstellungsweise der Hackmaschine nach, die solche gleichmäßigen Stückchen schneiden kann. Auf der anderen Seite sieht die Kopenhagener Schule in den Quantenphänomenen das glänzende Scheingerüst von Raum, Zeit und Materie von selbst in Wirkungskörner zerbröckeln. Ich glaube nicht, daß die Kopenhagener Schule hierin wesentlich durch die ungeheure Schwierigkeit beeinflusst wird, eine richtig funktionierende Hackmaschine aus klassischem Material anzufertigen. Vielmehr entstand ihre Anschauungsweise besonders auf Grund tiefgehender Untersuchungen über den Zusammenhang von klassischen und Quantengesetzen.

Für Zustände sehr hoher Quantenzahl gehen die Quantengesetze im Grenzfall in die klassischen Gesetze über.

Dies ist das berühmte Korrespondenzprinzip von Bohr. Zuerst war es nur eine Annahme, die sich auf ziemlich schwache Anzeichen stützte. Als sich jedoch unsere Kennt-

nis der Quantengesetze immer mehr vertieft, hat man gefunden, daß sie bei Anwendung auf Zustände sehr hoher Quantenzahl sich den klassischen Gesetzen nähern und zu denselben Schlußfolgerungen führen wie diese.

Betrachten wir z. B. ein Wasserstoffatom, dessen Elektron sich auf einer Kreisbahn sehr hoher Quantennummer befindet, d. h. also sehr weit entfernt von seinem Kern, dem Proton. Am Montag, Mittwoch und Freitag gehorcht es klassischen Gesetzen. Diese sagen aus, daß das Elektron dauernd eine schwache Strahlung aussendet, deren Stärke von seiner Beschleunigung abhängt und deren Frequenz mit der Umlauffrequenz des Elektrons übereinstimmt. Entsprechend diesem ständigen Energieverlust wird sich das Elektron auf einer Spiralbahn dem Proton annähern. Am Dienstag, Donnerstag und Sonnabend jedoch unterliegt das Elektron den Quantenregeln und springt von einer Kreisbahn zur anderen. Es gibt eine (bisher noch nicht erwähnte, nur für Kreisbahnen gültige) Quantenregel, die aussagt, daß das Elektron immer nur zur nächst niedrigeren Kreisbahn springt, so daß es nacheinander sämtliche Schritte ausführt, ohne einen zu überspringen. Ein weiteres Gesetz schreibt den mittleren Zeitabstand zwischen den einzelnen Sprüngen vor, und somit den mittleren Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Lichtemissionen. Die kleinen Energieklümpchen, die bei jedem solchen Schritt weggeworfen werden, bilden Lichtwellen von einer Periode, die durch die h -Regel bestimmt wird.

„Wie absurd! Sie können doch nicht im Ernst meinen, daß das Elektron an verschiedenen Tagen der Woche verschiedene Dinge tut!“

Aber habe ich denn gesagt, daß es verschiedene Dinge tut? Ich habe verschiedene Worte gebraucht, um zu beschreiben, was es tut. Am Dienstag renne ich die Stufen hinunter und am Mittwoch rutsche ich das Gelände hinab. Wenn aber die Treppe aus einer unendlichen Anzahl unendlich kleiner Stufen besteht, so ist kein wesentlicher Unterschied zwischen meiner Fortbewegungsart an diesen beiden Tagen. Ebenso macht es keinen Unterschied, ob das Elektron von einer Bahn zur nächsten springt oder sich in einer Spirale annähert, wenn nur die Anzahl der Schritte unendlich groß ist. Die Folge der weggeworfenen Energieteilchen geht dann in eine kontinuierliche Ausstrahlung über. Wenn

Sie die Formel vor sich hätten, würden Sie finden, daß sowohl die Frequenz des Lichtes wie die Stärke der Strahlung die gleichen sind, ob sie nach der Montag's-Methode oder der Dienstag's-Methode berechnet werden, vorausgesetzt, daß die Quantenzahl unendlich groß ist. Der Unterschied ist bereits nicht wesentlich, wenn die Quantenzahl nur ziemlich groß ist, aber bei kleiner Quantenzahl muß das Atom sich entscheiden, ob es den Gesetzen vom Montag (den klassischen) oder denen vom Dienstag (den Quantenregeln) folgen will. Es wählt die Dienstag's-Regeln.

Wenn dieses Beispiel, wie wir annehmen, typisch ist, so zeigt es uns eine Richtung an, in welcher der Wiederaufbau unserer Vorstellungen angegriffen werden muß. Wir dürfen nicht versuchen, auf dem Boden der klassischen Begriffswelt neu aufzubauen, denn die klassischen Gesetze gelten nur in dem Grenzfall sehr hoher Quantenzahlen, und die ihnen zugrunde liegenden Begriffe haben nur dann einen wohldefinierten Sinn. Wir müssen von neuen Begriffen ausgehen, welche sowohl für Zustände von hoher wie von niedriger Quantenzahl geeignet sind. Aus diesen müssen sich dann die klassischen Begriffe entwickeln, zuerst undeutlich, dann immer bestimmter, je mehr die Quantenzahl zunimmt und die klassischen Gesetze zur Geltung gelangen. Ich kann das Ergebnis dieser Neuschaffung nicht vorhersagen, aber wahrscheinlich wird Raum geschaffen werden müssen für einen Begriff von „Zuständen“, wobei die Einheit eines Zustandes den Ersatz bilden muß für die Art der Bindung, die durch die klassischen Kräfte ausgedrückt wird. Für Zustände niedriger Quantenzahl ist die übliche physikalische Ausdrucksweise ungeeignet, wenn wir auch im Augenblick noch schwer vermeiden können, sie anzuwenden. Aber es ist auf die fälschliche Anwendung unserer physikalischen Begriffe zurückzuführen, wenn unsere Theorien zurzeit noch voll von Widersprüchen sind. Für derartige Zustände bestehen nicht Raum und Zeit — wenigstens sehe ich keinen Grund dafür, dies zu glauben. Aber man muß annehmen, daß es in dem neuen Schema entsprechende Begriffe geben wird, die sich bei Zuständen hoher Quantenzahl unseren üblichen Begriffen von Raum und Zeit annähern, irgend etwas, das in Raum und Zeit übergeht, wenn die Quantenzahlen unendlich sind. Gleichzeitig werden dann die Zwischenvorgänge, die als Übergänge von einem Zustand in einen andern be-

schrieben sind, in die durch Raum und Zeit sich erstreckende Wirkung klassischer Kräfte übergehen. Im Grenzfall wird also die klassische Auffassung eine nützliche Beschreibungsmöglichkeit bleiben. Nun hatten wir in der praktischen Erfahrung meistens mit Systemen zu tun, deren Bindung verhältnismäßig locker war, d. h. die sehr hohen Quantenzahlen entsprachen. Infolgedessen führten unsere ersten Untersuchungen über die Welt zur Auffindung der klassischen Gesetze, und unsere derzeitige Vorstellung von der Welt beruht auf Größen, die nur für hohe Quantenzahlen eine genau angebbare Bedeutung haben. Im Innern der Atome und Moleküle jedoch, in den Strahlungsvorgängen, und wahrscheinlich auch im Aufbau der sehr dichten Sterne, wie z. B. der Begleiter des Sirius einer ist, stoßen wir auf Zustände, deren Quantennummer nicht hoch genug ist, um eine derartige Betrachtungsweise zuzulassen. Diese Phänomene zwingen uns, tiefer nach fundamentalen Begriffen zu schürfen, aus denen die klassischen Begriffe (die für den andern Typus von Erscheinungen hinreichend sind) als Grenzfall sich entwickeln lassen müßten.

Um Ihnen an einem Beispiel meinen Gedankengang näher zu erläutern, will ich schon hier eine Quantenvorstellung heranziehen, die eigentlich erst dem nächsten Kapitel angehört. Mag sein, daß es ihr nicht bestimmt ist, die jetzige enorm schnelle Entwicklung der geltenden Auffassungen zu überleben, doch kann sie jedenfalls dazu dienen, Ihnen deutlich zu machen, was ich sagen will. In dem Bohrschen halbklassischen Atommodell des Wasserstoffs beschreibt ein Elektron eine kreisförmige oder elliptische Bahn. Doch ist dies nur ein Modell. Das wirkliche Atom enthält nichts dergleichen. Das wirkliche Atom enthält etwas, von dem sich der menschliche Geist keine Anschauung bilden kann, das aber trotzdem durch Schrödinger symbolisch beschrieben worden ist. Dieses „Etwas“ ist in einer Weise ausgebreitet, daß es in keiner Weise mit einem Elektron verglichen werden kann, das auf einer Kreisbahn umläuft. Wenn nun das Atom schrittweise zu immer höheren Quantenzuständen angeregt wird, so bedeutet das in dem Bohrschen Modell, daß das Umlaufelektron auf immer höhere Quantenbahnen springt. In dem wirklichen Atom beginnt das Schrödingersche „Etwas“ sich mehr und mehr zusammenzuziehen, bis es ungefähr den Umriß der Bohrschen Bahn hervortreten läßt und sogar einer Kondensation zu gleichen beginnt, die

auf dieser Bahn umläuft. Gehen wir zu noch höheren Quantenzahlen, so wird das Schrödingersche Symbol einen festen Körper darstellen, der die gleiche Bahn mit der gleichen Umlauffrequenz beschreibt, wie das Elektron im Bohrschen Modell und sogar gemäß den klassischen Gesetzen eine Strahlung aussendet. Und so ist es möglich, wenn die Quantenzahl unendlich wird und der Atomverband zerreißt, daß dann ein echtes klassisches Elektron herausfliegt. Beim Verlassen des Atoms kristallisiert sich das Elektron aus dem Schrödingerschen Nebel, wie im Märchen der Geist aus der Flasche.

DIE NEUE QUANTENTHEORIE

Der Gegensatz zwischen Quantentheorie und klassischer Theorie spitzt sich besonders zu bei dem Problem der Ausbreitung des Lichtes. Hier wirkt er sich zu einem Konflikt zwischen Korpuskulartheorie und Wellentheorie des Lichtes aus.

Früher wurde oft die Frage aufgeworfen: Wie groß ist ein Lichtquant? Hierauf kann man ganz verschiedene Antworten erhalten. Eine Antwort erhält man, wenn man die Abbildung eines Sternes betrachtet, wie sie der $2\frac{1}{2}$ m große Refraktor der Mount-Wilson-Sternwarte entwirft. Aus dem Beugungsbild geht deutlich hervor, daß jede Emission von jedem einzelnen Atom des Sternes die ganze Spiegelöffnung überdecken muß. Würde nämlich eine Emission nur einen Teil des Spiegels treffen, und eine andere Emission nur einen anderen Teil, so müßte man die gleiche Wirkung erhalten, als wenn die einzelnen Teile der Spiegelfläche vom Licht verschiedener Sterne getroffen würden (da die Emissionen der Atome des einen Sternes nicht irgendwie vor denen der gleichgearteten Atome eines andern Sternes ausgezeichnet sind). In Wirklichkeit erhält man aber nicht das gleiche Beugungsbild. Ein Lichtquant ist somit groß genug, um stets die ganze Spiegeloberfläche von $2\frac{1}{2}$ m Durchmesser zu überdecken.

Wenn aber das Licht desselben Sternes, ohne künstlich gesammelt zu sein, auf einen Natriumbelag fällt, so fliegen aus diesem Elektronen heraus, deren jedes die ganze Energie eines Quants mitführt. Dies ist nicht etwa ein Auslösungsvorgang, der Energie frei macht, die bereits vorher in dem Atom aufgespeichert war, denn der Betrag der Energie hängt von der Art des auffallenden Lichtes und nicht von der Art des getroffenen Atoms ab. Es muß ein ganzes Lichtquant in das Atom eingedrungen sein und das Elektron herausgesprengt haben. Ein Lichtquant ist somit klein genug, um in ein Atom eindringen zu können.

Meiner Ansicht nach ist über die letzte Ursache dieses Widerspruchs kaum ein Zweifel möglich: Wir dürfen gar nicht Raum und Zeit in Verbindung mit einem einzelnen Quant denken. Die Frage nach der Ausdehnung eines einzelnen Quants im Raume hat keinen wirklichen Sinn. Diese Vorstellungen auf ein einzelnes Quant beziehen, ist ebenso sinnlos, als wenn man an einen einzelnen Passanten die Anforderung richtet, keine Ansammlung zu bilden. Ein einzelnes Quantum hat nicht 80 Billionen Kilometer vom Sirius bis zu uns zurückgelegt und ist auch nicht 8 Jahre unterwegs gewesen. Aber wenn eine hinlängliche Anzahl Quanten angesammelt sind, so können dieser Gesamtheit statistische Eigenschaften zugeschrieben werden, die als eine 8 Jahre lange Reise des Lichtes vom Sirius über eine Entfernung von 80 Billionen Kilometer gedeutet werden können.

Die Wellentheorie der Materie. Es ist verhältnismäßig einfach, zu erkennen, was geändert werden muß. Aber es ist außerordentlich schwer, diese Veränderung auch wirklich vorzunehmen. Bevor wir uns mit den Versuchen beschäftigen, die in den allerletzten Jahren zur Bewältigung dieses Problems gemacht worden sind, möchte ich kurz die weniger drastische Methode beleuchten, welche de Broglie eingeschlagen hat. Für den Augenblick wollen wir uns begnügen, das Mysterium als solches hinzunehmen. Wir wollen sagen, das Licht ist etwas, das sich wellenartig ausbreitet und infolgedessen imstande ist, das größte Objektiv auszufüllen, und das ferner auch die bekannten Welleneigenschaften der Beugung und Interferenz aufweist. Gleichzeitig aber ist es etwas, das mit der für Korpuskeln oder Geschosse charakteristischen Eigenschaft begabt ist, seine gesamte Energie auf ein äußerst kleines Ziel konzentrieren zu können. Ein solches „Etwas“ kann man wohl ebensowenig als Welle wie als Partikel ansehen. Vielleicht sollten wir einen Kompromiß eingehen und es „Wellikel“ nennen.

Es gibt nichts Neues unter der Sonne, und so führt uns dieser letzte Gedankengang fast wieder zur Newtonschen Theorie des Lichtes zurück, dieser merkwürdigen Mischung von Wellenlehre und Korpuskulartheorie. Vielleicht ist etwas Gefühlsmäßiges mit dieser „Rückkehr zu Newton“ verbunden. Aber die Annahme, Newtons wissenschaftlicher Ruf erfahre durch die de Brogliesche Theorie eine besondere Rechtfertigung, wäre ebenso unsinnig wie die, ihm könne

durch die Einsteinsche Gravitationstheorie irgendwie Abbruch geschehen. Es gibt keine Erscheinung, die Newton bekannt war, welche sich nicht mit Hilfe der Wellenlehre restlos deuten ließe. Als man die Scheinbeweise hinwegräumte, unter deren Einfluß Newton zur Aufstellung seiner korpuskulare Vorstellungen enthaltenden Theorie kam, bedeutete dies einen ebensolchen wissenschaftlichen Fortschritt, wie jetzt die Aufstellung der (möglicherweise) stichhaltigen Beweise, die uns heute zugunsten einer Korpuskulartheorie beeinflussen. Sich einzubilden, daß Newtons wissenschaftlicher Ruf in den Umwälzungen unserer Tage auf und ab schwanke, hieße Wissenschaft und Allwissenheit verwechseln.

Aber kehren wir zu unserem „Wellikel“ zurück. — Wenn das, was wir bisher als Welle angesehen haben, gleichzeitig etwas von der Natur eines Partikels hat, könnte nicht auch umgekehrt das, was wir für Partikel hielten, etwas von der Natur einer Welle besitzen? Erst in diesem Jahrhundert sind Experimente ausgeführt, die uns eine Vorstellung von der korpuskularen Natur des Lichtes geben. Vielleicht sind auch Experimente möglich, die uns die Vorstellung von einer Wellennatur des Elektrons geben.

Sie werden nun denken, der erste Schritt zur Aufklärung des Konfliktes sei eher dazu angetan, das Mysterium noch zu vertiefen. Anstatt zu erklären, wie etwas gleichzeitig die sich widersprechenden Eigenschaften von Welle und Korpuskel haben könne, schlagen wir vor, man möge experimentell beweisen, daß diese Eigenschaften allgemein gekoppelt auftreten, daß es weder reine Wellen noch reine Partikel gebe.

Das Kennzeichen für die Wellennatur ist die Verbreiterung eines Lichtstrahles beim Durchgang durch eine enge Öffnung — eine wohlbekannte Erscheinung, die „Beugung“ genannt wird. Der Betrag der Verbreiterung ist proportional der Wellenlänge des Lichtes. De Broglie hat gezeigt, wie man die Wellenlänge berechnen muß — falls es so etwas überhaupt gibt —, die mit einem Elektron verbunden ist, wenn man es nämlich nicht mehr als reines Partikel, sondern als „Wellikel“ ansieht. Es zeigt sich, daß unter gewissen Umständen die entsprechende Beugung groß genug ist, um experimentell nachweisbar zu sein. In der Tat kann man heute eine Anzahl Experimente als Bestätigung dieser Voraussage anführen. Ich weiß nicht, ob man diese Experi-

mente bereits als entscheidend ansehen darf, doch scheint jedenfalls sehr viel dafür zu sprechen, daß bei der Streuung von Elektronen durch Atome Erscheinungen auftreten, die der üblichen Auffassung, Elektronen seien reine Partikel, widersprechen. Diese Effekte sind den Beugungs- und Interferenzerscheinungen des Lichtes analog und führen uns mitten hinein in den Erscheinungskomplex der Wellenlehre. Früher haben solche Phänomene die reine Korpuskulartheorie des Lichtes verdrängt. Vielleicht erleben wir es jetzt, daß entsprechende Effekte die reine Korpuskulartheorie der Materie verdrängen*.

Einen ähnlichen Gedanken haben Einstein und Bose in ihrer „neuen statistischen Mechanik“ entwickelt, — wenigstens scheint dies die physikalische Ausdeutung ihrer außerordentlich abstrakten mathematischen Theorie zu sein. Wie dies so oft geschieht, hat der Übergang von der klassischen zur statistischen Mechanik, so tiefgreifend der Umschwung in betreff der prinzipiellen Grundlagen auch sein mag, bei der Anwendung auf gewöhnliche praktische Fragestellungen nur unbedeutende Korrekturen zur Folge gehabt. Bemerkenswerte Unterschiede hätte man nur bei Materie von ungleich höherer Dichte erwarten können, als bis dahin jemals entdeckt worden war oder auch nur für möglich gehalten wurde. Es ist ein sehr merkwürdiges Zusammentreffen: Gerade zu der Zeit, als man erkannte, daß die Eigenschaften sehr dichter Materie ganz anders geartet sein könnten, als nach der klassischen Mechanik zu erwarten war, wurde solche dichte Materie tatsächlich im Weltraum entdeckt. Es steht wohl astronomisch außer jedem Zweifel, daß wir in den sogenannten weißen Zwergen Sterne von einer Dichte der Materie besitzen, die weit über alle unsere irdische Erfahrung hinausreicht. Der Begleiter des Sirius hat z. B. eine Dichte von über 60 Kilogramm pro Kubikzentimeter. Diese merkwürdigen Verhältnisse erklären sich daraus, daß infolge der außerordentlich hohen Temperatur und der entsprechend heftigen Wärmebewegung der Atomverband zerrißt, indem die äußeren Elektronensysteme aufbrechen, so daß die Trümmer ungleich enger gepackt sein können. Bei gewöhnlichen Temperaturen wird der winzig kleine Atomkern durch die Außenelektronen abgeschirmt,

* Die Beweise sind seit Abhaltung dieser Vorträge ungleich zwingender geworden.

so daß selbst bei ganz hohen Drucken andere Atome nicht nahe heran können. Aber bei Temperaturen, wie sie auf derartigen Sternen herrschen, wird die Wärmebewegung so heftig, daß die Außenelektronen ihren Posten verlassen und ausschwärmen. Unter genügend hohem Druck wird somit eine außerordentlich dichte Packung möglich. R. H. Fowler hat gefunden, daß in den weißen Zwergen die Dichte so enorm ist, daß die klassischen Methoden versagen und die neue statistische Mechanik zur Anwendung gelangen muß. Hierdurch wird gleichzeitig eine merkwürdige Unstimmigkeit behoben, die sich bei diesen Sternen herausgestellt hatte. Nach klassischen Gesetzen schienen derartige Sterne einem unhaltbaren Zustand entgegenzugehen: Der Stern ist gezwungen, unaufhörlich Wärme abzugeben, ohne die zur Abkühlung erforderliche Energie zu besitzen *!

Der Übergang zur neuen Theorie. Im Jahre 1925 hatte sich der Mechanismus der herrschenden Theorie abermals als brüchig erwiesen und einen Neuaufbau dringend erforderlich gemacht. Das Bohrsche Atommodell hatte endgültig versagt. Dieses zu großer Berühmtheit gelangte Modell stellt das Atom als eine Art Sonnensystem mit einem positiv geladenen Zentralkern dar, um den eine Anzahl Elektronen als Planeten ihre Bahnen beschreiben, und dessen besondere Eigentümlichkeit darin besteht, daß unter den nach den klassischen Gesetzen möglichen Bahnen durch die auf S. 191 angeführten Quantenregeln eine Auswahl getroffen wird. Da die Emission einer Linie des Atomspektrums stets mit dem Sprung eines Elektrons von einer Bahn auf eine andere verbunden ist, so muß die Einordnung der Spektrallinien in ein System parallel mit der Einordnung der Bahnen nach ihren Quantenzahlen im Modell laufen. Und in der Tat, als die Spektroskopiker die verschiedenen Serienlinien der Spektren zu entwirren begannen, erwies es sich als möglich, jeder Linie einen bestimmten Quantensprung zuzuordnen und somit das Auftreten jeder Linie aus dem Modell zu erklären. Jedoch hörte diese Übereinstimmung bei gewissen Fragen der Feinstruktur auf. Man darf schließlich von einem Modell nicht alles erwarten und es

* Die Energie ist erforderlich, weil der Stern, wenn er sich abkühlt, wieder normalere Dichte annehmen und sich infolgedessen außerordentlich stark ausdehnen, also Arbeit gegen die Schwerkraft leisten muß.

hätte uns nicht zu wundern brauchen, wenn das Modell bei der Darstellung unbedeutender Nebenerscheinungen versagt oder gewisse Einzelheiten nur ungenau wiedergegeben hätte. Aber die Schwierigkeiten, die sich jetzt erhoben, waren anderer Art: es waren z. B. im Modell nur zwei Quantenübergänge zur Darstellung von drei offenbar in engem Zusammenhang stehenden Spektrallinien vorgesehen. Das Atommodell, das sich bis zu einem gewissen Punkt außerordentlich brauchbar zur Darstellung von Atomspektren erwiesen hatte, versagte plötzlich vollkommen, und die Spektroskopiker sahen sich gezwungen, das Modell fallen zu lassen und die Einordnung der Linien ohne weitere Berücksichtigung der Modellvorstellungen zu Ende zu führen. Wohl sprach man auch noch fernerhin von Bahnen und Quantensprüngen, aber es lag keine eindeutige Beziehung mehr zu den Bahnen des Modells vor*.

Die Zeit war offenbar reif für die Geburt einer neuen Theorie. Die Lage war so:

1. Es war allgemeiner Brauch, die klassischen Gesetze anzuwenden, jedoch mit der ergänzenden Bestimmung, daß, wo immer eine Wirkungsgröße auftrat, diese gleich h sein mußte oder bisweilen gleich einem ganzen Vielfachen von h .

2. Diese Bestimmung führte häufig zu einer in sich widerspruchsvollen Anwendung der klassischen Theorie. So war in dem Bohrschen Atom die Beschleunigung, die das Elektron bei seinem Umlauf erfährt, den klassischen Gesetzen der Elektrodynamik unterworfen, während seine Strahlung nach der h -Regel erfolgte. In der klassischen Elektrodynamik sind aber Beschleunigung und Strahlung untrennbar miteinander verknüpft.

3. Das eigentliche Gültigkeitsgebiet der klassischen Gesetze war bekannt. Man wußte, daß sie einen Grenzfall der allgemeineren Gesetze für den Fall sehr hoher Quantenzahlen bilden. Will man aber das vollständige System dieser allgemeineren Gesetze erkennen, so darf man sie nicht mit

* Jede Bahn, d. h. jeder Zustand des Atoms erfordert drei (oder zur Darstellung gewisser Feinheiten vier) Quantenzahlen. Die ersten beiden Quantenzahlen werden durch das Bohrsche Atommodell genau richtig dargestellt, aber die dritte Quantenzahl, die zur Bestimmung von Linien dient, die ein Dublett- oder Multiplett-Spektrum bilden, wird falsch dargestellt, was einen weit größeren Fehler bedeutet, als wenn sie in dem Modell überhaupt nicht zum Ausdruck käme.

klassischen Vorstellungen vermengen, die nur für den Grenzfall Geltung haben.

4. Der bisherige Kompromiß beruhte auf der Erkenntnis, daß Licht sowohl korpuskulare Eigenschaften als auch Welleneigenschaften besitzt. Derselbe Gedanke wurde mit Erfolg auch auf unsere Anschauung von der Natur der Materie ausgedehnt und durch das Experiment bestätigt gefunden. Doch läßt dieser Erfolg das Bedürfnis nach einer weniger widerspruchsvollen Ausdeutung dieser Eigenschaften nur um so brennender erscheinen.

5. Obgleich die unter 1. genannte Arbeitsregel sich im allgemeinen erfolgreich gezeigt hatte, so ergab sie doch schließlich eine Verteilung der Elektronenbahnen im Atom, die in einigen wesentlichen Punkten zu Widersprüchen mit den spektroskopisch festgestellten Tatsachen führte. Ein Neuaufbau der Theorie erwies sich somit nicht nur aus logischen Gründen als notwendig, sondern auch im Hinblick auf brennende Fragen der praktischen Physik.

Die Entwicklungsphasen der neuen Quantentheorie. „Die neue Quantentheorie“ verdankt ihre Entstehung einer äußerst bemerkenswerten Arbeit von Heisenberg im Herbst 1925. Ich schreibe den ersten Entwurf meiner Vorträge gerade zwölf Monate nach der Veröffentlichung dieser wichtigen Arbeit nieder. Das ist kein langer Zeitraum für die Entwicklung einer derartigen Theorie. Trotzdem hat die neue Quantentheorie bereits drei Phasen durchgemacht, die mit den Namen Born und Jordan, Dirac, Schrödinger verknüpft sind. Im Augenblick ist meine größte Sorge, daß sie nicht in eine neue Phase tritt, bevor die Vorträge herauskommen. Eigentlich müßte man die drei Phasen als drei gesonderte Theorien ansehen. Wohl gehen alle drei von der Heisenbergschen Pionierarbeit aus, aber es kommt doch eine recht verschiedene Denkweise in diesen drei Theorien zum Ausdruck. Die erste Theorie beschreitet den neuen Weg voll nüchterner Realität; die zweite ist außerordentlich transzendental, fast mystisch; und die dritte Theorie scheint auf den ersten Blick ein erneutes Hinlenken nach den klassischen Ideen zu bedeuten, doch ist dieser Eindruck offenbar falsch. Daraus, daß innerhalb von zwölf Monaten nacheinander drei Prätendenten sich der Herrschaft bemächtigt haben, können Sie die Anarchie dieses Zweiges der Physik ermessen, aber den stetigen Fortschritt, der trotz allem

innerhalb dieses kurzen Zeitraumes stattgefunden hat, können Sie nur erkennen, wenn Sie sich in die mathematische Darstellung vertiefen. Denn der mathematische Inhalt ist in allen drei Theorien derselbe, so verschieden auch der philosophische Gehalt sein mag. Unglücklicherweise darf ich gerade den mathematischen Inhalt in diesen Vorträgen nicht behandeln.

Trotzdem werde ich mich ein wenig über diese Bestimmung hinwegsetzen, indem ich eine einzige mathematische Formel hinschreibe — nur zur Betrachtung, denn ich bin nicht so unvernünftig, zu erwarten, daß Sie dieselbe verstehen. Alle Autoritäten scheinen in der einen Behauptung übereinzustimmen, daß an der Wurzel, oder fast an der Wurzel aller Dinge in der physikalischen Welt die mystische Formel steht:

$$qp - pq = ih/2\pi.$$

Was sie eigentlich bedeutet, verstehen wir alle noch nicht. Wenn wir es verstünden, würden wir die Formel vielleicht gar nicht für so fundamental halten. Hingegen befinden sich die geübten Mathematiker in der vorteilhaften Lage, sie anwenden zu können und haben dies in den letzten ein bis zwei Jahren auch mit viel Erfolg getan. Mit Hilfe dieser Formel wurden nicht nur die in der alten Quantentheorie dargestellten Phänomene, wie z. B. die h -Regel, erfaßt, sondern noch viele ähnliche, die sich der Behandlung nach der alten Theorie entzogen.

Auf der rechten Seite der Formel sehen wir neben dem Wirkungsquantum h und dem numerischen Faktor $1/2\pi$ die von den Mathematikern i genannte Quadratwurzel aus -1 . Das könnte nach Zauberei und Mystik aussehen, aber es ist nur ein wohlbekannter Trick. Schon im vergangenen Jahrhundert wußten die Physiker und Ingenieure sehr wohl, daß das Auftreten der Größe $\sqrt{-1}$ in ihren Formeln das Zeichen dafür war, daß sie es mit Wellen oder Schwingungen zu tun hatten. Die rechte Seite enthält also nichts Fremdartiges, doch um so ungewöhnlicher ist die linke. Wir nennen q und p Koordinaten und Impulse, indem wir die Bezeichnungen aus der Welt von Raum und Zeit und anderer grobkörniger Erfahrung entlehnen. Doch wirft diese Bezeichnung kein Licht auf die wahre Natur der q und p , noch erklärt sie, warum qp sich über alles gute Benehmen hinwegsetzt und ungleich pq ist.

An dieser Stelle offenbart sich der Hauptunterschied zwischen den drei Theorien. Selbstverständlich können q und p nicht einfache Maßzahlen darstellen, denn dann müßte $qp - pq = 0$ sein. Für Schrödinger bedeutet p einen Operator. Sein „Impuls“ ist nicht eine Größe, sondern ein Signal, daß mit der darauf folgenden Größe, was auch immer sie bedeuten mag, eine bestimmte mathematische Operation ausgeführt werden soll. Für Born und Jordan ist p eine Matrix — nicht eine Größe, noch mehrere Größen, sondern eine unendliche Anzahl von Größen, die zu einem übersichtlichen Schema angeordnet sind. Für Dirac ist p ein Symbol ohne jede numerische Interpretation. Er nennt es eine q -Zahl, wohl um dadurch auszudrücken, daß es überhaupt keine Zahl ist.

Der Gedanke drängt sich mir auf, daß in der Art, wie Dirac das Problem behandelt, eine Idee liegt, die von großer philosophischer Bedeutung sein kann, ganz unabhängig davon, ob sie in dieser speziellen Anwendung Erfolg hat oder nicht. Die Idee lautet: Wenn wir immer tiefer und tiefer nach dem schürfen, was am Grunde aller physikalischen Erscheinungen liegen mag, so müssen wir darauf gefaßt sein, auf Dinge zu stoßen, die, wie so vieles, was durch Erfahrung in unser Bewußtsein eingeht, sich auf keine Weise durch Maßzahlen ausdrücken lassen. Die Idee deutet ferner einen Weg an, wie die exakte Physik, d. h. die Physik, welche den Erscheinungen bestimmte Maßzahlen zuordnet, auf einer derartigen Grundlage aufgebaut werden kann.

Eine der größten Veränderungen, von denen die Physik seit dem neunzehnten Jahrhundert bis zum heutigen Tage betroffen wurde, ist die Änderung unseres Ideals einer wissenschaftlichen Erklärung. Um die Mitte des vorigen Jahrhunderts setzten die Physiker ihren Stolz darein, erst dann von einem Dinge zu behaupten, daß sie es verstanden hätten, wenn sie ein Modell davon machen konnten. Dabei verstanden sie unter Modell etwas, das aus Hebeln, Zahnrädern usw., kurz aus Hilfsgeräten des Ingenieurs erbaut war. Man ging gewissermaßen von der Voraussetzung aus, die Natur sei beim Bau des Weltalls auf die gleichen Hilfsquellen angewiesen gewesen wie ein menschlicher Mechaniker; und wenn der Physiker nach der Erklärung einer Erscheinung forschte, versuchte sein Ohr gleichsam das Summen der Maschinerie zu erlauschen. Wer die Gravi-

tation mit Hilfe von Zahnrädern hätte erklären können, wäre als Held jener Epoche gefeiert worden.

Heute erwarten wir nicht mehr vom Ingenieur den Aufbau der Welt, vielmehr wenden wir uns an den Mathematiker, er möge ihn mit seinen Hilfsmitteln errichten. Ohne Zweifel ist der Mathematiker weniger erdegebunden als der Ingenieur, aber vielleicht sollte man auch ihm die Schöpfung der Welt nicht ohne Vorbehalt anvertrauen. Wir haben es in der Physik mit einer Welt der Symbole zu tun; der Mathematiker aber ist der berufene Herrscher über Symbole, und so läßt sich seine Hilfe kaum umgehen. Wir müssen jedoch fordern, daß er bei der ihm anvertrauten verantwortungsreichen Aufgabe alle seine Möglichkeiten voll ausnützt und nicht seiner natürlichen Neigung für Symbole mit arithmetischer Ausdeutung allzu einseitig nachgibt. Unser Ziel ist, die innere Gesetzmäßigkeit der Natur selbst zu erfassen, nicht die Gesetze, welche der Verstand des Menschen in sie hineinträgt. Dazu aber scheint es mir vor allem notwendig, sich so weitgehend wie möglich von dem erstarrten Rüstwerk zu befreien, in das der Verstand nur zu leicht bereit ist, alle Erfahrung einzuzwängen.

Ich denke, es ist gerade diese Befreiung von erstarrten Begriffen, welche die Diracsche Betrachtungsweise verbürgen will. Dirac geht von etwas aus, was sich weder durch Zahlen noch durch Zahlensysteme ausdrücken läßt, und seine Grundgesetze sind symbolische Ausdrücke, die nichts mit arithmetischen Operationen zu tun haben. Das Zauberhafte aber ist, daß trotzdem bei fortschreitender Entwicklung seiner Theorie wirkliche Zahlen aus diesen Symbolen hervorgehen. Obgleich p und q einzeln nichts mit Arithmetik zu tun haben, kommt der Form $qp - pq$ die arithmetische Bedeutung zu, die wir in obiger Formel niedergeschrieben haben. Gerade weil sie Zahlen hervorbringt, ohne selbst zahlenhaft zu sein, kann eine solche Theorie den Maßzahlen als Grundlage dienen, die den Inhalt der exakten Naturwissenschaften bilden. Diese Maßzahlen, die das einzige sind, was wir durch physikalische Beobachtung von der Welt erhaschen, können nicht die ganze Welt sein. Vielleicht enthalten sie nicht einmal so viel von ihr, daß sie ein in sich geschlossenes Gebilde darstellen könnten. Dies ist meiner Ansicht nach die natürliche Auslegung des Diracschen Versuches, die Grundgesetze der exakten Physik in einem nicht-arithmetischen Kalkül zu finden.

Ich fürchte aber, es ist noch ein weiter Weg, bis sich irgend etwas Derartiges aus den Diracschen Ansätzen entwickeln mag, und zurzeit hat Schrödinger viel von dem Mysterium der p und q beseitigt, indem er zeigt, daß man vorläufig bei ihrer Anwendung mit einer weniger transzendentalen Auslegung weiter kommt. Aber ich liebe nun einmal den Gedanken, daß wir noch nicht das Letzte über die Diracsche Idee vernommen haben.

Die Schrödingersche Theorie genießt zurzeit die Hochflut ihrer Popularität, teilweise wegen der ihr innewohnenden großen Vorzüge, teilweise aber auch, wie ich fürchte, weil sie als einzige der drei Theorien einfach genug ist, um mißverstanden zu werden. Obgleich es mir eigentlich widerstrebt, will ich versuchen, Ihnen hier einen ungefähren Eindruck von dieser Theorie zu vermitteln. Wahrscheinlich wäre es gescheiter, über der Eingangspforte zur Neuen Quantentheorie ein Schild anzunageln mit der Aufschrift: „Bauliche Veränderungen im Gange! — Unbefugten ist der Eintritt streng verboten!“ und außerdem noch dem Türhüter eine besondere Anweisung zu geben, neugierige Philosophen auf keinen Fall einzulassen. Doch will ich mich hier mit einem gewissen Protest begnügen. Trotz ihres bedeutenden Erfolges bei mannigfachen aktuellen Problemen, trotzdem sie wegen ihres praktischen Nutzens ganz unentbehrlich sind, spricht in meinen Augen nichts dafür, daß die Schrödingerschen Ideen in ihrer gegenwärtigen Form langen Bestand haben werden.

Kurzer Abriss der Schrödingerschen Theorie. Stellen Sie sich einen Sub-Äther vor, dessen Oberfläche von kleinen Wellen gekräuselt ist. Die Schwingungen dieser kleinen Wellen sind millionenmal schneller als die des sichtbaren Lichtes, — zu schnell für unsere groben Sinne. Die einzelnen Wellen sind unterhalb der Schwelle unseres Wahrnehmungsvermögens. Was wir gewahr werden, ist ihre gemeinsame Wirkung, wenn sie durch Konvergieren und Überlagerung die Erregung auf ein Gebiet beschränken, das groß ist im Vergleich zu den einzelnen Wellen, aber immer noch klein im Vergleich zu unseren eigenen Riesen-Maßen. Ein solches Erregungsgebiet nehmen wir als materielles Teilchen wahr, insbesondere kann es ein Elektron sein.

Der Sub-Äther ist ein dispergierendes Medium, das bedeutet, die Wellen pflanzen sich in ihm nicht alle mit der

gleichen Geschwindigkeit fort. Wie bei Wasserwellen hängt ihre Geschwindigkeit von ihrer Wellenlänge bzw. ihrer Periode ab. Je kürzer die Periode, um so größer die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Außerdem kann die Geschwindigkeit durch lokale Verhältnisse beeinflusst werden, was in der Schrödingerschen Theorie das Gegenstück zu dem Kraftfeld der klassischen Physik darstellt. Man wird leicht einsehen, daß, wenn wir alle Erscheinungen auf die Ausbreitung von Wellen zurückführen, auch die Einwirkung eines Körpers auf seine Nachbarschaft, also das, was gewöhnlich als Kraftfeld dieses Körpers bezeichnet wird, in einer Beeinflussung der Wellenausbreitung in dem ihn umgebenden Gebiet bestehen muß.

Wir stehen also vor der Aufgabe, die Erscheinungen im Sub-Äther zu den Erscheinungen auf der Ebene unserer verhältnismäßig groben Erfahrung in Beziehung zu bringen. Wie bereits festgestellt, nehmen wir ein lokal beschränktes stürmisches Gebiet als Partikel wahr. Zu dieser Festsetzung fügen wir noch hinzu, daß die Frequenz (Anzahl der Schwingungen in der Sekunde) der die Störung hervorrufenden Wellen von uns als Energie des Partikelchens wahrgenommen wird. Ich werde sogleich zu erklären versuchen, wie es kommt, daß die Periode der Welle sich uns in so merkwürdiger Verkleidung zeigt. Wie dem auch sei, die Erkenntnis, daß einer Frequenz im Sub-Äther eine Energie in unserer groben Wahrnehmung entspricht, liefert uns mit einem Schlage das konstante Verhältnis zwischen Periode und Energie, das die h -Regel fordert.

Wenn auch im allgemeinen die Schwingungen im Sub-Äther zu schnell für die direkte Wahrnehmung sind, so kann die Frequenz doch dadurch zur Ebene unserer gewöhnlichen Erfahrung auftauchen, daß sie, wie wir sahen, die Ausbreitungsgeschwindigkeit beeinflusst. Nennen wir die Frequenz ν , so muß die Gleichung, die das Gesetz der Ausbreitung dieser Wellen zum Ausdruck bringt, einen Term in ν enthalten. Nun muß der Einwirkung des von Körpern der Umgebung ausgehenden „Kraftfeldes“ ein zweiter Term entsprechen. Da dieser sich für unsere grobe Erfahrung auf dieselbe Weise bemerkbar macht wie ν selbst, kann er als eine unechte Abart des ν aufgefaßt werden. Wenn ν derartige Erscheinungen hervorruft, daß wir es als Energie wahrnehmen, so wird das unechte ν ähnliche Erscheinungen hervorrufen, die einer unechten Abart der Energie ent-

sprechen. Diese letztere Energieform wird das sein, was wir potentielle Energie nennen, denn sie entsteht aus den Einwirkungen, die auf das Vorhandensein der umgebenden Objekte zurückzuführen sind.

Angenommen, es sind uns sowohl das wirkliche ν als auch das unechte oder potentielle ν für unsere Sub-Wellen bekannt, dann können wir die Gleichung für die Ausbreitung der Wellen, die sogenannte „Wellengleichung“, aufstellen und an die Lösung eines jeden Problems gehen, das auf die Ausbreitung von Wellen zurückzuführen ist. Insbesondere läßt sich die Bewegung des Erregungsgebietes bestimmen. Wir erhalten ein bemerkenswertes Ergebnis, das uns das erste Mittel an die Hand gibt, unsere Theorie zu kontrollieren. Das Erregungsgebiet bewegt sich (falls es klein genug ist) nach genau denselben Gesetzen, welche die Bewegung von Partikelchen in der klassischen Mechanik bestimmen: Die Bewegungsgleichungen einer Wellengruppe mit gegebener Frequenz und gegebener Potential-Frequenz sind die gleichen, wie die klassischen Bewegungsgleichungen für ein Partikel mit der entsprechenden kinetischen Energie und potentiellen Energie.

Ich muß darauf aufmerksam machen, daß die Geschwindigkeit eines Erregungsgebietes oder einer Wellengruppe nicht dasselbe ist wie die Geschwindigkeit einer einzelnen Welle. Diese Tatsache ist bei Wasserwellen allgemein bekannt als Unterschied zwischen Gruppengeschwindigkeit und Wellengeschwindigkeit. Es ist die Gruppengeschwindigkeit der Wellen im Sub-Äther, die von uns als Bewegung eines materiellen Teilchens wahrgenommen wird.

Doch wäre damit wenig gewonnen, wenn unsere Theorie nicht mehr leisten würde, als mit Hilfe ziemlich phantastischer Voraussetzungen dieselben Ergebnisse zu liefern wie die klassische Mechanik. Ihre besonderen Verdienste beginnen erst offenbar zu werden, wenn es sich um solche Erscheinungen handelt, welche die klassische Mechanik nicht mehr erfassen kann. Wir haben ein Erregungsgebiet betrachtet von so geringer Ausdehnung, daß seine Lage ebenso genau bestimmbar war wie die Lage eines klassischen Partikelchens. Wir wollen jetzt ein Gebiet von größerer Ausdehnung untersuchen. Da man keine präzise Unterscheidung zwischen einem großen und einem kleinen Ge-

biete machen kann, so werden wir fortfahren, die Vorstellung von einem materiellen Teilchen auch mit dem Erregungsgebiet von größerer Ausdehnung zu verbinden. Während jedoch eine eng begrenzte Erregung die Lage des Teilchens auf ein enges Gebiet beschränkt, läßt eine ausgedehntere Erregung die Lage unbestimmt. Wenn wir versuchen, eine ausgedehnte Wellengruppe in der Sprache der klassischen Theorie zu beschreiben, so müssen wir sagen, daß sie ein Partikel darstellt, das sich nicht an einem bestimmten Punkt im Raume befindet, sondern an ein ausgedehntes Gebiet lose gebunden ist.

Sie werden vielleicht denken, ein ausgedehntes Wellengebiet entspräche einer diffusen Materie im Gegensatz zu einem konzentrierten Partikel. Die Schrödingersche Theorie verlangt es anders. Die Ausbreitung des Gebietes bedeutet nicht ein Ausbreiten der Dichte, sondern eine Unbestimmtheit der Lage, d. h. die Wahrscheinlichkeit, daß sich die Lage des Elektrons innerhalb bestimmter Grenzen befindet, ist auf ein weiteres Gebiet verteilt. Wenn also Schrödingersche Wellen ein Gefäß gleichförmig ausfüllen, so bedeutet das nicht, daß das Gefäß mit Materie von gleichförmiger Dichte erfüllt ist, sondern daß es ein Partikel enthält, für das die Wahrscheinlichkeit, an einer bestimmten Stelle zu sein, überall im Gefäß gleich groß ist.

Der erste große Erfolg der Theorie war die Darstellung der Lichtemission eines Wasserstoffatoms, ein Problem, das bereits weit außerhalb des Zuständigkeitsbereiches der klassischen Theorie liegt. Das Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron, die wir in ihre entsprechenden Gegenstücke im Sub-Äther übersetzen müssen. Hierbei kümmert uns nicht, wie sich das Proton im besondern verhält, und so erübrigt sich seine Darstellung durch Schrödingersche Wellen. Nur sein Kraftfeld ist für uns wichtig, d. h. sein unechtes ν , das in die Wellengleichung für das Elektron eingeht. Die Wellen, die sich entsprechend dieser Gleichung ausbreiten, sind das Schrödingersche Äquivalent für das Elektron; und jede Lösung der Gleichung liefert einen möglichen Zustand des Wasserstoffatoms. Wenn wir die physikalisch einleuchtende Einschränkung machen, daß die Amplitude der Wellen nirgends unendlich groß sein darf, so erhalten wir nur für ganz bestimmte Frequenzen eine Lösung der Gleichung. In dem Wasserstoffatom sind also die Wellen des Sub-Äthers auf eine be-

stimmte diskrete Serie von Eigenfrequenzen beschränkt. Bedenken wir nun, daß einer Frequenz im Sub-Äther eine Energie in unserer groben Erfahrung entspricht, so bedeutet dies, daß das Atom entsprechend nur eine diskrete Serie von möglichen Energiezuständen annehmen kann. Man findet, daß diese Energieniveaus genau die gleichen sind, die im Bohrschen Atommodell durch die Quantenregeln bestimmt werden (S. 191). Es ist ein beträchtlicher Fortschritt, daß man diese Energien auf Grund einer Wellentheorie zwangsläufig bestimmen kann, anstatt sie auf Grund einer nicht näher erklärbaren mathematischen Regel berechnen zu müssen. Darüber hinaus hat die Anwendung der Schrödingerschen Theorie auch noch bei komplexeren Atomen Erfolg, bei denen das Bohrsche Modell versagt. Sie liefert immer die richtige Anzahl Energien oder „Bahnen“, so daß für jede beobachtete Spektrallinie ein Quantensprung zur Verfügung steht.

Es wird jedoch von Vorteil sein, an dieser Stelle noch nicht den Übergang von der Wellenfrequenz zur klassischen Energie zu machen, sondern den Lauf der Ereignisse im Sub-Äther noch ein wenig weiter zu verfolgen. Es würde sehr schwierig sein, wollte man sich ein Elektron vorstellen, das gleichzeitig zwei Energien besitzt (d. h. sich gleichzeitig auf zwei Bohrschen Bahnen befindet); aber es liegt kein Grund vor, weswegen nicht gleichzeitig Wellen von zwei verschiedenen Frequenzen im Sub-Äther vorhanden sein sollten. Auf diese Weise gestattet die Wellentheorie ganz natürlich die Darstellung eines Zustandes, den die klassische Theorie nur mit paradoxen Ausdrücken beschreiben konnte. Angenommen, wir haben zwei Wellengruppen. Wenn der Frequenzunterschied zwischen ihnen nicht groß ist, so werden die beiden Wellensysteme „Schwebungen“ hervorrufen, ungefähr so, wie dies auch zwei Radiostationen tun, die mit sehr nahe aneinanderliegenden Wellenlängen senden. Man hört dann einen musikalischen Ton oder ein schrilles Geräusch als Resultat der Schwebungen der beiden Trägerwellen; die ursprünglichen Schwingungen sind zu schnell, um hörbar zu sein, aber ihr Zusammentreffen erzeugt Schwebungen, die langsam genug sind, um auf das Ohr zu wirken. In derselben Weise bestehen die ursprünglichen Wellensysteme im Sub-Äther aus Schwingungen, die bei weitem zu schnell sind, um unsere groben Sinne zu reizen; aber sie erzeugen Schwebungen, die manchmal langsam genug sind, um

in die für das Auge wahrnehmbare Oktave zu fallen. Diese Schwebungen sind die Quelle für das vom Wasserstoffatom emittierte Licht, und ihre mathematische Berechnung ergibt Frequenzen, die genau mit den beobachteten Spektrallinien des Wasserstoffs übereinstimmen. Überlagerung (Heterodyne) der Trägerwellen des Radio erzeugt Schall, Überlagerung der Wellen des Sub-Äthers erzeugt Licht. Die Theorie liefert nicht nur die Perioden der einzelnen Spektrallinien, sondern sie sagt auch ihre Intensitäten voraus, — eine Aufgabe, der die alte Quantentheorie in keiner Weise gewachsen war. Sie müssen mich aber nicht mißverstehen, man darf nicht die Schwebungen selbst mit Lichtwellen identifizieren. Die Schwebungen finden im Sub-Äther statt, während die Lichtwellen Ätherwellen sind. Die Schwebungen im Sub-Äther liefern nur die Schwingungsquelle, die auf eine bisher unaufzeigbare Weise Lichtwellen derselben Periode ausstrahlt.

Was ist nun dieses Etwas, von dem wir annehmen, daß es schwingt, wenn wir von Wellen im Sub-Äther sprechen? Bezeichnet wird es mit ψ und wir sollten es eigentlich als einen undefinierbaren Elementarbereich der Wellentheorie ansehen. Aber können wir nicht doch irgendeine klassische Auslegung dafür finden? Es scheint möglich, dieses ψ als eine Wahrscheinlichkeit zu deuten. Die Wahrscheinlichkeit, daß sich das materielle Teilchen oder das Elektron in einem gegebenen Gebiet befindet, ist proportional dem Betrag von ψ in diesem Gebiet. Wenn ψ im wesentlichen auf ein sehr kleines Erregungsgebiet konzentriert ist, dann ist es so gut wie sicher, daß sich das Elektron an dieser Stelle befindet; dann können wir seine Lage genau bestimmen und uns ein klassisches Partikel darunter vorstellen. Beim Wasserstoffatom jedoch sind die ψ -Wellen über das ganze Atom verbreitet, und es ist daher nicht möglich, die Lage des Elektrons genau anzugeben, wenn auch gewisse Lagen wahrscheinlicher sind als andere*.

* Man setzt diese Wahrscheinlichkeit oft proportional ψ^2 anstatt ψ , wie wir oben angenommen haben. Die Deutung ist recht dunkel, aber es scheint darauf anzukommen, ob wir die Wahrscheinlichkeit betrachten, nachdem wir wissen, was geschehen ist, oder um uns ein Bild zu machen, was geschehen wird. ψ^2 wird erhalten, wenn man zwei symmetrische Systeme von ψ -Wellen einführt, die sich zeitlich in entgegengesetzten Richtungen fortpflanzen. Immer eins davon muß vermutlich der wahrscheinlichen Folge aus dem entsprechen, was als früherer Zustand bekannt (oder festgesetzt) ist. Wahrscheinlichkeit bedeutet notwendiger

Ich möchte Ihre Aufmerksamkeit auf eine äußerst wichtige Konsequenz der Schrödingerschen Theorie lenken. Ein hinreichend kleines Erregungsgebiet entspricht sehr nahe einem Partikelchen, das sich nach klassischen Gesetzen bewegt. Man sollte daher annehmen, daß ein Teilchen, das nur noch einen bewegten Punkt darstellt, dem Grenzfall entspricht, wo das Erregungsgebiet auf einen einzigen Punkt zusammenschrumpft. Es geschieht nun aber das Merkwürdige, daß der Idealfall des klassischen Partikels niemals wirklich erreicht wird, wenn wir das Erregungsgebiet immer kleiner machen. Zwar nähern wir uns dem Ideal zuerst, aber nur, um uns zuletzt wieder zu entfernen. Wir haben gesehen, daß die Wellengruppe sich wie ein (irgendwo im Erregungsgebiet lokalisiertes) Partikelchen bewegt, das eine der Wellenfrequenz entsprechende Energie besitzt. Um also vollkommen einem klassischen Partikelchen zu gleichen, müßte nicht nur das Gebiet auf einen Punkt reduziert werden, sondern gleichzeitig müßte auch die Wellengruppe nur eine einzige Frequenz enthalten. Diese beiden Bedingungen sind jedoch nicht miteinander vereinbar. Im Falle einer einzigen Frequenz haben wir es notwendig mit einem unendlichen Wellenzuge zu tun, dem keinerlei Grenze gesetzt ist. Die Begrenztheit einer Wellengruppe entsteht durch Interferenz von Wellen, deren Längen nur ganz wenig verschieden sind, so daß sie sich in der Mitte des Gebietes gegenseitig verstärken, an der Grenze aber aufheben. Um Ihnen ein ungefähres Bild zu geben: Wenn die Gruppe einen Durchmesser von 1000 Wellenlängen hat, muß ein Spielraum für die Wellenlänge von 0,1 % vorhanden sein, so daß 1000 von den längsten Wellen dieselbe Entfernung ausfüllen wie 1001 von den kürzesten. Betrachten wir ein konzentrierteres Erregungsgebiet von nur 10 Wellenlängen Durchmesser, so wächst der Spielraum auf 10 %. Es erfüllen dann 10 von den längsten und 11 von den kürzesten Wellen dieselbe Entfernung. Indem wir bestrebt sind, die Lage des Partikelchens durch Verkleinerung des Erregungsgebietes bestimmter zu machen, bewirken wir, daß seine Energie unbestimmter wird, indem die Streuung der Wellenfrequenzen

weise „Wahrscheinlichkeit im Lichte einer bestimmten vorliegenden Kunde“, so daß bei verschiedenen Klassen von Problemen, bei denen der Anfangszustand auf verschiedene Art und Weise angegeben ist, die Wahrscheinlichkeit vielleicht gar nicht durch dieselbe Funktion dargestellt werden kann.

zunimmt. Unser Partikel kann niemals gleichzeitig eine genau bestimmte Lage und eine genau bestimmte Energie besitzen. Immer wird es sich von einem klassischen Teilchen entweder durch Unbestimmtheit der Lage oder durch Unbestimmtheit der Energie unterscheiden. Bei ganz subtilen Experimenten dürfen wir infolgedessen nicht erwarten, daß sich die Partikel unter allen Umständen genau so verhalten, wie wir dies von einem klassischen Teilchen voraussetzen, — eine Schlußfolgerung, die mit den oben erwähnten neuesten Experimenten über die Beugung von Elektronen übereinzustimmen scheint.

Wir haben gesehen, daß nach der Schrödingerschen Darstellung das Wasserstoffatom etwas besitzen kann, was mit der Bohrschen Theorie unvereinbar ist, nämlich gleichzeitig zwei Energien. Für ein materielles Teilchen oder ein Elektron ist dies nach Schrödinger nicht nur zulässig, sondern sogar erforderlich, da das Gebiet, in dem es sich befinden kann, sonst keine Grenze hat. Damit wird aber nicht verlangt, daß Sie sich den Zustand eines Teilchens mit verschiedenen Energien vorstellen sollen, vielmehr ist gemeint, daß das übliche Bild eines Elektrons als eines Partikelchens mit einer einzigen Energie zusammengebrochen ist, und daß wir tief in den Sub-Äther tauchen müssen, wenn wir dem Verlauf der Erscheinungen folgen wollen. Trotzdem können wir in allen Fällen, bei denen keine große Genauigkeit gefordert wird, das Bild eines Partikels beibehalten. Wenn für die Bestimmung der Energie eine Genauigkeit von 1 % genügt, so kann man eine Reihe von Energien mit einem Spielraum von 1 % als eine einzige wohlbestimmte Energie auffassen.

Bisher haben wir nur Wellen betrachtet, die einem einzigen Elektron entsprechen, jetzt wollen wir uns einem Problem von zwei Elektronen zuwenden. Wie sollen diese dargestellt werden? „Das ist ganz einfach“, werden Sie sagen, „wir brauchen nur zwei Erregungsgebiete statt eines zu nehmen!“ Ich fürchte, das geht nicht. Auch zwei Erregungsgebiete würden einem einzigen Elektron entsprechen, von dem es nur unbestimmt ist, in welchem der beiden Gebiete es sich befindet. Solange auch nur die geringste Wahrscheinlichkeit besteht, daß sich das erste Elektron in irgend einem Gebiete befindet, können die Schrödingerschen Wellen daselbst nicht eine Wahrscheinlichkeit für ein

anderes Elektron darstellen. Jedes Elektron erfordert den ganzen dreidimensionalen Raum für die ihm entsprechenden Wellen. So stellt denn Schrödinger auch großmütig jedem von ihnen drei Dimensionen zur Verfügung. Für zwei Elektronen wird also ein sechsdimensionaler Sub-Äther nötig sein. In diesem wendet Schrödinger seine Rechnungsweise auf die gleiche Art erfolgreich an. Doch denke ich, daß Schrödinger damit das anschauliche physikalische Bild, das er uns zuerst zu geben schien, wieder zerstört. Sein Sub-Äther existiert nicht im physikalischen Raum; er liegt in einem „Konfigurationsraum“, den ein Mathematiker zwecks Lösung seiner Probleme erdacht hat, und den er je nach dem vorliegenden Problem immer neu mit neuer Dimensionszahl erfindet. Es war nur ein Zufall, daß bei den zuerst betrachteten Problemen der Konfigurationsraum in enger Beziehung zu dem physikalischen Raume stand, und dadurch zu der Vermutung Anlaß gab, den Schrödingerschen Wellen käme ein gewisser Grad objektiver Realität zu. Die Schrödingersche Wellenmechanik ist nicht eine physikalische Theorie, sondern ein mathematischer Kniff, und zwar ein sehr guter.

In Wirklichkeit verhält es sich so, daß gerade die fast allgemeine Anwendbarkeit der Wellenmechanik es verhindert, sie als physikalische Theorie voll anzuerkennen. Ein köstliches Beispiel hierfür finden wir zufällig in der Arbeit von Dirac. In einem der Probleme, die er mit Hilfe Schrödingerscher Wellen löst, entspricht die Wellenfrequenz der Anzahl von Systemen einer gegebenen Art. Die Wellengleichung wird aufgestellt und gelöst, und es zeigt sich (genau wie beim Wasserstoffatom), daß Lösungen nur für eine Reihe bestimmter Frequenzwerte existieren. Infolgedessen muß die Anzahl der Systeme der betrachteten Art gleich einem aus dieser Reihe diskreter Werte sein. In Diracs Problem ergibt sich diese Reihe diskreter Werte als die Reihe der ganzen Zahlen. Demgemäß wird geschlossen, daß die Anzahl der Systeme nur 1, 2, 3, 4, ... sein kann, niemals aber z. B. $2^{3/4}$. Es ist außerordentlich beruhigend, daß die Theorie ein Resultat liefert, das in so guter Übereinstimmung mit der Erfahrung steht! Trotzdem glaube ich, daß wir nicht leicht zu der Überzeugung gebracht werden können, die richtige Erklärung dafür, daß wir in ganzen Zahlen zählen, sei in der Schrödingerschen Wellentheorie zu suchen.

Das Prinzip der Unbestimmtheit. Meine Befürchtung, daß eine vierte Abart der neuen Quantentheorie erscheinen würde, bevor meine Vorträge gehalten wären, hat sich als irrig erwiesen. Einige Monate später jedoch trat die Theorie tatsächlich in eine neue Phase. Wieder war es Heisenberg (im Sommer 1927), der den Anstoß zu einer neuen Entwicklung gab, die dann von Bohr weiter fortgeführt wurde. Das Ergebnis ist ein neues allgemeines Grundprinzip, das an Wichtigkeit dem Relativitätsprinzip gleichzukommen scheint. Wir nennen es das „Prinzip der Unbestimmtheit“. Sein wesentlicher Inhalt läßt sich in folgender Weise formulieren:

Ein Partikel kann eine Lage haben oder es kann eine Geschwindigkeit haben, aber es kann nicht in strengem Sinne beides haben.

Wenn wir uns mit einem gewissen Maß von Ungenauigkeit zufrieden geben und mit Feststellungen, die keine Gewißheit für sich in Anspruch nehmen, sondern nur große Wahrscheinlichkeit, dann ist es möglich, einem Partikel beides, Lage und Geschwindigkeit, zuzuordnen. Wenn wir jedoch nach einer genaueren Bestimmung der Lage streben, tritt etwas sehr Merkwürdiges ein: Wir können zwar eine größere Genauigkeit erreichen, aber nur auf Kosten der Genauigkeit bei der Geschwindigkeitsbestimmung. Und umgekehrt: wenn wir die Geschwindigkeit genauer bestimmen, wird die Lage unbestimmter.

Angenommen z. B., wir wollen Lage und Geschwindigkeit eines Elektrons in einem gegebenen Moment bestimmen. Theoretisch können wir die Lage mit einem möglichen Fehler von $\frac{1}{1000}$ mm und die Geschwindigkeit mit einem Fehler von 1 km pro Sekunde bestimmen. Aber ein Fehler von $\frac{1}{1000}$ mm ist groß im Vergleich zu dem bei manchen unserer Längenmessungen. Läßt sich nicht auf irgendeine Weise die Lage des Elektrons auf $\frac{1}{10.000}$ mm genau bestimmen? Sicher ist dies möglich, doch müssen Sie sich dann damit zufrieden geben, daß Sie seine Geschwindigkeit nur mit einem möglichen Fehler von 10 km/sec erhalten.

Die Natur duldet unser Eindringen in ihre Geheimnisse nur bedingungsweise. Je mehr wir das Geheimnis der Lage aufklären, desto tiefer wird das Geheimnis der Geschwindigkeit verschleiert. Es ist wie bei dem Mann und der Frau im Wetterhäuschen: Tritt eines aus der Tür, so zieht sich

das andere hinter die Tür zurück. Wenn wir bei einer Fragestellung auf unerwartete Hindernisse stoßen, so gibt es zwei Möglichkeiten, voranzukommen. Es kann das Richtige sein, das Hindernis nur als Ansporn zu immer größerer Anstrengung aufzufassen. Aber noch etwas anderes ist möglich, nämlich, daß wir etwas suchen, was es nicht gibt. Wir haben bereits gesehen, daß die Relativitätstheorie die Frage nach einer Geschwindigkeit durch den Äther, die sich auch nicht auffinden lassen wollte, auf diese Weise gelöst hat.

Wenn die Art, mit der sich ein Geheimnis seiner Enthüllung entzieht, vollkommen systematisch ist, dann müssen wir das betreffende Etwas aus der physikalischen Welt verbannen. Es bleibt uns wirklich keine andere Wahl. Die Verbindung zu unserem Bewußtsein ist vollständig unterbrochen. Wenn wir uns auf keine kausale Beziehung zu irgend etwas in unserer Erfahrung stützen können, so steht ein Teil des Unbekannten vor uns, ununterscheidbar von der übrigen Masse des Unbekannten. Von Zeit zu Zeit werden wissenschaftliche Entdeckungen gemacht. Neues taucht aus dem Unbekannten empor, wird mit unserer Erfahrungswelt verknüpft und passend benannt. Wenn man aber in dem weiten Ozean des Unbekannten, Namenlosen Zettel mit Namensaufschriften umherschwimmen läßt in der Hoffnung, daß sie später einmal zur Verwendung kommen, so ist dies kein Zeichen besonderen wissenschaftlichen Weitblicks und hilft der Wissenschaft nichts. Auf Grund dieser Erkenntnis behaupten wir: Die Angabe der Lage und Geschwindigkeit eines Elektrons über eine bestimmte Anzahl von Dezimalen hinaus ist ein Versuch, etwas zu beschreiben, was es nicht gibt; wenn auch seltsamerweise die Angabe der Lage oder der Geschwindigkeit — gäbe man nur eins an — zulässig wäre.

Seit Einstein gezeigt hat, wie außerordentlich wichtig es ist, sich zu vergewissern, daß die physikalischen Größen, von denen wir sprechen, auch wirklich auf Erfahrung beruhen, sind wir bis zu einem gewissen Grade gegen leere Bezeichnungen auf der Hut gewesen. So wird Entfernung als das Ergebnis gewisser Messungen definiert und nicht durch Bezugnahme auf so sinnlose Begriffe wie der „Betrag an Leere“ zwischen zwei Punkten. Die außerordentlich kleinen Entfernungen, von denen man in der Atomphysik redet, erregten natürlich einigen Verdacht, da es nicht

immer leicht ist, anzugeben, wie man sich die erforderlichen Messungen ausgeführt denken soll. Ich möchte nicht behaupten, daß dieser Punkt voll aufgeklärt sei; aber jedenfalls schien es nicht möglich, alle ganz kleinen Entfernungen auf einmal abzutun, weil man Fälle anführen konnte, wo der Genauigkeit der Lagebestimmung anscheinend keine natürlichen Grenzen gesetzt sind. Ebenso gibt es Methoden zur Bestimmung des Impulses, deren Genauigkeit offenbar unbegrenzt gesteigert werden kann. Was man aber bisher nicht beachtet hatte, war, daß die beiden Messungen in einem systematischen Zusammenhang miteinander stehen, so daß die gleichzeitige Bestimmung von Lage und Impuls, die im großen durchaus berechtigt ist, im kleinen undefinierbar wird. Wissenschaftlich gefaßt lautet das Prinzip der Unbestimmtheit wie folgt: Ist q eine Koordinate und p der zugehörige Impuls, so ist die notwendige Unbestimmtheit unserer Kenntnis von q , multipliziert mit der Unbestimmtheit von p , der Größenordnung nach gleich der Quantenkonstante h .

Einen gewissen allgemeinen Grund hierfür kann man ohne Schwierigkeit erkennen. Es möge sich zum Beispiel darum handeln, Lage und Impuls eines Elektrons zu bestimmen. Solange das Elektron nicht mit der übrigen Welt in Wechselwirkung tritt, können wir es nicht wahrnehmen. Wir müssen den Augenblick zu erfassen trachten, in dem es irgendeine Wirkung hervorruft, die in den Bereich unserer Erfahrung gelangen kann. Bei jedem solchen Vorgang aber handelt es sich um den Austausch eines ganzen Quantums. Dadurch wird aber gerade im Augenblick unserer Beobachtung der Zustand des Elektrons in so entscheidender Weise verändert, daß die Beobachtung bereits in dem Augenblick veraltet ist, in dem wir sie anstellen.

Wir wollen den Idealfall annehmen, daß wir das Elektron mit Hilfe eines außerordentlich starken Mikroskops direkt beobachten können, um seine Lage mit der größten Genauigkeit festzustellen. Damit es überhaupt sichtbar wird, muß Licht auf das Elektron fallen und von diesem zerstreut werden, so daß etwas davon in unser Auge gelangen kann. Der geringste mögliche Betrag hierfür ist ein volles Lichtquant. Indem das Elektron dieses streut, erhält es von dem Licht einen Stoß, den wir nicht vorher berechnen können. Wir können nur die betreffenden Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Stöße angeben. Die

Lage des Elektrons kann also von uns gar nicht festgestellt werden, ohne daß wir dadurch zugleich eine nicht abzuschätzende Störung hervorrufen, so daß wir nicht mehr hinterher feststellen können, wie groß sein Impuls im Augenblick der Beobachtung gewesen ist. Trotzdem werden wir imstande sein, den Impuls mit einer gewissen Unbestimmtheit, die der Unbestimmtheit des Stoßes entspricht, anzugeben. Und wenn der wahrscheinliche Stoß klein ist, so wird auch der wahrscheinliche Fehler klein sein. Damit dies der Fall ist, müssen wir ein Quant von verhältnismäßig geringer Energie verwenden, d. h. das Elektron mit langwelligem Licht beleuchten. Dadurch wird aber wieder die Genauigkeit des Mikroskops herabgesetzt, denn je länger die Wellen, desto größer ist das Beugungsbild. Dabei muß man in Betracht ziehen, daß sehr viele Quanten erforderlich sind, um das Beugungsbild zu liefern. Unser eines gestreutes Quant kann nur auf ein einziges Atom unserer Retina in irgendeinem beliebigen Punkte innerhalb des theoretischen Beugungsbildes einen Reiz ausüben. Es wird also in der Feststellung der Lage des Elektrons eine Unbestimmtheit sein, die der Größe des Beugungsbildes proportional ist. Damit befinden wir uns aber in einer Zwickmühle, denn wenn wir die Lagebestimmung durch Verwendung kurzwelligeren Lichtes verbessern, erhält wieder das Elektron einen stärkeren Stoß und die Ungenauigkeit der nachfolgenden Impulsbestimmung nimmt zu.

Eine anschauliche Vorstellung desselben Dilemmas erhalten wir, wenn wir (im Geiste) versuchen, eines der Elektronen im Atominnern zu sehen. Für eine derartige subtile Beobachtung können wir natürlich nicht gewöhnliches Licht verwenden, dessen Wellen ja bereits größer sind als das ganze Atom. Wir müssen eine Beleuchtung von äußerst feiner Struktur wählen und unsere Augen auf ganz kurzwelliges Licht einzustellen suchen, nämlich auf Röntgenstrahlen. Dabei müssen wir bedenken, daß Röntgenstrahlen eine ziemlich verheerende Wirkung auf das Atom ausüben und wir sie infolgedessen nur ganz sparsam in Anwendung bringen dürfen. Die geringste Menge ist aber wiederum ein ganzes Quantum. Nun geben Sie bitte genau acht, während ich jetzt ein Röntgenstrahlquant auf das Atom loslasse. Vielleicht treffe ich das Elektron nicht gleich beim ersten Mal, dann können Sie natürlich nichts sehen. Versuchen wir's also noch einmal. Diesmal hat mein Quant das

Elektron getroffen. Haben Sie aufgepaßt und sich gemerkt, wo es ist? Es ist nicht da? O weh! Da muß ich das Elektron ganz aus dem Atom herausgeschossen haben.

Dies ist keine zufällige Schwierigkeit; es ist ein listig eingefädelt Komplot — ein Komplot, das uns verhindern soll, etwas zu sehen, was es nicht gibt, nämlich die Lage des Elektrons innerhalb des Atoms. Wenn ich längere Wellen verwende, die kein Unheil anrichten, werden Sie das Elektron nicht genau genug erfassen und nicht sehen können, wo es sich befindet. Nehme ich aber kurzwelligeres Licht, so wird gerade dann, wenn seine Struktur fein genug wäre, das Quantum zu viel Energie enthalten und das Elektron aus dem Atomverband stoßen.

Es gibt noch weitere Beispiele für diese Reziprozität der Unbestimmtheit, so daß ihre Allgemeinheit außer Zweifel zu stehen scheint. Die Vermutung liegt daher nahe, daß eine Verbindung von exakter Lage mit exaktem Impuls deshalb niemals von uns entdeckt werden kann, weil es so etwas in der Natur nicht gibt. Das ist keineswegs unbegreiflich, und Schrödingers Darstellung eines Partikels als Wellengruppe gibt ein gutes Bild davon, wie dies möglich ist. Wir haben gesehen (S. 216), daß die Energie (d. i. Frequenz) einer solchen Wellengruppe um so unbestimmter wird, je genauer die Lage bestimmt ist, und umgekehrt. Meiner Ansicht nach liegt hierin der Hauptwert der Schrödingerschen Theorie. Sie bewahrt uns davor, einem Partikel eine Art von Bestimmtheit zuzuschreiben, der in der Natur nichts entspricht. Doch möchte ich die Unbestimmtheits-Relation nicht als Folge der Schrödingerschen Theorie ansehen. Die Sache liegt ganz anders. Das Prinzip der Unbestimmtheit bedeutet ebenso wie das Relativitätsprinzip die Befreiung von einem falschen Vorurteil, für dessen Annahme wir niemals hinreichenden Grund gehabt haben. Genau so, wie wir zu unhaltbaren Vorstellungen über den Äther verleitet wurden, weil wir an die Analogie zu einem materiellen Ozean glaubten, ebenso haben wir uns zu unhaltbaren Vorstellungen von den Eigenschaften der mikroskopischen Elemente der Weltstruktur verleiten lassen, weil wir an die Analogie zu groben Partikeln glaubten.

Eine neue Wissenschaftslehre. Das Prinzip der Unbestimmtheit bezieht sich auf die letzten Grundlagen unserer Wissenschaft. Es führt uns wieder vor Augen, daß die Welt

der Physik eine Welt ist, die wir von innen betrachten, die wir mit Apparaten erforschen, welche selber Teil dieser Welt sind und ihren Gesetzen unterliegen. Wie die Welt sich darstellen würde, wenn sie auf irgendeine außernatürliche Weise mit Hilfsmitteln, die nicht von ihr selbst geliefert sind, erforscht würde, das zu wissen behaupten wir nicht.

Es ist eine bekannte philosophische Auffassung, daß der Mond zu existieren aufhört, wenn niemand ihn sieht. Ich will die Berechtigung dieser Behauptung nicht untersuchen, denn ich habe nicht die geringste Vorstellung davon, was der Sinn des Wortes „existieren“ in diesem Zusammenhange sein könnte. Jedenfalls beruht die astronomische Wissenschaft nicht auf einem so unzuverlässigen Mond. In der wissenschaftlichen Welt (die weit bestimmtere Aufgaben zu erfüllen hat, als bloß zu existieren) gibt es einen Mond, der bereits am Himmel stand, lange bevor es Astronomen gab. Er fährt fort, das Sonnenlicht zu reflektieren, auch wenn niemand es sieht, er besitzt Masse, auch wenn niemand sie wägt, seine Entfernung von der Erde beträgt 384 000 km, auch wenn niemand sie mißt; und im Jahre 1999 wird er die Sonne verfinstern, selbst wenn das menschliche Geschlecht bis zu diesem Zeitpunkt das Werk der gegenseitigen Vernichtung erfolgreich zu Ende geführt haben sollte. Der Mond, d. h. der wissenschaftliche Mond, spielt seine Rolle als Element einer ununterbrochenen Kausalreihe in einer Welt, die in allen Teilen als kausal verknüpft vorgestellt wird.

Wie sollen wir uns eine v o l l s t ä n d i g e Beschreibung dieser wissenschaftlichen Welt vorstellen? Wir dürfen nichts Derartiges hineinbringen, wie eine Geschwindigkeit durch den Äther, die nur ein leerer Begriff ist, weil sie sich durch keinerlei kausale Verknüpfung mit unserer Erfahrung nachweisen läßt. Andererseits können wir die Beschreibung der Welt nicht auf die unmittelbaren Ergebnisse unserer eigenen lückenhaften Beobachtungen beschränken. Sie darf nichts enthalten, was prinzipiell nicht beobachtet werden kann, wohl aber vieles, was in Wirklichkeit nicht beobachtet wurde. Eigentlich wäre ein unendliches Heer von Beobachtern erforderlich, die fortlaufend alles beobachten, was beobachtet werden kann, und alles messen, was nach Methoden, von denen es denkbar ist, daß wir selbst sie anwenden, gemessen werden kann. Alles, was sie messen, wird

niedergelegt als Teil der vollständigen Beschreibung der Welt. Wir dürfen natürlich auch abgeleitete Beschreibungen hinzufügen, mathematische Kombinationen aus direkten Messungen, die der Beschreibung größere Prägnanz verleihen, damit es uns nicht passiert, daß wir den Wald vor Bäumen nicht sehen.

Indem wir die bekannten physikalischen Gesetze anwenden, die der Ausdruck für die Einheitlichkeit des Naturgeschehens sind, wird dieses Heer von Beobachtern in weitgehendem Maße entbehrlich. Wir können ruhig den Mond für ein oder zwei Stunden aus den Augen verlieren und durch Schlüsse folgern, wo er in der Zwischenzeit gewesen ist. Aber wenn ich behaupte, daß der Mond (den ich vor einer Stunde im Westen gesehen habe) jetzt untergeht, so will ich dies nicht als logischen Schluß hinstellen, sondern als wahre Tatsache der physikalischen Welt. Ich postuliere noch immer den imaginären Beobachter. Nur befrage ich ihn nicht, sondern halte ihn in Reserve, damit er meine Behauptung bestätigen kann, wenn sie angezweifelt wird. Ebenso ist die Behauptung, die Entfernung des Sirius betrage 80 Billionen Kilometer, keine auf Übereinkommen beruhende Deutung der gemessenen Parallaxe. Wir legen unserer Behauptung die gleiche Art von Sicherheit bei, als wenn jemand tatsächlich das Werk durchgeführt hätte, Maßstab an Maßstab zu legen und abzuzählen, wie viele nötig sind, bis der Sirius erreicht ist; und wir sollten geduldig zuhören, wenn jemand Gründe vorbringt, die dafür sprechen, daß unsere Schlußfolgerungen nicht mit den „wirklichen Tatsachen“ übereinstimmen, d. h. mit den Tatsachen, die unser Heer von Beobachtern feststellen würde. Wenn wir aber auf Grund von Schlußfolgerungen eine Behauptung aufstellen, von der nicht denkbar ist, daß sie durch diese fleißigen Beobachter bestätigt oder widerlegt werden könne, so gibt es überhaupt kein Kriterium für die Wahrheit oder Falschheit dieser Behauptung und sie ist infolgedessen inhaltlos.

Ursprünglich ist diese Wissenschaftslehre hinsichtlich der makroskopischen Betrachtung der physikalischen Welt, d. h. ihrer Beobachtung im großen aufgestellt worden, aber man hat es ohne weiteres für selbstverständlich gehalten, daß sie in gleicher Weise auf die mikroskopische Betrachtungsweise anwendbar sei. Doch jetzt sehen wir uns der verwirrenden Tatsache gegenüber, daß diese Methode

zwar in bezug auf den Mond zu Recht besteht, daß sie aber trotzdem in bezug auf das Elektron nicht anwendbar ist.

Der Mond kümmert sich nicht im geringsten darum, ob wir ihn betrachten oder nicht. Es liegt kein innerer Widerspruch in dem Gedanken, daß sich, während wir schlafen, immer wieder andere Wächter in seiner Beobachtung ablösen. Anders aber verhält es sich beim Elektron. Nur zu gewissen Zeiten, nämlich wenn es mit einem Quantum in Wechselwirkung tritt, könnte es von einem unserer Beobachter entdeckt werden, in den Zwischenzeiten aber ist es praktisch aus der physikalischen Welt entschwunden, da es in keinerlei kausaler Verbindung mit ihr steht. Wohl können wir unsere Beobachter mit Scheinwerfern ausstatten, damit sie es niemals aus den Augen verlieren, aber das Schlimme ist, daß das Elektron unter dieser Bestrahlung nicht fortfährt, dasselbe zu tun, was es im Dunkeln tat. Es liegt im tiefsten Grunde ein innerer Widerspruch in dem Gedanken einer ständigen Beobachtung der mikroskopischen Struktur der Welt, denn diese Beobachtung selbst würde das gesamte Ineinanderwirken des Mikrokosmos zerstören.

Ich nehme an, daß Ihnen dies im Anfang wie eine rein dialektische Schwierigkeit vorkommt. Aber es liegt weit mehr in dieser systematischen Vereitelung unserer Versuche, die Kenntnis über die mikroskopische Welt unserem geordneten wissenschaftlichen Schema einzureihen. Sie bedeutet eine ernste Mahnung, daß dieses Schema geändert werden muß.

Sie bedeutet, daß unser Ideal von einer vollständigen Beschreibung der Welt falsch gewesen ist. Es war bis jetzt noch nicht die Zeit, ernsthaft nach einer neuen Wissenschaftslehre zu suchen, die den geänderten Bedingungen angepaßt wäre. Es ist sogar zweifelhaft geworden, ob es jemals möglich sein wird, eine physikalische Welt aus Erkennbarem allein aufzubauen, was doch das führende Prinzip aller makrokosmischen Theorien gewesen ist. Wenn es möglich sein sollte, so würde dies jedenfalls eine tiefgreifende Veränderung aller bisherigen Grundlagen bedeuten. Aber es scheint wahrscheinlicher, daß wir uns mit einem Gemisch von Erkennbarem und Nichterkennbarem werden zufrieden geben müssen. Dies wäre gleichbedeutend mit einer Verneinung der deterministischen Weltanschauung, weil die Daten, die für eine Vorhersage der Zukunft notwendig wären, die unerkennbaren Elemente der Vergangenheit mit

enthalten würden. Ich glaube, es war Heisenberg, der gesagt hat ¹²: „Die Frage, ob es möglich wäre, aus einer vollkommenen Kenntnis der Vergangenheit die Zukunft vorauszusagen, entsteht überhaupt nicht, da der Gedanke einer vollkommenen Kenntnis der Vergangenheit einen inneren Widerspruch enthält.“

Nur durch eine Quantenwirkung kann die äußere Welt mit uns in Wechselwirkung treten, kann Kenntnis von dieser Welt zu uns gelangen. Mag sein, daß eine Quantenwirkung das Mittel ist, um uns einiges über das Naturgeschehen zu enthüllen, aber gleichzeitig wird ein neues Unbekanntes in den Schoß der Zeit gepflanzt. Eine Vermehrung unseres Wissens wird erkaufte durch eine Vermehrung unseres Nichtwissens. Schwer ist es, den Brunnen der Erkenntnis zu erschöpfen, wenn der Eimer leck ist.

WELTBAU

Eine schwierige Aufgabe liegt vor uns: Wir sollen eine Welt erbauen, eine physikalische Welt, welche im Schattenbilde das Schauspiel wiedergeben soll, das in der Welt der Erfahrung vor uns abrollt. Noch sind wir keine sehr geübten Baumeister, und Sie dürfen nicht erwarten, daß die Auf- führung ohne Stocken vor sich geht oder den ganzen Reich- tum an Einzelvorgängen wiedergibt, den ein kritisches Publikum vielleicht erwarten könnte. Die hier angegebene Methode scheint sich auf kühne Umrißlinien zu beschränken; bevor wir den Entwurf vollenden können, sind noch viele Geheimnisse in der Kunst des Weltbauens zu erlernen.

Die erste Frage gilt dem Baumaterial. Ich erinnere mich, daß ich als Schuljunge mit brennendem Interesse Artikel gelesen habe, wie man die wunderbarsten Vorrichtungen nur aus altem ausgedienten Gerümpel herstellen könne. Unglücklicherweise gehörten dazu meistens Werkteile von alten Uhren, einige überflüssige Telephone, das Quecksilber aus einem zerbrochenen Barometer und andere Dinge, die niemals in unserer Rumpelkammer zu finden waren. Ich will versuchen, Sie nicht in derselben Weise zu enttäuschen. Zwar kann ich nicht die Welt aus Nichts erbauen, aber mein Bau- material soll so wenig spezialisiert sein wie irgend möglich. Bei unserem Spiel des Weltbauens wird der Erfolg nach der Größe des Kontrastes zwischen den fein differenzierten Eigenschaften des fertigen Baues und der Undifferenziert- heit des Ausgangsmaterials bemessen.

Relationsstruktur. Wir nehmen als Baumaterial *Relationen und Relata, Beziehungen und Bezog- enes*. Die Beziehungen verbinden das Bezogene; das Bezogene liefert die Verbindungspunkte für die Beziehungen. Eines ist nicht ohne das andere denkbar, Relationen nicht ohne Relata, Relata nicht ohne Relationen. Ich glaube, man kann sich kaum einen allgemeineren Ausgangspunkt für den Bau der Welt vorstellen.

Um die Relata voneinander zu unterscheiden, ordnen wir ihnen unverwechselbare Bezeichnungen zu, die wir „Eigenmarken“ nennen wollen. Jede solche Eigenmarke besteht aus vier Zahlen, die wir später „Koordinaten“ nennen werden. Aber der Koordinatenbegriff setzt einen Raum und eine Geometrie voraus, und bis jetzt gibt es noch nichts Derartiges in unserem Entwurf. Deshalb wollen wir vorläufig die vier Kennzahlen nur als willkürliche Namen betrachten. Warum vier Zahlen? Wir nehmen vier, weil es sich herausstellen wird, daß wir auf diese Weise den Bau am besten anordnen können. Doch wissen wir nicht, warum es sich so verhält. Nur das haben wir eingesehen: Wenn die Beziehungen zu einer dreifachen oder fünffachen Mannigfaltigkeit geordnet wären, so würde es viel schwieriger sein, etwas daraus zu gestalten, was Interesse für uns hätte. Doch will ich gerne zugeben, daß dies keine genügende Begründung für die Annahme der vierfältigen Ordnung unseres Ausgangsmaterials ist.

Zwischen zwei menschlichen Einzelwesen umfassen die Beziehungen im weitesten Verstand jede Art von Verbindung oder Vergleich zwischen beiden — Blutsverwandtschaft, geschäftliche Transaktionen, ähnlichen Körperbau, Eignung zum Sport —, kurz, jede Art von Beschreibung, die auf beide angewendet werden kann. Aus Gründen der Allgemeinheit wollen wir annehmen, daß die Beziehungen in unserem Weltmaterial ebenso komplexer Natur sind und keineswegs durch Maßzahlen ausdrückbar. Immerhin muß irgendeine Vergleichbarkeit oder Ähnlichkeit zwischen ihnen vorhanden sein, wie das auch bei den Beziehungen zwischen den menschlichen Individuen der Fall ist; denn sonst könnte nichts weiter über die Welt ausgesagt werden, als daß jede Gegebenheit völlig von jeder anderen verschieden ist. Das heißt aber, daß wir nicht nur Relationen zwischen den Relatis fordern, sondern auch eine Art von Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen einigen der Relationen selbst. Die geringste derartige Voraussetzung setzt uns in den Stand, das Ganze zu einem Gefüge, zu einer Ordnungsform oder Struktur zu verketteten.

Wir wollen somit annehmen, daß es im allgemeinen möglich sein wird, zu jeder Relation zwischen zwei Relatis zwei naheliegende Relata herauszugreifen, die zueinander in einer „ähnlichen“ Relation stehen. Unter „ähnlich“ verstehe ich dabei nicht „ähnlich“ in jeder Hinsicht, sondern nur

ähnlich in Hinsicht auf eine Seite der komplexen Beziehung, in der die beiden ersten Relata zueinander stehen. Aber von welchem Gesichtspunkt aus ist diese besondere Seite der Beziehung auszuwählen? Wenn die Relata menschliche Individuen wären, würde die Ähnlichkeit ganz verschieden beurteilt werden, je nachdem ein Genealoge, Nationalökonom, Psychologe oder Sportsmann die Entscheidung hätte; und die erhaltenen Ordnungsformen würden diesen verschiedenen Gesichtspunkten entsprechend voneinander abweichen. Jeder würde zu seiner eigenen Weltstruktur gelangen, obgleich alle vom Menschen als Grundmaterial ausgegangen sind. Ebenso ist es denkbar, daß auch aus dem von uns postulierten Ausgangsmaterial eine ähnliche Vielfältigkeit von Welten aufgebaut werden könnte. Doch nur einer einzigen von ihnen würde eine Daseinsberechtigung zukommen. Nur dann wird unsere Mühe nicht umsonst gewesen sein, wenn die Welt, die wir gebildet haben, die eine Welt ist, die der Geist sich erwählt, um sie zur Erfahrungswelt zu beleben. Wir können über die Seite der komplexen Beziehung, die als Ähnlichkeitskriterium ausgewählt werden soll, nichts anderes aussagen, als daß es diejenige sein muß, auf die es letztlich bei der Berührung zwischen Geist und physikalischer Welt ankommt. Doch führt uns dies bereits über die Grenzen physikalischer Betrachtung hinaus.

Die eindeutige Bestimmtheit der „Ähnlichkeitsbeziehung“ wird nur für den Grenzfall vorausgesetzt, daß die Relationen in dem Gefüge sehr nahe beieinander liegen. Auf diese Weise wird jeder Vergleich in distans vermieden, gegen den sich ebensoviel einwenden ließe, wie gegen eine actio in distans oder Fernwirkung. Lassen Sie mich aber nur gleich gestehen, daß ich nicht weiß, was ich hier unter „nahe beieinander“ verstehen soll, da ja Raum und Zeit noch nicht aufgebaut sind. Vielleicht könnten wir sagen, daß nur wenige Relata Relationen besitzen, deren Vergleichbarkeit zu der Ausgangsrelation bestimmt ist, und dann diese Bestimmtheit der Vergleichbarkeit als Kriterium der unmittelbaren Nachbarschaft nehmen. Ich weiß es wirklich nicht. Unser Bau weist an dieser Stelle einige Risse auf, aber ich denke, die mathematische Logik wird da schon Abhilfe finden. Die Eigenmarken wollen wir von jetzt an uns so gewählt denken, daß sie ein Anzeichen für das Benachbartsein liefern.

Wir wollen mit dem Relatum A und der von ihm ausgehenden Relation AP beginnen, dann gehen wir zum be-

nachbarten Relatum B über und suchen die „ähnliche“ Relation BQ aus, dann zu C mit der Relation CR , die ähnlich BQ ist. (Man beachte, daß bei C , weil dies weiter von A entfernt ist als von B , die Relation, die ähnlich AP ist, nicht so genau definiert ist wie die Relation CR , die ähnlich BQ ist.) Wir suchen nun Schritt für Schritt die ähnliche benachbarte Relation längs eines in sich zurücklaufenden Weges $A E F A$ auf. Sind wir zum Ausgangspunkt zurückgelangt, so haben wir keinen Grund, anzunehmen, daß die letzte Rela-

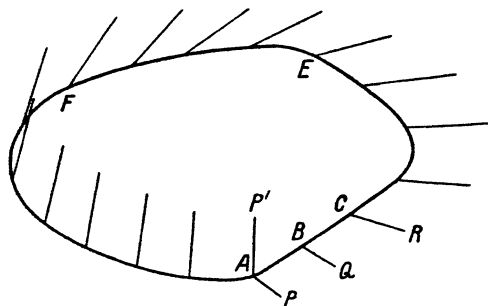


Abb. 7

tion AP' , die wir sozusagen um den geschlossenen Weg herumgeführt haben, mit der Relation AP übereinstimmt, von der wir ursprünglich ausgegangen sind.

Wir haben nun zwei Relationen AP und AP' , die von dem ersten Relatum A ausgehen. Der Unterschied zwischen beiden steht in Zusammenhang mit einem bestimmten geschlossenen Wege $A E F A$ in der Welt. Die freien Enden P und P' der von A ausgehenden Relationen haben ihre Eigenmarken, und wir können die Differenz der Eigenmarken (d. h. die Differenz der zur Identifizierung dienenden Kennziffern) als Schlüsselbezeichnung für die Veränderung nehmen, welche die Relation AP durch das Mitführen auf dem geschlossenen Wege erfahren hat. Variieren wir Weg und Ausgangsrelation, so wird auch die Veränderung PP' variieren, und unser nächster Schritt muß darin bestehen, diese Abhängigkeit durch eine mathematische Formel auszudrücken. Es sind in Wirklichkeit nicht drei, sondern vier Dinge, die wir zueinander in Beziehung setzen müssen, denn der geschlossene Weg zählt doppelt, da z. B. ein rechteckiger Weg durch Angabe zweier Seiten beschrieben wird. Jedes

dieser vier Dinge wird durch vier Kennzahlen angegeben (die entweder direkt von Eigenmarken genommen oder aus solchen abgeleitet sind). Um also allen möglichen Kombinationen Rechnung zu tragen, muß die gesuchte mathematische Formel $4^4 = 256$ numerische Koeffizienten enthalten. Diese Koeffizienten liefern ein numerisches Maß für die Struktur der Welt in der Umgebung des Ausgangsrelativs.

Damit ist der erste Teil unserer Aufgabe beendet, nämlich ein numerisches Maß für die Struktur in das Urmaterial zu bringen. Die Methode, die wir dabei verfolgt haben, ist nicht so künstlich, wie es auf den ersten Blick scheinen mag. Wenn wir nicht dem Problem überhaupt ausweichen wollen, indem wir die gesuchten physikalischen Eigenschaften der Welt bereits in die Relationen und Relata, die unser Ausgangsmaterial bilden, hineinverlegen, so müssen wir sie aus der Verknüpfungsordnung dieser Relationen ableiten. Eine solche Verknüpfungsform läßt sich aber auf natürliche Weise aufzeigen, wenn man einen geschlossenen Umlauf zwischen den Relationen verfolgt. Das Axiom der Vergleichbarkeit benachbarter Relationen unterscheidet nur zwischen ähnlich und unähnlich, gibt uns aber ursprünglich kein Mittel an die Hand, verschiedene Grade und Arten der Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit zu bestimmen. Ein solches Mittel, die Art der Unähnlichkeit zwischen AP und AP' genau anzugeben, haben wir durch die Bezugnahme auf einen geschlossenen Weg gefunden, der die eine Relation in die andere „transformiert“. Auf diese Weise haben wir eine quantitative Bestimmung der Verschiedenheit auf einer Definition der Ähnlichkeit aufgebaut.

Die numerischen Koeffizienten der Struktur werden von dem Schlüsselsystem der Eigenmarken, das wir willkürlich zur Identifizierung der Relata gewählt hatten, abhängig sein und sich mit diesem ändern. Dies macht sie indessen für den Aufbau der üblichen physikalischen Größen besonders geeignet. Wenn die Eigenmarken schließlich in die Koordinaten von Raum und Zeit übergehen, so wird die willkürliche Wahl des Schlüsselsystems äquivalent sein der willkürlichen Wahl eines raumzeitlichen Bezugssystems; und es ist in Einklang mit der Relativitätstheorie, wenn die Maßzahlen der Struktur und die physikalischen Größen, die aus ihnen gebildet werden sollen, sich als abhängig von dem jeweiligen raumzeitlichen Bezugssystem herausstellen. Physikalischen Größen kommt

im allgemeinen kein absoluter Wert zu, sondern nur relative Werte, die sich auf das gewählte Bezugssystem bzw. Schlüsselsystem von Eigenmarken beziehen.

Wir haben nun unsere Bausteine aus dem Urmaterial geformt, und unsere nächste Aufgabe ist, damit zu bauen. Die Anzahl der 256 Strukturkoeffizienten, die in jedem Welt-punkt andere Werte haben können, läßt sich etwas reduzieren, wenn man Wiederholungen ausschließt; doch auch dann noch enthalten sie viel unnützen Ballast, der zur Er-richtung des Gebäudes nicht benötigt wird. Hieran hat eine Anzahl bedeutender Physiker Anstoß genommen, doch sehe ich nicht recht ein, warum. Letzten Endes muß doch der Geist entscheiden, was er als Ballast verwerfen will — welche Teile unseres Gebäudes die Dinge der gewöhnlichen Er-fahrung widerspiegeln, und für welche es kein Gegenstück in der Erfahrung gibt. Bei unserer Aufgabe, das Baumaterial zu liefern, können wir nicht von vornherein wissen, was der menschliche Geist für seinen Palast auswählen und was er als unnütz für den Fortgang der Bauarbeiten verwerfen wird. Ich kann nicht der Meinung derjenigen beipflichten, die es als einen Mangel der Theorie ansehen, daß der unnötige Ballast überhaupt erst zutage getreten ist.

Indem wir gewisse unter den Maßzahlen der Welt-struktur auf eine symmetrische Weise zusammenfassen und andere ganz vernachlässigen, reduzieren wir die Zahl der wirklich wichtigen auf 16 *. Aus diesen kann man zwei Gruppen bilden, von denen eine mit 10 Koeffizienten ein symmetrisches Schema, die andere mit 6 Koeffizienten ein unsymmetrisches Schema bildet. Wir stehen hier an dem großen Gabelpunkt der Welt.

Symmetrische Koeffizienten (10). Aus ihnen läßt sich der Bau der Geometrie und Mechanik errichten. Es sind die 10 Einsteinschen Potentiale ($g_{\mu\nu}$). Wir leiten Raum und Zeit daraus ab und die Weltkrümmungen, durch welche die mechanischen Eigenschaften der Materie, nämlich Impuls, Energie, Kraft usw., dargestellt werden.

Antisymmetrische Koeffizienten (6). Aus diesen wird das Gebäude des **E l e k t r o m a g n e t i s m u s** aufgeführt.

* Mathematisch gesprochen, reduzieren wir den ursprünglichen Tensor vierten Ranges auf einen Tensor zweiten Ranges.

Es sind die drei Komponenten der elektrischen Feldstärke und die drei Komponenten der magnetischen Feldstärke. Wir leiten elektrisches und magnetisches Potential, elektrische Ladung und Strom, Licht und andere elektrische Wellen daraus ab.

Was wir aus den 16 Koeffizienten jedoch nicht ableiten können, das sind die Gesetze und Erscheinungen der Atomistik. Unsere Bauarbeit ist irgendwie zu grob gewesen, um auch die Mikrostruktur der Welt zu liefern. An Atome, Elektronen und Quanten kann sich unsere Baukunst noch nicht wagen.

Aber in bezug auf das, was man „Feldphysik“ nennt, genügt unser Bau allen Ansprüchen, die man vernünftigerweise stellen kann. Er umfaßt sowohl das metrische Feld als das Gravitationsfeld, und auch das elektromagnetische Feld. Wir bilden die oben aufgezählten Größen, und sie gehorchen den großen Gesetzen der Feldphysik kraft des Verfahrens, durch das sie gebildet sind. Sie alle haben ein Charakteristikum gemeinsam: alle Feldgesetze — die Erhaltungssätze von Energie, Masse, Impuls und elektrischer Ladung, das Gravitationsgesetz, die Maxwellschen Gleichungen — sind keine „Leitgesetze“*. Sie regeln nicht den Gang des Weltgeschehens, sondern sind selbstverständliche Wahrheiten. Sie scheinen nicht selbstverständlich, wenn wir uns ihnen auf dem Wege nähern, von dem aus der menschliche Geist die Welt betrachtet, wohl aber zeigt sich ihre Selbstverständlichkeit, wenn wir bei unserem Unternehmen, die Welt ihrer Grundstruktur gemäß aufzubauen, auf sie stoßen. Ich möchte versuchen, Ihnen unsere veränderte Einstellung diesen Gesetzen gegenüber ausführlicher klarzulegen.

Identische Gesetze. Energie, Impuls und Kraft, die wir mit den zehn Hauptkrümmungen der Welt identifiziert haben, sind Gegenstand der beiden berühmten Erhaltungssätze von Energie und Impuls. Vorausgesetzt, daß die Identischen

* Ein anderes Gesetz, das gewöhnlich mit den obigen zusammengestellt wird, gehört in diesem Falle nicht dazu, nämlich das Gesetz der ponderomotorischen Kraft des Feldes. Es scheint unmöglich zu sein, an die Wurzel dieses Gesetzes zu kommen, ohne vorher den Elektronenbau in Angriff zu nehmen, was unsere Weltbaukunst bisher nicht leisten kann.

tifizierung richtig ist, sind diese Gesetze der Ausdruck von mathematischen Identitäten. Eine Verletzung derselben ist undenkbar. Vielleicht kann ich Ihnen die Art dieser Gesetze am besten durch eine Analogie klarmachen.

Es war einmal ein alter Universitätsquästor, der abgeschlossen von der übrigen Welt lebte und sich allein seinen Abrechnungen widmete. Er nahm das ganze Getriebe der Universität nur insofern wahr, als es sich in seinen Rechnungen widerspiegelte. Wohl vermutete er, daß dem allen eine objektive Realität zugrunde liege, eine Art Parallelwesen zu der wirklichen Universität, obwohl er dies nur in Pfund, Schilling und Pence ausdrücken konnte, den Elementen dessen, was er in unserer Ausdrucksweise „die Universität der täglichen Erfahrung oder des gesunden Menschenverstandes“ nennen würde. Die Methode der Rechnungsführung war zu einer veralteten Gewohnheit geworden, seit Generationen von einem einsiedlerischen Quästor an den andern überliefert. So nahm er die Form der Rechnungen als Teil der Natur der Dinge hin. Aber er hatte doch auch eine wissenschaftliche Ader und wollte mehr von seiner Universität erforschen. Eines Tages, als er so über seinen Büchern saß, entdeckte er ein bemerkenswertes Gesetz. Jedem Posten auf der Kreditseite seines Kontobuches entsprach ein gleich großer Posten auf der Debetseite. „Ha“, sagte der Quästor, „ich habe eines der großen allgemeinen Gesetze entdeckt, die das Universitätsgeschehen leiten. Es ist ein exaktes Gesetz der realen Welt. Wir müssen Kredit mit plus und Debet mit minus bezeichnen, dann haben wir das Gesetz von der Erhaltung des Pfund Sterling. Das ist der wahre Weg, den Dingen auf den Grund zu kommen, und keine Grenze ist dem gesetzt, was wir mit Hilfe dieser wissenschaftlichen Methode noch alles entdecken werden! Ich will gar nicht mehr auf die abergläubischen Ansichten einiger Studenten hören, die behaupten, es gäbe einen guten Geist, König genannt, und böse Geister, die Universitätsbeamten. Ich brauche nur auf diesem Wege fortzufahren, so werde ich schon den Grund erkennen, warum die Preise immer steigen.“

Ich streite nicht mit dem Quästor wegen seiner Ansicht, daß eine wissenschaftliche Betrachtungsweise der Rechnungen ein Weg zur exakten (wenn auch notwendig einseitigen) Erkenntnis der ihnen zugrunde liegenden Realität

ist. Es mögen auf diese Weise Dinge entdeckt werden, die uns tiefere Kenntnis enthüllen als die banale Wahrheit, die sein erster Versuch zutage gefördert hat. Sein Leben dreht sich im wesentlichen um die Aufstellung von Rechnungen, und es ist nur recht und billig, daß er die Gesetze dieser Rechnungen erforscht, was auch immer ihre Natur sein mag. Aber ich würde ihm bedeuten, daß es sich bei seiner Entdeckung um ein Überlappen der unter verschiedenen Gesichtspunkten gewonnenen Teilansichten handelt, in denen sich das wirkliche Geschehen an der Universität ihm in der Welt seiner Rechnungen darbietet, nicht aber um die leitenden Gesetze selbst, die dieses Geschehen regeln, daß er vielmehr noch gar nicht angefangen hat, die Leitgesetze zu finden. Die ganze Universität kann ins Wanken geraten und seine Rechnungsführung dennoch stimmen.

Die Erhaltungssätze von Impuls und Energie sind die Folge des Überlappens der verschiedenen Teilansichten, in denen sich die „Nichtleere des Raumes“ unserer praktischen Erfahrung von verschiedenen Gesichtspunkten aus darstellt. Wieder einmal finden wir, daß ein Fundamentalgesetz der Physik kein Leitgesetz ist, sondern daß eigentlich nur eine Selbstverständlichkeit darin zum Ausdruck kommt, sobald wir die Natur dessen erkannt haben, was ihm unterliegt. Wir messen gewisse Formen der Energie mit Hilfe eines Thermometers, den Impuls mit einem ballistischen Pendel, den Druck mit einem Manometer, und stellen uns dabei gewöhnlich drei verschiedene physikalische Größen vor, deren gegenseitiges Verhalten durch ein allgemeines Gesetz geregelt wird. Die moderne Theorie geht nun aber dahin, daß die drei Instrumente verschiedene, aber etwas überlappende Teilansichten eines einzigen physikalischen Zustandes messen, und daß infolgedessen ein Gesetz, das diese verschiedenen Messungen zueinander in Beziehung setzt, von demselben tautologischen Typus ist, wie das „Gesetz“, welches Messungen in Metern und in Ellen miteinander verknüpft.

Ich habe gesagt, daß eine Verletzung dieser Erhaltungssätze undenkbar sei. Besitzen wir also in ihnen physikalische Gesetze, die in alle Zukunft unerschüttert durch noch so große Umwälzungen bestehen bleiben werden? Wir müssen hier den zu Beginn dieses Abschnittes ausgesprochenen Vorbehalt beachten: „Vorausgesetzt, daß die Identifizierung (dessen, worauf sich die Erhaltungssätze beziehen) richtig

ist.“ Das Gesetz selbst wird so lange bestehen, wie zwei mal zwei vier ist, aber seine praktische Bedeutung hängt davon ab, daß wir wissen, worauf es anzuwenden ist. Wir glauben, wir wissen es, erheben aber keinen Anspruch auf Unfehlbarkeit in dieser Hinsicht. Vom praktischen Standpunkt aus würde das Gesetz fallen, wenn es sich herausstellen sollte, daß das, was den Erhaltungssätzen unterliegt, nicht das ist, was wir gewöhnt sind, mit den oben erwähnten Meßinstrumenten zu messen.

Der selektive Einfluß des menschlichen Geistes. Diese Betrachtungen berühren sehr nahe die Frage nach dem Zusammenhang der wissenschaftlichen Welt mit der Welt unserer täglichen Erfahrung. Die einfachsten Bausteine des wissenschaftlichen Weltgebäudes besitzen kein Gegenstück in unserer gewöhnlichen Erfahrung; wir formen jedoch Dinge daraus, denen wir solche Gegenstücke zuordnen können. Energie, Impuls und Kraft der wissenschaftlichen Welt geben im Schattenbilde wohlbekannte Züge der Erfahrungswelt wieder. **K r a f t** empfinde ich in meinen Muskeln; durch eine Form der **E n e r g i e** wird das Gefühl der Wärme in mir hervorgerufen; das Verhältnis von **I m p u l s** zu Masse ist Geschwindigkeit, die mir im allgemeinen als Lageveränderung von Dingen bewußt wird. Allerdings darf ich hierbei nicht außer acht lassen, daß diese Empfindungen — soweit sie überhaupt der physikalischen Welt angehören — sich in einem bestimmten Teil unseres Gehirnes abspielen, nicht aber in den Dingen selbst. Auch der Geist hat eine Weltbaukunst erfunden; doch ist seine Erfahrungswelt nicht aus der Verteilung von Relationen und Relatis gebildet, sondern durch die ihm eigentümliche Auslegung der Schlüsselnachrichten, die auf dem Wege der Nerven zu seinem Sitz gelangen.

Wir dürfen also die Tatsache nicht außer acht lassen, daß die Welt, welche die Physik zu beschreiben versucht, aus der Vereinigung zweier Baupläne entsteht. Betrachten wir sie vom rein physikalischen Standpunkt aus, so wird eine gewisse Willkür bei ihrem Aufbau unvermeidlich sein. Aus unseren Bausteinen, den 16 Maßzahlen der Weltstruktur, könnte vielerlei erbaut werden. Auch läßt sich von einer rein physikalischen Betrachtungsweise aus kein Grund anführen, warum wir nicht den von vornherein als überflüssig

ausgeschiedenen Ballast ebenfalls aufnehmen und irgend etwas daraus formen sollen. Aber wir bauen nicht willkürlich; wir bauen auf Bestellung. Die Dinge, die wir bauen, haben gewisse charakteristische Eigenschaften; sie haben diese Eigenschaften kraft des Verfahrens, nach dem sie gebaut sind, aber sie haben sie auch, weil diese Eigenschaften bestellt waren. Es gibt ein Verfahren von großer Allgemeinheit, das die meisten Konstruktionsmaßnahmen umfaßt, die zum Bau der physikalischen Welt erforderlich sind; sein mathematischer Ausdruck ist die Hamiltonsche Differentiation einer invarianten Funktion der 16 Strukturkoeffizienten. Meiner Ansicht nach enthält die zugrunde liegende Relationsstruktur nichts, was diese besondere Art Verknüpfung fordert. Die Bedeutung derselben kann nicht in der anorganischen Natur gefunden werden. Sie besteht vielmehr darin, daß dieses Verfahren der Einstellung entspricht, die der menschliche Geist zufolge seiner eigenen Gesetzmäßigkeit gewählt hat. Kein anderes Bauverfahren würde letztlich mit unserem geistigen Weltbild zur Deckung gelangen. Der Hamiltonsche Differentialquotient besitzt gerade die Eigenschaft, die ihn geeignet macht, in unserem Geiste als aktive Kraft der passiven Ausdehnung von Raum und Zeit gegenüberzustehen, und der Hamiltonsche Differentialoperator ist in Wahrheit das Symbol für die Schöpfung einer aktiven Welt aus dem formlosen Urgrunde. Nicht einmalig, in dunkler Vergangenheit, sondern immerwährend vollbringt der bewußte Geist das Wunder der Schöpfung.

Indem wir diesem besonderen Bauplan folgen, formen wir Dinge, die dem Erhaltungssatz genügen, d. h. also Dinge, welche beharren. Der Erhaltungssatz ist eine selbstverständliche Wahrheit in bezug auf die Dinge, die ihm genügen. Aber daß er in dem Gesetzeschema der physikalischen Welt eine so fundamentale Rolle spielt, verdankt er dem Geiste, der Beharren fordert. Wir hätten auch Dinge bilden können, die diesem Gesetze nicht genügen. In der Tat bilden wir eine äußerst wichtige Größe, die nicht dem Beharrungssatze folgt, nämlich die „Wirkung“. Hier ist die Physik ihren eigenen Weg gegangen und hat unbeirrbar die „Wirkung“ als wichtigste Fundamentalgröße erkannt, obgleich der Geist sie eines Platzes in der Welt des täglichen Lebens nicht für würdig erachtet und den Begriff der Wirkung durch keinerlei Vorstellungsbild belebt hat. Verstehen Sie mich recht, das Bauen, von dem ich hier

spreche, ist kein Hin- und Herschieben des Baumaterials, es gleicht vielmehr dem Bilden von Konstellationen aus den Sternen. Die Dinge, die wir hätten bilden können, aber nicht gebildet haben, sind ebensogut vorhanden wie diejenigen, die wir tatsächlich gebildet haben. Was wir Bauen nannten, besteht eigentlich mehr darin, daß wir unter den Mustern, die sich selber formen, eine Auswahl treffen.

Das Element der Dauer in der physikalischen Welt, das in dem Substanzbegriff seinen wohlbekanntesten Ausdruck findet, ist wesentlich ein Beitrag des Geistes zu dem Bauplan oder dem Ausleseprinzip. Wir können diesen selektiven Einfluß des Geistes bei einem verhältnismäßig einfachen Beispiel aus der Hydrodynamik gut verfolgen. Wir fragen: Was passiert, wenn eine ausgedehnte Wassermasse eine plötzliche Störung erfährt? Auf den ersten Blick scheint dies Problem einzig auf nicht organischen Gesetzen zu beruhen. Nichts scheint weiter ab zu liegen von einer Einwirkung des bewußten Geistes. In gewissem Sinne trifft dies zu. Nach den für die Materie geltenden Gesetzen können wir die Bewegung der verschiedenen Wasserteilchen verfolgen, und damit wäre das Problem gelöst, insoweit es die nicht organische Welt betrifft. In Wirklichkeit jedoch geht die Untersuchung in den Lehrbüchern der Hydrodynamik einen anderen Weg, sie beschäftigt sich mit der Fortpflanzung von Wellen und Wellengruppen. Das Fortschreiten einer Welle ist kein Fortschreiten von materiellen Wasserteilen, sondern von einer Form, die über die Oberfläche wandert, während das Wasser auf und nieder steigt. Ebenso ist das Fortschreiten einer Wellengruppe nicht gleichbedeutend mit dem Fortschreiten einer Welle. Diesen Formen kommt inmitten der wild bewegten Wasserteilchen eine gewisse Beständigkeit zu. Irgend etwas Beständiges möchte zur Substanz erhoben werden. Ein Ozeanreisender wird weit eher den Eindruck mit sich nehmen, der Ozean bestehe aus Wellen als aus Wasser*. Letzten Endes ist es dieser unserem Geiste angeborene Hunger nach Dauer, der den Entwicklungsgang der Hydrodynamik bestimmt und gleicherweise den Weltaufbau aus den 16 Strukturkoeffizienten leitet.

* Ich will hiermit nicht auf gewisse Folgeerscheinungen der Wellen anspielen, sondern ich meine, daß es für den erfreulicheren Teil der Reiseeindrücke zutrifft.

Vielleicht wird man den Einwand erheben, daß außer dem Geist auch andere Dinge eine beharrende Größe, wie die Masse, schätzen können. Eine Waage kann es, ihr Zeiger gibt an, wieviel Masse vorhanden ist. Ich glaube nicht, daß dieser Einwand stichhaltig ist. Die Meßinstrumente werden ja selbst, wie die ganze übrige physikalische Welt, zu der sie gehören, erst aufgebaut, und zwar nach demselben Bauplan, wie die Größen, die damit gemessen werden. Wir erkennen die Sachlage gut, wenn wir uns vorstellen, wir hätten etwas von dem fortgeworfenen Ballast verwendet und irgendein Ding x daraus gebaut. Wir könnten dann sicherlich aus demselben Ballastmaterial ein Meßinstrument für dieses x konstruieren, aber es bliebe folgender Unterschied: Wenn der Zeiger einer Waage 5 Pfund anzeigt, so wird sich der menschliche Geist auf geheimnisvolle (noch nicht restlos aufgezeigte) Weise dieser Tatsache bewußt; wenn aber das zum Messen von x bestimmte Instrument 5 x -Einheiten anzeigt, so wird kein menschlicher Geist dies gewahr. Weder x noch das entsprechende Meßinstrument stehen mit dem menschlichen Geist in irgendeiner Wechselwirkung. Es liegt also letzten Endes am menschlichen Bewußtsein, daß das Schema der wissenschaftlichen Welt die Masse einschließt, aber das x ausschließt.

Vielleicht läßt sich dieser selektive Einfluß des Geistes auf die Naturgesetze deutlicher dahin erklären, daß durch den Geist Werte geschaffen werden. Alle Verteilung von „Licht und Schatten“ in unserer Auffassung der physikalischen Welt entsteht auf diese Weise durch den Geist und kann nur durch Bezugnahme auf die charakteristischen Eigenschaften des Bewußtseins erklärt werden.

Der Welt, die wir aus dem Relationsgefüge erbaut haben, stehen ohne Zweifel mit unserer fortschreitenden Erkenntnis noch große Veränderungen bevor. Die Fragestellungen der Quantentheorie kündigen eine Umwälzung der Grundlagen an. Aber ich glaube, daß unser Versuch, die Welt aufzubauen, wenigstens unseren Blick für die Möglichkeiten weiterer Entwicklung geweitet und uns eine neue Einstellung zu dem Begriff des physikalischen Gesetzes gegeben hat. Ich möchte nochmals folgende Punkte ausdrücklich hervorheben:

Erstens: Eine streng quantitative Wissenschaft kann auf einer rein qualitativen Basis errichtet werden. Die Vergleichbarkeit, die zu diesem Zwecke als Axiom voraus-

gesetzt werden muß, ist eine rein qualitative Unterscheidung zwischen ähnlich und unähnlich.

Zweitens: Die Gesetze, die bisher als besonders typische Naturgesetze angesehen wurden, sind ihrem Wesen nach selbstverständliche Wahrheiten, und die echten Leitgesetze des Urgefüges (wenn es solche gibt) sind wahrscheinlich von einem ganz anderen Typus als alle bisher erkannten Gesetze.

Drittens: Der Geist hat vermöge seiner selektiven Kraft alles Naturgeschehen einem Gerüst von Gesetzen eingepaßt, dessen Plan in weitgehendem Maße seine ur-eigenste Schöpfung ist. Er gewinnt also sozusagen bei der Entdeckung dieser Gesetze nur das von der Natur zurück, was er vorher in sie hineingelegt hat.

Drei Klassen von Gesetzen. Soweit wir es beurteilen können, teilen sich die Naturgesetze in drei Klassen: 1. die identischen Gesetze, 2. die statistischen Gesetze, und 3. die transzendentalen Gesetze. Wir haben soeben die identischen Gesetze betrachtet, d. h. diejenigen Gesetze, die sich als mathematische Identitäten aus der Art und Weise ergeben, auf welche wir die Größen gebildet haben, die ihnen genügen. Sie können nicht als echte Leitgesetze des Urmaterials der Welt angesehen werden. Die statistischen Gesetze beziehen sich auf das Verhalten großer Mengen und beruhen auf der Möglichkeit, zuverlässige Durchschnittsergebnisse vorherzusagen, obgleich das Verhalten jedes Einzelindividuums ganz unbestimmt ist. Viel von der scheinbaren Gleichförmigkeit in der Natur hat sich als Gleichförmigkeit von Mittelwerten herausgestellt. Unsere groben Sinne nehmen nur die mittlere Wirkung einer ungeheuren Anzahl von Einzelteilchen und Einzelprozessen wahr. Die Regelmäßigkeit des Durchschnittsverhaltens kann aber sehr wohl mit weitgehender Regellosigkeit der Einzelvorgänge verträglich sein. Ich halte es nicht für möglich, statistische Gesetze (wie den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik) dadurch auszuscheiden, daß man erklärt, sie stellten nur eine für gewisse praktische Fälle geeignete mathematische Anwendungsform der Gesetze der beiden andern Klassen dar. Sie enthalten ein besonderes ihnen eigentümliches Element, das mit dem Begriff einer Wahrscheinlichkeit *a priori* verknüpft ist. Aber es scheint noch in keiner der Vorstellungen, die man sich von dem Weltsubstrat zu machen pflegt, ein Platz dafür gefunden zu sein.

Wenn es überhaupt echte Leitgesetze für das physikalische Weltgeschehen gibt, so müssen wir sie in der dritten Gruppe — den transzendentalen Gesetzen suchen. Die transzendentalen Gesetze umfassen alle diejenigen Gesetze, die sich nicht als offenbare mathematische Identitäten herausgestellt haben, die in unserem Weltbauplan von vornherein enthalten sind. Sie betreffen das besondere Verhalten der Atome, Elektronen und Quanten, d. h. es sind die Gesetze der atomistischen Struktur von Materie, Elektrizität und Wirkung. Es scheint, daß wir Fortschritte darin machen, sie zu erkennen und zu formulieren, doch ist es nur selbstverständlich, daß der Geist viel schwerer um eine befriedigende Erfassung dieser Gesetze zu kämpfen hat, als es bei den klassischen Feldgesetzen der Fall gewesen ist. Haben wir doch gesehen, daß die Feldgesetze, insbesondere die Erhaltungssätze, indirekt vom Geiste selber hervorgerufen sind, der sozusagen den Plan für den Weltbau so befohlen hat, daß er diesen Gesetzen Genüge leistet. So kommt man ganz natürlich zu der Vermutung, daß die Aufhellung der transzendentalen Gesetze deswegen so viel größere Schwierigkeiten bereitet, weil wir bei diesen endlich bis zu der ureigenen inneren Gesetzmäßigkeit der Natur vorgedrungen sind, und der Natur nicht mehr nur das ablauschen, was wir selbst in sie hineingelegt haben. Doch kann ich mir hier noch kaum eine feste Meinung bilden. Wir dürfen nicht ohne weiteres annehmen, daß die aus unserer neuen Einstellung zu den Naturgesetzen hervorgehende Entwicklungsmöglichkeit sich bereits in wenigen kurzen Jahren erschöpft habe. Es könnte sein, daß die Gesetze der Atomistik gleich den Erhaltungssätzen nur durch die Art entstehen, wie sich die Welt uns darbietet, und durch eine Erweiterung der früher benutzten Schlußweise ebenfalls als Identitäten erkannt werden. Aber vielleicht ist es ebenso wahrscheinlich, daß wir nur all die überlagerten Gesetze hinwegzuräumen brauchen, die ihren Ursprung in unserer spezifischen Betrachtungsweise der uns umgebenden Welt haben, um eine Außenwelt zutage treten zu lassen, die ihren Lauf nach echten Leitgesetzen nimmt.

Vorläufig können wir feststellen, daß die Gesetze, die wir als Menschenwerk erkannt haben, alle das Charakteristikum der Stetigkeit aufweisen, während im Gegensatz hierzu die Gesetze, für die sich bis jetzt keine Abhängigkeit von der besonderen Beschaffenheit des menschlichen

Geistes hat nachweisen lassen, atomarer Natur sind. Die Quantentheorie mit ihrer Abneigung gegen Brüche und ihrer einseitigen Bevorzugung der ganzen Zahlen scheint in kein Schema zu passen, das wir möglicherweise unbewußt den Naturerscheinungen als Gerüst gegeben haben. Vielleicht wird unser letztes Urteil über die Welt der Physik dem ähnlich sein, das Kronecker über die Mathematik ausgesprochen hat:

„Die ganzen Zahlen hat Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk.“

ZEIGERSTELLUNGEN

Vertraute Vorstellungsbilder und wissenschaftliche Symbole. Wir haben in der Einleitung gesagt, daß die wissenschaftliche Welt ihr Rohmaterial nicht aus der uns vertrauten Welt der täglichen Erfahrung entlehnt. Aber erst in letzter Zeit hat sich der Physiker mit Bedacht von den vertrauten Vorstellungsbildern losgesagt. Ursprünglich war er nicht ausgezogen, eine neue Welt zu entdecken, sondern an der alten herumzuflicken. Wie jeder Mensch ging er von der Anschauung aus, daß die Dinge mehr oder weniger *da sind*, was sie scheinen, und daß der lebhafteste Eindruck, den wir von unserer Umwelt empfangen, eine sichere Basis für seine Forschungen abgeben würde. Nach und nach stellte es sich heraus, daß von diesem Eindruck einige charakteristische Züge, die gerade ganz besonders einleuchtend waren, ausgeschieden werden mußten. Wir haben gelernt, daß wir nicht auf der festen wohlgegründeten Erde stehen, stolz unser Haupt zum Himmel erhebend, sondern mit unseren Füßen an einer Kugel hängen, die mit einer Geschwindigkeit von vielen Kilometern pro Sekunde den Weltraum durchheilt. Für diese neue Erkenntnis genügte freilich noch eine bloße Umordnung der Vorstellungen. Im Geiste sehe ich das alles sehr lebendig. Nur es zu glauben, nicht es vorzustellen, kostet vielleicht eine kleine Anstrengung. Um andere Fortschritte der Wissenschaft zu verstehen, machen wir uns Vorstellungsbilder zurecht mittels der außerordentlich nützlichen Beschreibungsweise: „Ähnlich wie dies, nur in verstärktem Maße.“ Wenn Sie sich z. B. ein Staubkörnchen vorstellen, nur in „verstärktem“, d. h. in diesem Falle in „verkleinertem“ Maße, so haben Sie das Atom, wie man es sich noch bis vor kurzem gedacht hat.

Zu den unmittelbar der Anschauung entnommenen Grundgrößen kamen noch allerlei geheimnisvolle Agenzien

hinzu, mit denen der Physiker rechnen mußte, wie z. B. Gravitation und elektrische Feldstärke. Aber auch das warf nicht die allgemeine Einstellung um. Allerdings ließ sich nicht sagen, womit Elektrizität „Ähnlichkeit“ habe. Doch glaubte man, daß die Fremdartigkeit einmal schwinden würde. Man hielt es für eines der Hauptziele wissenschaftlicher Forschung, diese Agenzien auf irgend etwas zurückzuführen, das sich mit Hilfe bekannter Vorstellungsbilder beschreiben läßt, mit anderen Worten, sie zu „erklären“. Z. B. dachte man, die wahre Natur der elektrischen Feldstärke könne in einer Art Verschiebung des Äthers bestehen. (Vom Äther bildete man sich zu dieser Zeit eine anschauliche Vorstellung — er war ähnlich einer extremen Art der Materie, nur in verstärktem Maße.) So entstand eine Anwärterliste von Größen, für die später einmal die richtige Einordnung in den Vorstellungskomplex der vertrauten Welt des täglichen Lebens gefunden werden sollte. Inzwischen mußte die Physik sich mit ihnen behelfen, so gut sie das ohne Kenntnis ihrer wahren Natur konnte.

Und es ging erstaunlich gut. Trotz der Unkenntnis ihrer Natur ließ sich das Verhalten dieser Größen mit Erfolg vorhersagen. Man sah sich schließlich sogar der Tatsache gegenüber, daß man genauer und in befriedigenderer Weise über das Verhalten der Größen auf der Anwärterliste Bescheid wußte als über ganz bekannte Dinge. Die Erwartung, daß die Liste allmählich kleiner werden würde, erfüllte sich nicht. Im Gegenteil fing man an, Größen, die früher für anschaulich gehalten worden waren, ebenfalls als unanschaulich auf die Liste zu setzen. Nachdem der Äther der Reihe nach ein elastischer fester Körper, eine gallertartige Masse, ein Schaum und ein Konglomerat von Kreiseln gewesen war, wurde er schließlich auf die Liste der Anwärter zurückgeschrieben. Man fand heraus, daß die Wissenschaft so gut mit Größen operieren konnte, deren wahre Natur sie im ungewissen ließ, daß man sich zu fragen begann, ob denn überhaupt irgendein Vorteil damit verbunden sei, wenn die Ungewißheit behoben würde. Die Krisis setzte ein, als man anfang, anschauliche Größen wie Materie und Licht auf Dinge der Anwärterliste zurückzuführen. Man erkannte schließlich, daß die Verbindung mit anschaulichen Vorstellungen bei fertigen physikalischen Konstruktionen erfolgen müsse und nicht bei den Elementargeößen, die den Buchstaben des Alphabets entsprechen. Wir

kranken und kranken noch an der Vorstellung, Elektronen und Quanten müßten in irgendeiner fundamentalen Beziehung den materiellen Körpern und Kräften gleichen, die uns vom Laboratorium her vertraut sind, daß wir also nur nötig hätten, uns dieselbe Art Ding, jedoch in außerordentlich verkleinertem Maßstabe, vorzustellen. Es muß unser Ziel sein, derartige Vorurteile zu vermeiden, die sicherlich der logischen Begründung entbehren. Sobald wir aber aufhören, uns anschaulicher Vorstellungsbilder zu bedienen, bleibt nichts übrig, als zur Darstellung durch Symbole zu greifen.

Die synthetische Methode, mit deren Hilfe wir aus ihren eigenen symbolischen Elementen eine Welt errichten, die in ihrem Verhalten dem wirklichen Verhalten der Welt unserer täglichen Erfahrung gleicht, gelangt jetzt fast allgemein in physikalischen Theorien zur Anwendung. Jede theoretische Abhandlung in physikalischen Zeitschriften hat zur stillschweigenden Voraussetzung, daß dieser Weg anerkannt wird. Die synthetische Methode hat sich als außerordentlich fruchtbar erwiesen und liegt auch jenen physikalischen Fortschritten zugrunde, die ich in dem wissenschaftlichen Teil dieses Buches dargestellt habe. Doch will ich nicht behaupten, daß kein anderer Weg möglich sei. Wir sind uns einig, daß als Krönung der vollendeten Synthese die Verbindung mit der Anschauungswelt unseres Bewußtseins in Erscheinung treten muß, wir befinden uns nicht notwendig im Gegensatz zu Versuchen, die physikalische Welt von dieser Seite aus zu erreichen. Vom philosophischen Standpunkt ist es sogar wünschenswert, daß auch dieser Zugang erforscht wird, und es ist denkbar, daß diese Methode sich auch als wissenschaftlich fruchtbar erweisen wird. Wenn ich die Philosophie Dr. Whiteheads richtig verstanden habe, ist es dieser Weg, den er einschlägt. In gewissem Sinne bedeutet das ein Rückwärtsarbeiten (wie wir es eigentlich nennen müßten); aber seine Methode der „extensiven Abstraktion“ soll einige von den Schwierigkeiten eines solchen Verfahrens überwinden. Ich bin zu einem kritischen Urteil über dieses Werk nicht berechtigt, doch erscheint es dem Prinzip nach außerordentlich interessant. Wenn das vorliegende Buch in vieler Beziehung Dr. Whiteheads bekannter Naturphilosophie auch diametral entgegengesetzt zu sein scheint, so entspricht es, glaube ich, eher der Wahrheit, ihn als einen Verbündeten anzusehen, der seinen

Tunnel von der anderen Seite des Berges gräbt, um schließlich mit seinen weniger philosophisch eingestellten Kollegen zusammenzutreffen. Es kommt nur darauf an, die beiden Eingänge nicht zu verwechseln.

Das Wesen exakter Wissenschaft. Es ist ein charakteristisches Merkmal der Physik, daß sie eine exakte Wissenschaft ist, und im vorhergehenden habe ich allgemein das Gebiet der Physik mit dem Gebiet exakter Wissenschaft identifiziert. Streng gesprochen, sind jedoch beide nicht synonym. Wir können uns sehr wohl eine Wissenschaft vorstellen, die in keinerlei Beziehung zu den gewöhnlichen Erscheinungen und Gesetzen der Physik steht und trotzdem die gleiche Exaktheit der Behandlung zuläßt. Zum Beispiel ist es denkbar, daß die Mendelsche Vererbungslehre sich zu einer unabhängigen Wissenschaft dieser Art entwickelt, denn sie nimmt heutzutage in der Biologie dieselbe Stellung ein, wie vor ungefähr 100 Jahren die Atomistik innerhalb der Chemie. Die Theorie geht dahin, komplexe Individuen in „Charaktereinheiten“, die sogenannten Erbfaktoren, aufzulösen. Diese Einheiten stellen gleichsam unteilbare Atome mit Affinitäten und Repulsivkräften dar. Ihre Vereinigung findet nach denselben Wahrscheinlichkeitsgesetzen statt, die eine so große Rolle in der chemischen Thermodynamik spielen, und die Ergebnisse numerischer Statistiken über den Charakter einer Bevölkerungsschicht lassen sich in der gleichen Weise vorhersagen, wie das Ergebnis einer chemischen Reaktion.

Die Einwirkung einer solchen Theorie auf unsere philosophische Einstellung gegenüber der Bedeutung des Lebens ist jedoch völlig unabhängig davon, ob die Mendelschen Atome eine streng physikalische Erklärung zulassen oder nicht. Die Erbfaktoren mögen durch gewisse Konfigurationen der physikalischen Moleküle des Trägers bedingt sein oder sogar buchstäblich einer bestimmten chemischen Verbindung entsprechen; es mag auch sein, daß durch sie etwas ganz anders Geartetes hinzukommt, das für die lebende Materie charakteristisch und in dem Verzeichnis physikalischer Größen noch nicht enthalten ist. Das alles ist für uns hier nicht von Bedeutung. Wir nähern uns der großen Frage: Gibt es ein Gebiet des Wirkenden — heiße es Leben, Bewußtsein, Gottheit —, das der Fortschritt der exakten Wissenschaft nicht überfluten wird? Unsere Be-

sorgnis erstreckt sich nicht allein auf physikalische Größen, sondern auf alles, worauf exakte Wissenschaft Anwendung finden kann. Die exakte Naturwissenschaft ruft als letzte Instanz ein seelenloses Gesetz an, dem nichts zu entrinnen vermag; oder wenigstens schien es bisher so, als ob sie das täte. Und dagegen lehnt der menschliche Geist sich auf. Wenn die Wissenschaft abschließend erklären würde, der Mensch sei nur ein „vom Zufall gelenktes Zufallsgebilde von Atomen“, so würde diese Feststellung nicht dadurch abgeschwächt, daß die fraglichen Atome Mendelsche Erbfaktoren, und nicht die materiellen Atome des Chemikers sind.

Wir wollen nun untersuchen, welche Art Erkenntnis die exakte Wissenschaft vermittelt. Wenn wir die Protokolle physikalischer und naturwissenschaftlicher Examina nach etwas verständlicheren Fragen durchblättern, so stoßen wir vielleicht auch auf eine Aufgabe, die etwa folgendermaßen beginnt: „Ein Elefant gleitet den grasbedeckten Abhang eines Hügels hinunter...“ Der erfahrene Kandidat weiß bereits, daß er hierauf nicht weiter zu achten braucht, und daß das Beispiel mit dem Elefanten nur dazu dient, der Aufgabe einen Anschein von Realität zu verleihen. Er liest weiter: „Die Masse des Elefanten beträgt zwei Tonnen.“ Jetzt kommen wir dem Kern der Sache schon näher. Der Elefant verschwindet aus dem Problem und eine Masse von zwei Tonnen nimmt seine Stelle ein. Was ist nun genau genommen dieses „zwei Tonnen“, das den eigentlichen Gegenstand des Problems bildet? Es bezieht sich auf eine gewisse Eigenschaft, oder einen gewissen Zustand, wofür wir den etwas vagen Ausdruck Gewicht gebrauchen, sobald wir in einem bestimmten Gebiete der Außenwelt daraufstoßen. Doch kommen wir auf diesem Wege nicht weiter, denn das Wesen der Außenwelt ist unergründbar und wir würden uns nur in einer Wirrnis von Nicht-Beschreibbarem verlieren. Also kümmern wir uns nicht darum, worauf sich das „zwei Tonnen“ bezieht. Was aber ist es? Wie ist es in einer so bestimmten Form in unsere Erfahrung eingetreten? „Zwei Tonnen“ ist die Ablesung der Zeigerstellung einer Waage, auf der der Elefant gestanden hat. Gehen wir weiter: „Die Neigung des Abhangs beträgt 60° .“ Nun verschwindet auch der Hügel aus unserer Aufgabe und an seine Stelle tritt ein Winkel von 60° . Was ist 60° ? Wir wollen uns gar nicht erst mit mystischen Vorstellungen über

Richtung abquälen; 60° ist einfach die Ablesung eines Lotes an der Teilung eines Winkeltransporteurs. Und ähnlich verhält es sich mit allen übrigen Angaben des Problems. Der sanft nachgebende Rasen, auf dem der Elefant hinunterrutscht, wird durch einen Reibungskoeffizienten ersetzt, der zwar vielleicht nicht direkt einer Zeigerablesung entspricht, jedenfalls aber verwandter Natur ist. Sicher werden in der Praxis weniger direkte Wege eingeschlagen, um das Gewicht von Elefanten oder die Neigung eines Abhanges zu bestimmen, doch sind diese Methoden erlaubt, weil sie die gleichen Ergebnisse liefern wie die direkten Zeigerablesungen.

Wir sehen also, wie die Poesie aus dem Problem verschwindet und allein Ablesungen von Zeigerstellungen übrigbleiben, sobald die ernsthafte Anwendung exakter Wissenschaft beginnt. Wenn aber nur Zeigerablesungen oder Äquivalentes in die wissenschaftliche Rechenmaschine hineingetan werden, wie kann etwas anderes als eine Zeigerablesung wieder herauskommen? Die Frage war, die Zeit zu bestimmen, nach der der Elefant unten angekommen sein würde, und die Antwort ist eine Ablesung der Zeigerstellung auf dem Zifferblatt unserer Uhr.

Der Triumph der exakten Wissenschaft lag bei obigem Problem darin, daß ein numerischer Zusammenhang hergestellt wurde zwischen der Zeigerstellung an der Waage bei einem Experiment mit dem Elefanten und der Zeigerstellung an der Uhr bei einem anderen Experiment. Und wenn wir andere physikalische Probleme ebenfalls einer kritischen Betrachtung unterziehen, werden wir finden, daß dieser Fall typisch ist. Der Gegenstand der exakten Wissenschaft besteht in Ablesungen von Zeigerstellungen und ähnlichen Indikatorangaben. Wir können hier nicht definieren, was als ähnliche Indikatorangabe gerechnet werden soll. Die Methode, die ungefähre Koinzidenz des Zeigers mit einem bestimmten Teilstrich einer Skala zu beobachten, läßt sich so verallgemeinern, daß sie die Beobachtung jeder Art von Koinzidenz umfaßt — oder, in der Ausdrucksweise der Relativitätstheorie, jedes Schnittpunktes zweier Weltlinien. Das Wesentliche ist, daß die so anschaulichen und bestimmten Vorstellungen, die wir von den Objekten der Außenwelt zu haben scheinen, in die exakte Wissenschaft nicht eingehen, und daher auch gar nicht durch sie bestätigt werden können. Bevor die exakte Wissenschaft mit einem

Problem überhaupt etwas anfangen kann, müssen diese Vorstellungsbilder durch Größen ersetzt werden, welche die Resultate physikalischer Messungen darstellen.

Vielleicht werden Sie einwenden, wenn auch einzig die Ablesungen der Zeigerstellungen in die wirkliche Berechnung eingehen, so würde es doch den Sinn des Problems zerstören, wollte man von jeder Bezugnahme auf etwas anderes absehen. Das Problem schließt notwendig etwas wie einen verbindenden Hintergrund mit ein. Es war doch nicht die Zeigerablesung an der Waage, die den Abhang hinunterrutscht! Und doch kann vom Standpunkt exakter Wissenschaft aus das, was hinunterrutschte, nur als ein Bündel von Zeigerablesungen bezeichnet werden. (Man darf nicht vergessen, daß der Abhang ebenfalls durch Zeigerablesungen ersetzt worden ist, und daß das Hinuntergleiten des Elefanten nicht mehr ein lebendiges Abenteuer, sondern eine Funktionalbeziehung zwischen räumlichen und zeitlichen Maßzahlen ist.) Das Wort Elefant ruft in uns eine bestimmte Assoziation geistiger Eindrücke hervor, doch ist es klar, daß derartige Vorstellungsbilder nicht Gegenstand eines physikalischen Problems sein können. Wir haben z. B., wenn wir an einen Elefanten denken, den Eindruck von Plumpheit. Es ist anzunehmen, daß diesem Eindruck etwas in der Außenwelt direkt entspricht, aber das Wesen dieses Gegenstückes liegt außerhalb dessen, was wir wissenschaftlich erfassen können, und die Naturwissenschaft kann nichts damit anfangen. Plumpheit kann in die Betrachtungsweise exakter Wissenschaft nur in der Form eingehen, daß wir sie durch eine Anzahl Ablesungen an einem Tasterzirkel ersetzen. In ähnlicher Weise wird das grau-schwarze Aussehen, das zu unserem geistigen Eindruck von dem Elefanten gehört, durch die Ablesungen an einem Spektralphotometer ersetzt. Und so geht es fort, bis alle Eigenschaften des Elefanten erschöpft sind und er zu einem Messungsprotokoll geworden ist. Dabei entsprechen einander immer folgende drei Dinge:

1. Ein geistiger Eindruck, der in unserem Bewußtsein stattfindet und nicht in der Außenwelt.

2. Eine Art Gegenstück dazu in der Außenwelt, dessen wahres Wesen unerforschlich ist.

3. Eine Gruppe von Zeigerablesungen, welche die exakte Wissenschaft beobachten und mit anderen Zeigerablesungen in Verbindung bringen kann.

Und so haben wir unser Verzeichnis von Zeigerstellungen und der Abrutsch kann beginnen. Wenn Sie aber immer noch der Ansicht sind, daß unser Vorgehen das Problem aller Realität beraubt hat, so bin ich gar nicht traurig darüber, denn dann haben Sie einen Vorgeschmack von der Schwierigkeit, die denjenigen erwartet, der an eine allumfassende exakte Wissenschaft glaubt, welcher sich nichts in unserer Erfahrung entzieht.

Mir liegt daran, Ihnen klarzumachen, daß die Beschränkung des Bereiches der Physik auf Zeigerablesungen und dergleichen nicht eine philosophische Schrulle von mir ist, sondern wesentlich für unsere heutige wissenschaftliche Einstellung. Es ist dies die Auswirkung einer Tendenz, die schon weit zurück im vergangenen Jahrhundert erkennbar ist, die aber erst in der Relativitätstheorie ihren prägnanten Ausdruck fand. Der Wortschatz des Physikers umfaßt eine Anzahl Worte wie Länge, Winkel, Geschwindigkeit, Kraft, Potential, Strom usw., die wir als „physikalische Größen“ bezeichnen. Man weiß heute, wie außerordentlich wesentlich es ist, diese Größen nach Maßgabe des Weges zu definieren, auf dem sie tatsächlich von uns erkannt werden, wenn wir auf sie stoßen, und nicht entsprechend einer metaphysischen Bedeutung, die wir uns im voraus von ihnen zurechtgelegt haben. In alten Lehrbüchern war Masse als „Quantität der Materie“ definiert, aber zur wirklichen Bestimmung von Masse war eine experimentelle Methode beschrieben, die in keinerlei Beziehung zu dieser Definition stand. Die Ansicht, daß die Größe, die mit Hilfe dieser Meßmethode bestimmt wurde, mit der Quantität der Materie in dem betreffenden Gegenstand identisch sei, war nur ein frommer Glaube. Heute gibt es keine Betrachtungsweise mehr, nach welcher der Behauptung, in einem Pfund Blei sei dieselbe Menge Materie wie in einem Pfund Zucker, ein Sinn beigemessen werden könnte. Die Einsteinsche Theorie macht reinen Tisch mit allen derartigen frommen Vorurteilen und besteht darauf, daß jede physikalische Größe als Resultat gewisser Meß- und Rechenoperationen definiert wird. Wenn Sie wollen, können Sie Masse auch weiterhin als etwas ansehen, dessen wahre Natur unerforschlich ist, und das in einer gewissen Beziehung zu der Ablesung einer Zeigerstellung steht. Doch ist für die Physik durch solche mystischen Vorstellungen nichts gewonnen, denn es ist die Zeigerablesung selbst, die Gegenstand der exakten Naturwissen-

schaft ist, und wenn sie in transzendente Vorstellungen eingebettet wird, so haben Sie hinterher nur die Mühe, sie wieder auszugraben.

Wohl ist es wahr, daß wir bei der Feststellung, die Masse des Elefanten betrage 2 Tonnen, nicht immer die Ablesung an der speziellen Waage im Sinne haben, auf der die Wägung ausgeführt wurde. Das liegt aber daran, daß wir das Problem von der Eskapade des Elefanten nicht ganz von Anfang an betrachten, so, als wenn es die erste Untersuchung über die Außenwelt wäre, die wir vornehmen. Der Examinator hätte seine Angaben viel ausführlicher gemacht, wenn er nicht eine gewisse allgemeine Kenntnis der Elementargesetze der Physik vorausgesetzt hätte, d. h. derjenigen Gesetze, die uns instand setzen, aus der Ablesung eines Meßinstrumentes die eines anderen herzuleiten. Dieser Zusammenhang zwischen Zeigerablesungen, der in den physikalischen Gesetzen zum Ausdruck kommt, liefert den stetigen Hintergrund, den jedes praktische Problem fordert.

Augenscheinlich gehört es mit zu den stillschweigenden Voraussetzungen unseres Problems, daß der Elefant, um den es sich bei dem Experiment mit der Waage handelt, derselbe ist, wie der Elefant, der den Hügel herunterrutscht. Wie kann aber diese Identität zum Ausdruck gelangen, wenn alles nur durch Zeigerablesungen beschrieben wird? Zwei Ablesungen können gleich sein, doch ist es sinnlos zu fragen, ob sie identisch sind. Wenn also der Elefant ein Bündel Zeigerablesungen ist, wie können wir fragen, ob es sich dauernd um das identische Bündel handelt? Der Examinator hat uns nicht anvertraut, wie er die Identität des Elefanten sichergestellt hat. Wir haben nur seine persönliche Garantie, daß inzwischen keine Unterschiebung eines anderen Elefanten stattgefunden hat. Vielleicht hörte das Tier in beiden Fällen auf seinen Namen, doch ist es klar, daß diese Feststellung der Identität außerhalb des derzeitigen Bereiches der Physik liegt. Rein der Physik zugehörig wäre nur ein Beweis der Kontinuität, d. h. der Elefant müßte auf seinem Wege von der Waage bis zur Hügelböschung unter ständiger Kontrolle gestanden haben. In der vierdimensionalen Welt ist der Elefant ein schlauchartiges Gebilde, das mehr oder weniger scharf gegen die übrige Welt abgegrenzt ist. Indem der Beobachter seine Retina als Indikator benutzt und an ihr ununterbrochen Ablesungen des Bildumrisses vornimmt,

überzeugt er sich, daß er von Anfang bis zum Ende einem zusammenhängenden isolierten „Weltschlauch“ nachging. Sobald aber seine Wachsamkeit zeitweise nachließ, muß er darauf gefaßt sein, daß inzwischen eine Vertauschung möglich war und infolgedessen die beobachtete Zeit des Abstieges nicht mit der berechneten Zeit übereinstimmen würde*. Beachten Sie dabei bitte, daß wir nichts über die Identität des Inhaltes dieses isolierten Wetschlauches entlang seiner ganzen Ausdehnung ausgesagt haben. Die Behauptung einer solchen Identität wäre ohne irgendeinen physikalischen Sinn. Statt dessen benutzen wir den Satz von der Erhaltung der Masse (sei es als selbständiges empirisches Gesetz oder als Folgerung aus dem Gravitationsgesetz), der uns die Gewißheit gibt, daß die auf Grund einer Wägung oder ähnlicher Experimente notierten Zeigerstellungen für einen isolierten Schlauch entlang seiner ganzen Ausdehnung den gleichen konstanten Wert haben müssen. Für die Zwecke der exakten Naturwissenschaft wird also die Vorstellung „dasselbe Objekt“ durch das Symbol des „isolierten Wetschlauches“ ersetzt. Die Konstanz gewisser Eigenschaften des Elefanten wird nicht als selbstverständliche Folge seiner „Identität“ aufgefaßt, sondern als Schlußfolgerung aus wohlbegründeten experimentellen und theoretischen Gesetzen über vierdimensionale schlauchartige Gebilde.

Grenzen physikalischer Erkenntnis. Wenn wir die Eigenschaften eines Körpers mit Hilfe physikalischer Größen beschreiben, so vermitteln wir eine Kenntnis, die nur davon handelt, wie die verschiedenen metrischen Indikatoren auf das Vorhandensein des betreffenden Körpers reagieren, und von weiter nichts. Die so erlangte Kenntnis ist jedoch recht umfassend, denn wenn wir wissen, wie alle Arten von Objekten — Waagen und andere Indikatoren — auf einen Körper reagieren, so ist damit seine Beziehung zur Umwelt vollständig bestimmt, nur sein inneres, nicht näher faßbares Wesen entzieht sich dieser Bestimmung. Die Relativitätstheorie sieht eine derartige Beschreibung als volle

* Ein gutes Beispiel für eine derartige Vertauschung liefern astronomische Beobachtungen, die an gewissen Doppelsternen mit zwei Komponenten gleicher Helligkeit vorgenommen sind. Nach einer Unterbrechung der Beobachtung waren die beiden Komponenten versehentlich miteinander verwechselt worden und diese Vertauschung wurde erst entdeckt, als die wachsende Diskrepanz zwischen beobachteter und theoretisch berechneter Bahn genauer untersucht wurde.

Kenntnis an, denn das Wesen eines Objektes, soweit es überhaupt physikalischer Forschung zugänglich ist, besteht in dem abstrakten Inbegriff seiner Beziehungen zu allen Objekten seiner Umgebung. Der große Erfolg der Relativitätstheorie ist in weitgehendem Maße auf die Entwicklung einer sehr leistungsfähigen mathematischen Rechenmethode, des sogenannten Tensorkalküls, zurückzuführen, der es ermöglicht, in einfacher gedrängter Weise mit einem unendlichen Schema von Zeigerablesungen rechnerisch zu operieren. Der Fachausdruck *T e n s o r*, von dem in der Relativitätstheorie so ausgiebig Gebrauch gemacht wird, könnte in diesem Zusammenhang als *L i s t e v o n Z e i g e r a b l e s u n g e n* übersetzt werden. Der ästhetische Reiz der Relativitätstheorie liegt zum großen Teil darin, daß ihre mathematischen Methoden der physikalischen Vorstellung so eng angepaßt sind. Leider ist dies nicht überall der Fall. Wir können z. B. der außerordentlichen Geduld und Sorgfalt des Mathematikers, mit der er die Stellung des Mondes bis ins kleinste berechnet, zwar unsere Bewunderung nicht versagen, trotzdem aber ist die Mondtheorie vom ästhetischen Standpunkt aus ein Greuel, und es ist offensichtlich, daß Mond und Mathematiker verschiedene Methoden zur Bestimmung der Mondbahn verfolgen. Aber im Tensorkalkül trifft der mathematische Physiker genau das Charakteristische seines Gegenstandes, der in einer Liste von Zeigerablesungen besteht, und räumt auf diese Weise zugleich automatisch mit dem Überwuchern von Bildern und Vorstellungen auf, denen innerhalb der physikalischen Wissenschaft kein Platz zukommt.

Die Einsicht, daß unsere Kenntnis der physikalischen Objekte einzig und allein in Ablesungen von Zeigern und anderen Indikatoren besteht, verändert in fundamentaler Weise unsere Einstellung zu physikalischer Erkenntnis überhaupt. Bis vor kurzem galt es als ganz sicher, daß wir von den Gegebenheiten der Außenwelt eine viel tiefergehende Kenntnis hätten. Ich möchte Ihnen an Hand eines Beispielen zeigen, wie wir hier zu dem Kernpunkt der ewigen Frage nach der Beziehung zwischen Geist und Materie geführt werden. Das Gehirn des lebenden Menschen ist begabt mit einem denkenden Geist. Denken ist eine der unbestreitbaren Tatsachen in der Welt. Daß ich denke, weiß ich mit einer Sicherheit, die ich keinem Stück meiner physikalischen Kenntnis von der Welt zuschreiben kann. Dagegen ist meine

Überzeugung, daß Du einen Geist hast, der denkt, so einleuchtend sie ist, doch mehr hypothetischer Natur. Hier gilt es also, eine Welt-Tatsache zu erforschen. Der Physiker kommt mit seinen Werkzeugen und beginnt eine systematische Untersuchung. Alles was er finden kann, ist eine Anhäufung von Atomen und Elektronen und Kraftfeldern, die irgendwie in Raum und Zeit angeordnet und offenbar durchaus ähnlich denen sind, die in anorganischen Objekten gefunden werden. Er kann auch noch andere charakteristische physikalische Größen aufspüren, wie Energie, Temperatur und Entropie. Aber keine von ihnen läßt sich mit Denken identifizieren. Vielleicht kommt er dazu, Denken als bloße Illusion anzusehen, als irregeleitete Auslegung des Zusammenwirkens der von ihm nachgewiesenen physikalischen Größen. Erkennt er jedoch den Widersinn, der darin liegt, das einzige Element unserer Erfahrung, das unzweifelhaft feststeht, als Illusion abzutun, so sieht er sich der ungeheuerlichen Frage gegenüber: Wie kann eine Anhäufung von ganz gewöhnlichen Atomen einen denkenden Mechanismus ergeben? Aber welche Kenntnis vom wahren Wesen eines Atoms berechtigt uns eigentlich dazu, es für so vollkommen ungeeignet für den Aufbau eines denkenden Objektes zu halten? Um die Mitte und noch bis gegen Ende des vorigen Jahrhunderts glaubten die Physiker genau zu wissen, was sie sich unter **M a t e r i e** und **A t o m e n** vorzustellen hatten. Atome waren kleine Billardkugeln. Das gab eine lebendige Anschauung, von der man annahm, daß sie in einer Vollständigkeit Aufschluß über das Wesen eines Atoms erteilte, wie sie für so transzendente Dinge wie Bewußtsein, Schönheit oder Humor niemals erreicht werden könnte. Jetzt aber wissen wir, daß die Wissenschaft überhaupt nichts über das innere Wesen eines Atoms aussagen kann. Das physikalische Atom ist, wie jeder andere Gegenstand der Physik, eine Liste von **Z e i g e r a b l e s u n g e n**. Nun hatten wir übereinstimmend angenommen, daß diese Liste einem unbekanntem Hintergrund zugeordnet ist. Warum sollen wir sie dann nicht einem Etwas von jenergeistigen Natur zuordnen, als deren charakteristische Eigenschaft wir das **D e n k e n** kennen? Es scheint mir unvernünftig, wenn man sie lieber sogenannten „konkreten“ Dingen zuordnet, die mit Denken nichts zu tun haben, und sich dann wundert, woher das Denken kommen mag. Wir wollten uns hier jedes Vorurteils über diesen Weltengrund, der hinter den Zeigerablesungen liegt, ent-

halten und können auch im allgemeinen nichts über seine Natur ergründen. Nur in einem einzigen Fall, nämlich für die Zeigerablesungen in meinem eigenen Gehirn, gewinne ich eine Einsicht, die nicht an die Zeugenaussage irgendwelcher Indikatoren gebunden ist, und diese direkte Einsicht zeigt mir, daß die Zeigerablesungen, soweit sie sich innerhalb meines Gehirnes abspielen, einem Hintergrund mit Bewußtsein zugeordnet sind. Man könnte erwarten, daß die übrigen Zeigerablesungen der Physik einem Hintergrunde zugehören, der in einem gewissen stetigen Zusammenhange mit dem steht, der sich mir in diesem besonderen Falle offenbart. Trotzdem will ich nicht voraussetzen, daß diesem Weltengrund immer das spezielle Attribut der Bewußtheit zukommt*. Ich möchte nur hervorheben, daß in diesem einen Fall, in dem mir eine unmittelbare Einsicht vergönnt ist, keine Widersprüche zu beseitigen sind, denn ich besitze keine andere Kenntnis des Weltengrundes, mit der sie in Einklang gebracht werden müßte.

Die Physik erforscht den Zusammenhang der Zeigerablesungen untereinander. Die einzelnen Glieder sind miteinander in endlosem Kreise verkettet, und dieselbe unerforschliche Natur durchzieht das Ganze. Wir kennen nichts, was dagegen spräche, daß der Atomhaufen, der ein Gehirn bildet, selbst ein denkendes Objekt ist kraft jener Natur, die von der Physik aus unerforscht und unerforschbar ist. Wenn wir das System der Zeigerablesungen in irgendeinen Hintergrund einbetten müssen, so wollen wir wenigstens den einzigen Wink beachten, den wir über die Bedeutung des Weltengrundes erhalten haben,

* Die meisten unter uns würden z. B. hypothetisch annehmen, daß die dynamische Eigenschaft der Welt, die ich im 5. Kapitel behandelt habe, charakteristisch für den ganzen Weltengrund ist. Es ist aber offensichtlich, daß diese Eigenschaft nicht in den Zeigerablesungen aufgezeigt werden kann, und unsere einzige Einsicht in diese Dynamik ist die Empfindung von „Werden“ in unserem Bewußtsein. „Werden“ ebenso wie „Denken“ ist uns nur durch sein Vorkommen in unserem eigenen Geiste bekannt. Aber während es sinnlos wäre anzunehmen, daß sich letzteres auch auf unorganische Atomhaufen erstreckt, kann der Begriff des „Werdens“ sehr wohl auf die nichtorganische Welt ausgedehnt werden (und wird es im allgemeinen auch), so daß es keineswegs ohne Belang ist, ob der Fortschritt des Geschehens in der unorganischen Welt von Vergangenheit gegen Zukunft oder von Zukunft gegen Vergangenheit betrachtet wird.

nämlich daß er fähig ist, als geistige Aktivität in Erscheinung zu treten.

Die zyklische Methode der Physik. Ich habe oben gesagt, daß alle physikalischen Größen in endlosem Kreise miteinander verkettet seien, und möchte diese Behauptung näher erläutern. Ich will wieder an das Einsteinsche Gravitationsgesetz anknüpfen, das ich Ihnen schon zu wiederholten Malen ausgelegt habe, und von dem ich, wie ich hoffe, Ihnen einen gewissen Begriff habe vermitteln können. Dieses Mal will ich es aber so vollkommen erklären, daß wenig Aussicht vorhanden ist, irgend jemand werde etwas davon verstehen. Das macht aber nichts, denn es kommt mir an dieser Stelle gar nicht darauf an, die Ursache der Gravitation noch weiter aufzuhellen, vielmehr liegt mir daran, Ihnen an diesem Beispiel zu zeigen, was die v o l l s t ä n d i g e Erklärung einer physikalischen Größe umfaßt.

Das Einsteinsche Gesetz sagt in seiner analytischen Fassung aus, daß im leeren Raum bestimmte Größen, P o t e n t i a l e genannt, bestimmten Differentialgleichungen genügen. Merken wir uns das Wort Potential für eine spätere Erklärung vor. Es wäre an sich möglich, eine Welt zu denken, in der die Potentiale zu jeder Zeit und an jedem Orte ganz beliebige Werte haben. Doch die wirkliche Welt ist nicht so willkürlich, sie unterliegt der Bedingung, daß die Potentiale auf solche Werte beschränkt sind, die den Einsteinschen Gleichungen genügen. Die nächste Frage ist: Was sind Potentiale? Man kann die Potentiale als Größen definieren, die durch einfache mathematische Operationen aus gewissen Fundamentalgrößen abzuleiten sind, die I n t e r v a l l e genannt werden. (Anm.: „Intervall“ ist zu erklären.) Sind uns die Werte der Intervalle in der ganzen Welt bekannt, so können die Werte der Potentiale nach bestimmten Rechenregeln abgeleitet werden. Was aber sind diese Intervalle? Es sind Beziehungen an Paaren von Ereignissen, die mit Hilfe einer U h r oder mit Hilfe eines M a ß s t a b e s oder mit beiden gemessen werden können. (Anm.: „Uhr“ und „Maßstab“.) Es können genaue Vorschriften für die Anwendung von Uhr und Maßstab gegeben werden, so daß das Intervall durch eine vorgeschriebene Kombination ihrer Ablesungen bestimmt ist. Was aber sind Maßstab und Uhr? Ein Maßstab ist ein mit einer Skala versehenes bandförmiges Stück M a t e r i e, das ... (Anm.: „Materie“.) Den Rest der

Erklärung lasse ich als „Übungsaufgabe für den Leser“, denn es würde viel Zeit in Anspruch nehmen, alle Eigenschaften und Feinheiten im Verhalten aufzuzählen, die der Physiker von einem vollkommenen Maßstab oder einer vollkommenen Uhr fordert. Gehen wir also gleich zur nächsten Frage über: Was ist Materie? Den alten metaphysischen Substanzbegriff haben wir verworfen. Vielleicht könnten wir hier eine Beschreibung der atomaren und elektrischen Struktur der Materie geben, doch gehört diese der mikrokosmischen Betrachtungsweise an, während wir hier den makrokosmischen Standpunkt einnehmen. Wenn wir uns auf die Mechanik beschränken, zu der ja das Gravitationsgesetz gehört, können wir Materie als die Verkörperung von drei verwandten physikalischen Größen, *M a s s e* (oder Energie), *I m p u l s* und *K r a f t* ansehen. Was aber sind „Masse“, „Impuls“ und „Kraft“? Es ist eine der folgenreichsten Taten Einsteins, daß es ihm gelungen ist, eine exakte Antwort auf diese Frage zu erteilen: Masse, Impuls, Kraft sind ziemlich komplizierte Ausdrücke, welche die *P o t e n t i a l e* und ihre ersten und zweiten Ableitungen nach den Koordinaten enthalten. Und was sind Potentiale? Aber das habe ich Ihnen doch eben erklärt!

Die Definitionen der Physik folgen der durch das Kinderlied „Der Topf hat ein Loch“ verewigten zyklischen Methode*. „Wovon aber soll ich das Potential ableiten, mein lieber Heinrich, mein lieber Heinrich?“ „Vom Intervall, dumme dumme Liese, dumme Liese, vom Intervall!“ „Womit aber soll ich das Intervall messen, mein lieber Heinrich?“ „Mit 'nem Maßstab, dumme, dumme Liese!“ „Woraus soll ich aber den Maßstab machen?“ „Aus Materie!“ „Wo find ich Materie?“ „Wo Kraft ist!“ „Wo find' ich aber die Kraft?“ „Aus dem Potential!“ „Wovon aber soll ich das Potential ableiten, mein lieber Heinrich?“ ... und so fort in nie endendem Kreislauf.

Aber vielleicht haben Sie meine Erklärung der Gravitation schon vorher abgeschnitten. Als wir bei der Materie angelangt waren, genügte es Ihnen. „Bitte, erklären Sie gar nicht weiter, denn zufällig weiß ich, was Materie ist.“ Schön. Also Materie ist etwas, das Herr X kennt. Lassen Sie uns sehen: Also: Wie soll ich Potential ableiten? Vom Intervall!

* Im Original ist der englische Kindervers: „The house, that Jack built“ benutzt.

Und das Intervall messen? Mit 'nem Maßstab! Und den Maßstab machen? Aus Materie! Was ist Materie? Das weiß Herr X. Was aber ist Herr X, mein lieber Heinrich?

Nun, merkwürdigerweise ist die Physik gar nicht so begierig danach, die Frage weiter zu verfolgen: Was ist Herr X? Sie ist nicht geneigt zuzugeben, daß das ganze mit ungeheurer Sorgfalt errichtete Gebäude der Physik „das Haus ist, das Herr X erbaut hat“. Die Physik sieht Herrn X, bzw. den Teil von Herrn X, der weiß, als ziemlich unbequemen Mieter an, der erst in einem vorgerückten Stadium der Weltgeschichte ein Gebäude bezogen hat, das die unorganische Natur in langsamem Evolutionsprozeß mit vieler Mühe errichtete. Sie schlägt nicht den Weg ein, der zu

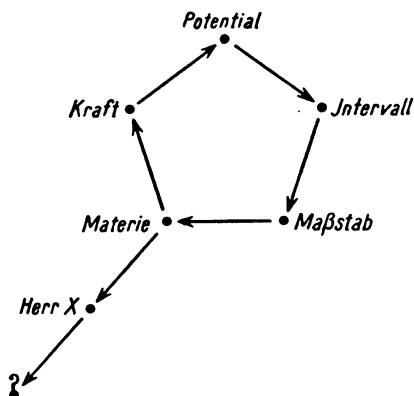


Abb. 8

Herrn X führt, ja sie schließt sogar ihren Kreis und läßt Herrn X draußen im Kalten.

Von ihrem Standpunkt aus hat die Physik vollkommen recht. Die Tatsache, daß Materie indirekt in den Bereich von Herrn X's Bewußtsein gelangt, kann von keinem Nutzen für die Errichtung eines theoretischen Schemas der Physik sein. Diese Tatsache läßt sich nicht mit Hilfe von Differentialgleichungen erfassen, folglich wird sie ignoriert. Die physikalischen Eigenschaften der Materie und aller anderen Größen werden durch die zyklische Methode der gegenseitigen Verknüpfung dargestellt. Durch diesen genialen Kunstgriff sichert sich die Physik ihren in sich geschlossenen Forschungsbereich, von dem keinerlei Abwege ins Unbekannte führen. Alle physikalischen Definitionen weisen

die gleiche Art der inneren Verkettung auf. Elektrische Feldstärke wird als Ursache der Bewegung einer elektrischen Ladung definiert; elektrische Ladung aber wiederum als Ausgangspunkt der elektrischen Feldstärke. Es ist also elektrische Ladung der Ausgangspunkt von der Ursache der Bewegung des Ausgangspunktes von . . . ad infinitum.

Aber ich schreibe hier nicht über reine Physik und von einem umfassenderen Standpunkt aus sehe ich weder Recht noch Pflicht, Herrn X draußen stehen zu lassen. Die Tatsache, daß Materie etwas „für Herrn X Erkennbares“ ist, müssen wir als eine der fundamentalen Eigenschaften der Materie buchen. Ich behaupte nicht, daß gerade Materie in besonderer Weise durch diese Eigenschaft ausgezeichnet wird, denn auch andere Größen der Physik sind für Herrn X erkennbar. Was ich betonen möchte, ist vielmehr, daß die Fähigkeit der gesamten physikalischen Welt, Eindrücke in unserem Bewußtsein hervorzurufen, eine Eigenschaft ist, die wir nicht vernachlässigen dürfen, wenn wir die wirkliche Welt mit Welten vergleichen, deren Existenz nach unserer Meinung ebenfalls möglich wäre. Es besteht die Neigung, die Wichtigkeit dieser Eigenschaft der „Erkennbarkeit für Herrn X“ zu unterschätzen. Man meint, Herr X sei so klug, daß er ziemlich alles erkennen könne, was es zu erkennen gibt. Ich habe bereits die entgegengesetzte Ansicht ausgesprochen — nämlich, daß es sich da um eine ganz bestimmte selektive Fähigkeit handelt, die der Geist ausübt. Die Physik erforscht das für den Geist Erkennbare*. Folglich unterliegt ihr Gegenstand diesem Selektionsprozeß und weist auch in der Tat die Spuren desselben auf.

Tatsächlichkeit.** „Erkennbar für den Geist“ ist diejenige Eigenschaft, welche die tatsächliche Welt unserer

* Dies gilt offensichtlich für die Experimentalphysik und muß somit auch für die theoretische Physik zutreffen, wenn sie wirklich vom Experiment als Grundlage ausgeht, wie sie es behauptet.

** Mit „Tatsächlichkeit“ ist hier das englische Wort „actuality“ übersetzt, durch das der Autor zunächst im Anschluß an die übliche Ausdrucks- und Vorstellungsweise den Begriff der Wirklichkeit in die Betrachtung einführt. Er versteht unter actuality die Wirklichkeit im Gegensatz zur bloßen Möglichkeit. Später tritt an die Stelle dessen der tiefergehende und auf S. 277 u. f. schärfer gefaßte Begriff „reality“, der in der Übersetzung durch „Realität“ wiedergegeben ist. Wo das Sprachgefühl es wünschenswert erscheinen ließ, sind beide Worte durch „Wirklichkeit“ ersetzt. (D. Übers.)

Erfahrung von den gedachten oder imaginären Welten unterscheidet, in welchen dieselben allgemeinen Naturgesetze als geltend angenommen sind. Denken wir uns eine Welt — Utopia mag sie heißen — beherrscht von all den bekannten und unbekanntem Naturgesetzen, die unsere Welt regieren, aber mit besseren Sternen, Planeten, Städten, Lebewesen — kurz eine Welt, die existieren könnte, die aber leider, wie sich nun einmal trifft, nicht existiert. Wie kann der Physiker beweisen, daß Utopia nicht die tatsächliche Welt ist? Betrachten wir ein Stück Materie dieser imaginären Welt. Es ist keine wirkliche Materie, doch zieht sie ein anderes Stück (unwirkliche) Materie in Utopia gemäß dem Gravitationsgesetze an. Maßstäbe und Uhren, die aus dieser unwirklichen Materie konstruiert sind, werden zwar falsche Intervalle messen, aber der Physiker kann das nicht nachweisen, es sei denn, daß er zuerst die Nicht-Wirklichkeit des Konstruktionsmaterials aufdeckt. Sobald ein einziges Element darin sich als unwirklich herausstellt, bricht Utopia zusammen. Solange wir aber an der zyklischen Methode der Physik festhalten, werden wir niemals den verwundbaren Punkt finden. Denn da wir vorausgesetzt hatten, daß alle unsere Naturgesetze auch für die Welt Utopia gelten sollen, so wird jedes Element dieser imaginären Welt ordnungsgemäß mit allen übrigen zyklisch verkettet sein. Die unwirklichen Sterne werden unwirkliches Licht aussenden, das auf eine unwirkliche Retina fällt, von wo ein Reiz in einem unwirklichen Nerven zu einem unwirklichen Gehirn läuft. Der nächste Schritt jedoch führt hinaus aus dem Zyklus und gibt uns Gelegenheit, die ganze Täuschung aufzudecken. Wird der dem Gehirn übermittelte Reiz in das Bewußtsein übersetzt werden? Das ist die Probe, ob das Gehirn wirklich ist oder nicht. Die Wirklichkeit des Bewußtseins kann nicht in Frage gestellt werden. Das Bewußtsein ist selbstwissend, und hierfür kann das Beiwort „wirklich“ keine Steigerung bedeuten. Von der unendlichen Anzahl Welten, die unter den gleichen Naturgesetzen möglich sind, leistet eine mehr als nur die Erfüllung dieser Gesetze. Dieses „Mehr“ besteht in einer Eigentümlichkeit, die offenbar im Rahmen der Naturgesetze nicht definierbar ist: Wir nennen sie „Tatsächlichkeit“ oder „Wirklichkeit“, und gebrauchen diese Worte wie eine Art Heiligenschein unbestimmter Bedeutung. Aber wir haben gesehen, daß die Richtung der modernen Physik dahin geht, sich von allen

diesen unbestimmten Attributen zu befreien und alle Größen nach Maßgabe des Weges zu definieren, auf dem wir ihre Eigenschaften erkennen, wenn wir auf sie stoßen. Wir erkennen aber das Attribut der Wirklichkeit als zu einer bestimmten Welt gehörig, weil diese Welt als einzige zu unserem Bewußtsein in Beziehung tritt. Mag auch der theoretische Physiker eine gewisse Abneigung gegen jede Bezugnahme auf unser Bewußtsein hegen, der Experimentator benutzt ohne Zaudern diesen Prüfstein der Wirklichkeit. Er würde vielleicht lieber glauben, die Wirklichkeit seiner Instrumente und Beobachtungen werde durch seine materiellen Sinnesorgane bestätigt, doch kann die letzte Bestätigung nur beim Geiste liegen, der die materiellen Organe wie gewöhnliche Indikatoren gewissermaßen abliest. Jeder von uns besitzt einen solchen natürlichen Prüfstein für das, was Tatsache ist. Wir wenden ihn an und erkennen, daß diese unsere traurige Welt Tatsache, und Utopia ein Traum ist. Da jeder sein besonderes Bewußtsein hat, so gibt es viele Prüfsteine, die alle verschieden sind; aber glücklicherweise stimmen sie in der Angabe dessen, was Tatsache ist, alle überein — oder wenigstens sind diejenigen, deren Prüfsteine übereinstimmen, in so großer Überzahl, daß sie die anderen in Irrenanstalten einsperren können.

Dennoch ist es berechtigt, daß die theoretische Physik die Frage nach der Wirklichkeit und dem, was Wirklichkeit verbürgt, bei dem Aufbau des Systems ihrer Gesetze völlig ausschließt. Denn gerade auf diesem Verzicht beruht der Unterschied zwischen einem Naturgesetz und einer zufälligen Folge von Ereignissen. Was möglich ist (oder nicht „zu unwahrscheinlich“), gehört zum Bereich der Naturwissenschaft, was wirklich ist, zu dem der Naturgeschichte. Es ist kaum nötig hervorzuheben, daß die Naturwissenschaft, gerade weil sie sich nicht auf Betrachtung von Tatsachen beschränkt, ein besseres Verstehen des Tatsächlichen oder Wirklichen zur Folge hat.

Wenn wir aber nicht nur das System der physikalischen Gesetze herausarbeiten wollen, sondern von einem umfassenderen Standpunkt aus die Welt betrachten, so können wir die Verbindung zum Geist nicht als zufälligen Nebenbestand in einer aus sich existierenden unorganischen Welt ansehen. Wenn ich gesagt habe, daß Wirkliches und Nichtwirkliches nur durch Bezugnahme auf den Geist unter-

schieden werden kann, so heißt das nicht, daß einer Welt ohne bewußten Geist nicht mehr Existenz zugesprochen werden könne als Utopia. Nur wäre dann diese Eigenschaft der Wirklichkeit undefinierbar, da mit dem Geist zugleich die einzige Möglichkeit zu ihrer Definition entschwinden würde. Die Wirklichkeit der Natur ist wie ihre Schönheit. Man kann nicht gut sagen, daß die Schönheit einer Landschaft nicht vorhanden sei, wenn niemand sie betrachtet, doch erhält sie nur durch den bewußten Geist einen Sinn. Und so ist es auch mit ihrer Wirklichkeit. Wäre „wirklich“ dasselbe wie „vom bewußten Geiste erkannt“, so wäre Wirklichkeit ein rein subjektiver Charakter der Welt; soll die Wirklichkeit objektiv sein, so muß „wirklich“ gleich bedeutend mit „dem bewußten Geiste erkennbar“ gesetzt werden. Je weniger Gewicht wir darauf legen, daß die Ereignisse in irgendeinem Teile der Welt zur Zeit tatsächlich wahrgenommen werden, um so mehr Bedeutung müssen wir ihrer Wahrnehmbarkeit durch den bewußten Geist beimessen, als einer fundamentalen objektiven Eigenschaft der Materie, die ihr Wirklichkeit verleiht, gleichgültig, ob nun ein bewußter Geist sie im Augenblick gerade wahrnimmt oder nicht.

In unserer Abbildung wurde Herr X an einem ganz bestimmten Punkte mit dem Zyklus verbunden gemäß unserer Annahme, daß Herr X Anspruch auf Kenntnis der Materie erhebt. Aber eine kleine Überlegung zeigt uns, daß der Punkt, in dem sich Geist und physikalische Welt berühren, nicht so genau festgelegt ist. Herr X kennt einen Tisch, doch liegt die Berührungsstelle mit seinem Bewußtsein nicht in dem Material des Tisches. Lichtwellen gehen von dem Tische aus, treffen das Auge und rufen chemische Veränderungen in der Netzhaut hervor; der Reiz wird auf irgendeine Weise von den Sehnerven weitergeleitet, atomare Veränderungen im Gehirn sind die Folge. Aber gerade der letzte Sprung ins Bewußtsein läßt sich nicht erkennen. Nirgends sehen wir eine Pforte, durch welche die Botschaft aus der physikalischen Welt ins Bewußtsein tritt. Doch für den Physiker ist das ohne Bedeutung. Die physikalischen Größen haben ihre zyklische Verbindung, und was immer wir einer von ihnen als innere Natur zuschreiben, das zieht sich als Weltgrund durch den ganzen Zyklus. Es hat keinen Sinn, zu fragen, ob es schließlich Materie oder Elektrizität oder Potential ist, was einen direkten Reiz auf den Geist aus-

übt. Alle diese Größen sind in physikalischer Hinsicht in gleicher Weise durch Zeigerablesungen oder ganze Beobachtungsprotokolle dargestellt. Als wir vom Weltbau sprachen, haben wir gesehen, daß die Maßzahlen der Weltstruktur sind, die sich aus der Vergleichbarkeit gewisser Seiten der Grundrelationen ergeben—Maße aber, die keineswegs die Bedeutung dieser Relationen erschöpfen. Ich glaube nicht, daß die Aktivität von Materie an einem bestimmten Punkt des Gehirns eine Aktivität des Geistes hervorruft. Meine Auffassung ist, daß die Aktivität der Materie im Gehirn eine metrische Beschreibung gewisser Seiten der Aktivität des Geistes ist. Die Aktivität der Materie ist unsere Art, eine Verknüpfung der Strukturmaße zu erkennen; die Aktivität des Geistes ist unsere innere Einsicht in den Komplex von Relationen, deren Vergleichbarkeit die Grundlage für die Herleitung dieser Strukturmaße bildet.

„Was ist Herr X?“ Wir wollen nun sehen, ob wir im Lichte dieser Betrachtungen eine Antwort auf die Frage finden: „Was ist Herr X?“ Doch muß ich dabei auf Ihre Mithilfe verzichten, denn vorher müßte ich ja Antwort auf die ebenso schwierige Frage haben „Was sind Sie?“ Demnach darf die ganze Untersuchung nur innerhalb meines eigenen Bewußtseins stattfinden. Ich finde da bereits mehrere Data, die Bezug auf diesen unbekanntem Herrn X haben, und ich kann (durch meinen freien Willen) sie noch vermehren, indem ich Experimente an Herrn X anstelle. Zum Beispiel kann ich eine chemische Analyse machen. Das unmittelbare Ergebnis dieser Experimente ist das Auftreten gewisser Geruchs- und Gesichtsempfindungen in meinem Bewußtsein. Aber von da ist noch ein weiter Weg bis zu irgendeiner vernünftigen Schlußfolgerung über das Wesen von Herrn X. Bei der Analyse habe ich z. B. erfahren, daß in dem Gehirn von Herrn X Kohlenstoff vorhanden ist, doch bezog sich die unmittelbare Wahrnehmung auf etwas in meinem eigenen Bewußtsein, das mit Kohlenstoff nichts zu tun hat. Während ich also etwas in meinem Bewußtsein wahrgenommen habe, behaupte ich, Kenntnis von etwas zu besitzen, das sich irgendwo im Raume befindet. Dazu werde ich durch eine Kette von Schlußfolgerungen instand gesetzt, die sich von dem ersten Punkt des Wissensinhaltes zum zweiten spannen läßt. Wenn wir instinktive oder auf Grund des gesunden Menschenverstandes gezogene Schlüsse — die

groben Vorläufer wissenschaftlicher Schlußweise — beiseite lassen, so kann unsere Schlußkette nur symbolisch beschrieben werden. Sie verbindet den Punkt der symbolischen Welt, den ich mir zuordne, mit dem Punkt, den ich Herrn X zuordne.

Es ist charakteristisch für diese Schlußweise, daß wir niemals entdecken, was Kohlenstoff in Wirklichkeit ist. Er bleibt ein Symbol. Auch in meinem eigenen Gehirn (das, wenn ich es von innen betrachte, Geist ist) findet sich Kohlenstoff; aber nicht die Selbstkenntnis meines Geistes enthüllt mir dies. Daß das Symbol für Kohlenstoff dort seinen Platz finden muß, kann ich nur dadurch erfahren, daß ich einer durch die Außenwelt laufenden Schlußkette folge, die der ähnlich ist, durch die ich es in Herrn X entdeckt habe; und wie eng auch dieser Kohlenstoff mit meinem Denkvermögen verbunden sein mag, nur als ein Symbol, das mit Denkfähigkeit nichts zu tun hat, lerne ich ihn kennen. Kohlenstoff ist ein Symbol, das nur durch die anderen Symbole, die zu dem zyklischen System der Physik gehören, definiert werden kann. Was ich herausgefunden habe, ist nur folgendes: Damit die zur Beschreibung der physikalischen Welt benutzten Symbole den mathematischen Formeln genügen, in denen ihre gegenseitigen Beziehungen festgelegt sind, ist es nötig, dem Symbol für Kohlenstoff (neben anderen) an der von Herrn X eingenommenen Raumstelle einen Platz anzuweisen. Auf ähnliche Weise kann ich eine erschöpfende physikalische Untersuchung des Herrn X durchführen und das ganze Heer von Symbolen feststellen, die innerhalb der Raumstelle, die von ihm eingenommen wird, untergebracht werden müssen.

Erhalte ich nun durch dieses Heer von Symbolen alles, was Herr X ist? Wir haben nicht den geringsten Grund, das anzunehmen. Die Stimme, die über den Telephondraht zu uns dringt, ist nicht alles, was sich am anderen Ende des Drahtes befindet. Die Kette wissenschaftlicher Schlußfolgerungen ist aber wie ein Telephondraht; sie kann nur gerade das übermitteln, zu dessen Übermittlung sie konstruiert wurde.

Die Verbindung zwischen Herrn X und mir kann von zwei Seiten aus betrachtet werden. Sie ist einerseits eine Kette von Schlußfolgerungen, welche von den Symbolen, die den Sinneseindrücken in meinem Bewußtsein assoziiert sind, zu den Symbolen herüberleiten, die Herrn X kennzeichnen.

Andererseits ist sie eine Kette von einander auslösenden Reizen, die von Herrn X ausgehen und schließlich mein Gehirn erreichen. Unsere Schlußfolgerung legt sozusagen Schritt für Schritt, nur in umgekehrter Richtung, denselben Weg zurück, den vorher die von Herrn X ausgehende physikalische Übertragung genommen hatte (abgesehen natürlich von den Abkürzungen unserer Schlüsse, die unsere bereits gesammelte Erfahrung erlaubt). Für gewöhnlich denken wir nur an die Kette physikalischer Übertragungen. Da dieselbe Verbindungslinie aber auch eine Kette von Schlußfolgerungen darstellt, so ist sie Einschränkungen unterworfen, die man bei einer physikalischen Übertragung nicht notwendig erwarten müßte.

Das System von Schlußfolgerungen, das wir bei physikalischen Untersuchungen anwenden, reduziert sich auf mathematische Gleichungen, die das Verhalten der Symbole regeln. Solange wir dieses Verfahren beibehalten, sind wir notwendig auf Symbole arithmetischer Art beschränkt, die solchen mathematischen Gleichungen angemessen sind*. Infolgedessen können wir durch rein physikalische Betrachtungsweise niemals eine andere Kenntnis von Herrn X erlangen, als in numerischer Form in einer Folge mathematischer Gleichungen zum Ausdruck gelangen kann.

Die Mathematik gilt als Vorbild exakter Schlußweise; und so sind wir in der Physik bestrebt gewesen, überall diese strenge Schlußweise einzuführen. Sobald wir die Kette mathematischer Schlußfolgerungen nicht schließen können, gestehen wir, im Dunkeln zu tappen und nicht für die Exaktheit unserer Erkenntnis einstehen zu können. Kein Wunder also, daß die physikalische Wissenschaft zu einem Weltbild gelangt ist, in dem alle Gegebenheiten durch mathematische Formeln fest miteinander zu einem deterministischen System verknüpft sind. Alle physikalische Kenntnis ist mit Hilfe einer Kette von Schlußfolgerungen erworben und muß somit notwendig mit dem System von Schlußfolgerungen in Übereinstimmung stehen, das dabei angewendet wurde. Der Determinismus unserer physikalischen Gesetze spiegelt nur den Determinismus unserer mathematischen Schlußweise wider. Das scheinbar Seelenlose der physikalischen Welt

* Die einzige Ausnahme ist, wie ich glaube, Diracs Verallgemeinerung, die q -Zahlen einführt (S. 209). Doch ist bis jetzt noch kein Versuch gemacht worden, ein allgemeines System von Schlußfolgerungen auf nicht-numerischer Basis durchzuführen.

braucht den nicht zu beunruhigen, der überzeugt ist, daß die wahre Bedeutung unserer Umwelt ihren Schwerpunkt im Geistigen hat. Jeder, der sich in die Methode der mathematisch-physikalischen Schlußweise vertieft hat, könnte im großen und ganzen die charakteristischen Züge der Welt vorhersagen, die er mit ihrer Hilfe notwendigerweise finden muß. Was er aber nicht hätte voraussagen können, ist der außerordentliche Erfolg dieser Methode: daß es möglich gewesen ist, einen so großen Teil aller Naturerscheinungen diesem vorher konstruierten Schema einzupassen. Wollten wir dies Schema jedoch für allumfassend halten, so hieße dies, den offenbaren Tatsachen ins Gesicht schlagen, und würden wir auch noch so große Entwicklungsmöglichkeiten für dasselbe zulassen. Herr X ist eine dieser Tatsachen. Schallwellen treffen sein Ohr und er bewegt sich, aber nicht etwa gemäß irgendeiner mathematischen Gleichung, die die physikalischen Maßzahlen dieser Wellen enthält, sondern gemäß dem *Sinn*, der ihm mit Hilfe der Schallwellen übermittelt wurde. Was hat es mit Herrn X für eine Bewandnis, daß er sich so merkwürdig benimmt? Um dies zu erkennen, dürfen wir uns nicht an ein System physikalischer Schlußfolgerungen halten, sondern müssen den direkten Einblick in den Weltgrund hinter den Symbolen zu Hilfe ziehen, den wir in unserem eigenen Bewußtsein besitzen. Durch diesen Einblick allein können wir letztlich eine Antwort auf die Frage erhalten: „Was ist Herr X?“

REALITÄT

Das Reale und das Konkrete. Als unsere Vorfahren noch in den Baumkronen der Wälder turnten, hat wohl einmal zufällig einer den Ast im Sprunge verfehlt, und seine Hand schloß sich um nichts. Vielleicht gab dieser Vorfall die Veranlassung zu philosophischen Überlegungen über den Unterschied von Substanz und Leere — von der Erscheinung der Schwere noch ganz zu schweigen. Wie dem auch sei, jedenfalls haben seine Nachkommen bis auf den heutigen Tag einen ungeheuren Respekt vor der Substanz bewahrt, mögen wir auch nicht wissen, wie und warum er entstanden ist. Auf der Bühne des täglichen Lebens ist die Substanz gleichsam der Hauptakteur, kostümiert mit den Attributen der Gestalt, Farbe, Härte usw., die zu unseren verschiedenen Sinnen sprechen. Die Kulissen bilden Raum und Zeit, durchsetzt von Kräften und nicht konkreten Agenzien zur Unterstützung des Hauptdarstellers.

Unsere Vorstellung von Substanz hat jedoch nur so lange diese lebendige Anschaulichkeit, als wir nicht danach trachten, sie zu analysieren. Sobald wir sie zu fassen suchen, schwindet sie unter unseren Händen dahin. Viele ihrer angeblichen Attribute sind offenbar unsere eigenen Sinnesindrücke, die wir in die Außenwelt hinausprojizieren. So z. B. die Farbe, die wir so außerordentlich lebhaft in unserem Geiste empfinden, und die sich doch durch nichts in dem substanzhaften Objekt selbst verkörpern läßt. Aber auf jeden Fall gehört Farbe nicht wesentlich zur Natur der Substanz. Das, was wir an der Substanz für das Wesentliche halten, suchen wir durch das Wort „konkret“ auszudrücken, ein Attribut, das man vielleicht als Projektion unseres Tastsinnes auffassen kann. Wenn ich den Ast von allem entkleidet denke außer von seiner Substanzhaftigkeit, bzw. Konkretheit und dann meine ganze Kraft darauf konzentriere, ihn mir anschaulich vorzustellen, so versagt jede Anschauung. Als einziges Resultat meiner Anstrengung bleibt ein instinktives Zusammenballen der Finger, — aus dem

man vielleicht schließen könnte, daß unsere Vorstellung von Substanz gar nicht so verschieden ist von der unserer auf Bäumen lebenden Vorfahren.

So stark hat der Substanzbegriff seine herrschende Rolle auf der Bühne des täglichen Lebens behauptet, daß im gewöhnlichen Sprachgebrauch die Begriffe konkret und real fast synonym sind. Bitten Sie irgend jemanden, der nicht gerade Philosoph oder Mystiker ist, er möge ein typisches Beispiel für etwas Reales nennen, sicher wird er etwas Konkretes wählen. Die Frage, ob Zeit real sei, wird er vielleicht nach einigem Zögern mit ja beantworten, doch wird er das unbestimmte Gefühl haben, daß diese Frage nicht ganz richtig gewählt sei und daß man ihn damit habe irgendwie hineinlegen wollen.

In der wissenschaftlichen Welt fehlt der Substanzbegriff gänzlich, und das, was noch am ehesten einen Ersatz für die Substanz bildet, die elektrische Ladung, erhebt nicht mehr den Anspruch auf einen Vorrang vor den übrigen Größen der Physik. Dies ist der Grund, warum die physikalische Welt so oft den befremdenden Eindruck der Unwirklichkeit macht. Sie befriedigt nicht unser Verlangen nach Konkretem. Wie sollte sie auch, können wir doch dieses Verlangen nicht einmal klar ausdrücken! Wir haben es versucht, und das einzige Ergebnis war ein Zusammenballen der Finger. Die Naturwissenschaft ignoriert keineswegs die Veranlassung zu Tast- und Muskelempfindungen, und wenn sie uns vom Konkreten wegzuleiten sucht, so ist dies der Ausdruck dafür, daß die Berührung mit dem Realen ungleich differenzierter ist, als sie unserem affenartigen Vorfahren erschien, für den der Ast, der ihn trug, Anfang und Ende aller Realität bedeutete.

Aber wir beschränken uns hier nicht auf die wissenschaftliche Welt, sondern ziehen, wie schon im vorigen Kapitel, ein weiteres Blickfeld in Betracht, das zugleich mit dem zyklischen System der Physik noch viel anderes umfaßt. Bevor wir uns jedoch auf so gefährliches Gebiet vorwagen, muß ich noch ein Resultat, das nur die exakte Wissenschaft betrifft, ausdrücklich hervorheben. Die modernen wissenschaftlichen Theorien haben mit dem Standpunkt gebrochen, der das Reale mit dem Konkreten identifiziert. Ich möchte sogar so weit gehen, zu behaupten, daß die Zeit ein typischeres Beispiel für eine im physikalischen Sinne reale Größe ist, als Materie, denn sie ist weniger

beschwert von jenen metaphysischen Begriffsverbindungen, welche die Physik ablehnt. Nur dürfen wir nicht gleich sagen: wenn die Physik schon so weit gegangen ist, so könnte sie auch zugeben, daß Realität ein geistiges Attribut ist. Nein, wir müssen weit behutsamer vorgehen. Doch sind wir wenigstens, wenn wir uns solchen Fragen zuwenden, jetzt nicht mehr in Versuchung, nur das Konkrete für real zu halten.

Die Kluft zwischen dem wissenschaftlichen und dem außerwissenschaftlichen Gebiet der Erfahrung trennt, so meine ich, nicht das Konkrete von dem Transzendentalen, sondern das Metrische von dem Nichtmetrischen. Ich stimme mit den Materialisten in dem Punkte überein, daß ich einen Widerwillen habe gegen jede Art von pseudo-wissenschaftlicher Behandlung außer-wissenschaftlicher Fragen. Man darf der exakten Wissenschaft nicht deshalb Engherzigkeit vorwerfen, weil sie diejenigen Elemente der Erfahrung von ihrer Betrachtung ausschließt, die ihrer eigenen hoch entwickelten Methode nicht angemessen sind. Noch kann sie deswegen getadelt werden, weil sie ein wenig stolz auf die verhältnismäßig geringe Ordnung unserer Kenntnisse und Schlußweisen in dem nicht metrisch faßbaren Teil unserer Erfahrung herabsieht. Jedoch denke ich, wir haben uns nicht der Pseudo-Wissenschaftlichkeit schuldig gemacht, wenn wir in den zwei letzten Kapiteln zu zeigen versuchten, worauf es beruht, daß innerhalb des gesamten Gebietes unserer Erfahrung ein ganz bestimmter Teil jener exakt metrischen Darstellungsweise zugänglich ist, ohne die eine Behandlung durch die exakt wissenschaftliche Methode gar nicht erfolgen kann.

Geist-Stoff. Ich will so präzis wie möglich den flüchtigen Schein zu bestimmen suchen, den es uns von der Realität zu erhaschen gelungen ist. Nur bin ich mir wohl bewußt, daß es schwer sein wird, Fehler zu vermeiden, sobald ich auf nähere Einzelheiten einzugehen trachte. Denn wenn ich auch hoffe, daß wir die Wendung, welche die moderne Naturwissenschaft genommen hat, philosophisch richtig gedeutet haben, so wäre es doch sehr verfrüht, auf dieser Grundlage bereits ein festumrissenes Schema vom Wesen der Dinge errichten zu wollen. Auch muß ich zugeben, daß der Einwand, gewisse Fragestellungen, die wir berührt haben, gehörten mehr in das Gebiet des Fachpsychologen, durchaus

berechtigt wäre. Dennoch glaube ich, daß die letzten Entwicklungen der Physik uns zu einer Höhe führen, von der aus man wohl in die tiefen Wasser der Philosophie hinabblicken kann; und wenn ich etwas voreilig hineinspringe, so tue ich das nicht aus besonderem Vertrauen zu meinen Schwimmkünsten, sondern um Ihnen vor Augen zu führen, daß das Wasser wirklich tief ist.

Um unsere Schlußbehauptung mit einem Schlagwort vorwegzunehmen: Der Stoff der Welt ist Geist-Stoff. Doch wie es so oft bei schlagwortartigen Behauptungen geht, ich muß erklären, daß hier „Geist“ nicht genau Geist und „Stoff“ durchaus nicht Stoff bedeuten soll. Genauer läßt sich aber das, was ich meine, mit kurzen Worten nicht sagen. Der Geist-Stoff der Welt ist natürlich etwas weit allgemeineres als unser eigener bewußter Geist, aber vielleicht brauchen wir uns sein Wesen nicht als so völlig verschieden von den Empfindungen unseres Bewußtseins vorzustellen. Die „realistische“ Materie und die „realistischen“ Kraftfelder der alten physikalischen Theorie haben keine Beziehung zu ihm — ausgenommen die eine, daß der Geist-Stoff diese Phantasiegebilde selbst gesponnen hat. Die „symbolische“ Materie und die „symbolischen“ Kraftfelder der modernen Theorie kommen ihm schon näher, doch stehen sie zu ihm in derselben Beziehung, wie die Rechnungen jenes Universitätsquästors zu dem wirklichen Leben der Universität. Haben wir dies einmal als richtig erkannt, so wird uns die geistige Aktivität des Teiles der Welt, aus dem wir selber bestehen, nicht mehr überraschen. Wir kennen sie durch direkte Selbstkenntnis und versuchen nicht, durch „Erklären“ etwas anderes daraus zu machen, als das, als was wir sie kennen — oder vielmehr, als was sie sich selbst kennt. Nur die physikalische Seite der Welt bedarf einer Erklärung, wahrscheinlich in ähnlicher Weise, wie wir es in unserem Versuch, die Welt aufzubauen, begonnen haben. Unsere Körper sind uns ein größeres Geheimnis als unser Geist, wenigstens würden sie es sein, hätten wir nicht durch den Kunstgriff des zyklischen Systems der Physik das Geheimnis beiseite gestellt und die Möglichkeit gewonnen, das Verhalten der Körperwelt, so weit es in Erscheinung tritt, wissenschaftlich zu untersuchen, ohne jemals auf das zugrunde liegende Geheimnis zu stoßen.

Der Geist-Stoff ist nicht in Raum und Zeit ausgebreitet. Diese sind vielmehr Teil des zyklischen Schemas, das seinerseits letztlich im Geist-Stoff wurzelt. Doch müssen wir

auch für den Geist-Stoff die Möglichkeit irgendeiner, wenn auch ganz anders gearteten Teilung annehmen. Nur an vereinzelt Stellen steigt er zur Ebene des Bewußtseins empor, und von diesen „Inseln“ geht jede Kenntnis aus. Außer der direkten Kenntnis, die in jeder solchen selbstwissenden Einheit enthalten ist, gibt es noch Erkenntnis, die auf logischen Schlüssen beruht, und unsere gesamte Kenntnis von der physikalischen Welt gehört zu der letzteren Art. Wir dürfen nicht vergessen, daß alle Kenntnis unserer Umwelt, aus der die Welt der Physik aufgebaut ist, in Form von chiffrierten Botschaften längs der Nerven zum Sitz unseres Bewußtseins gelangt. Wenn z. B. Botschaft über einen Tisch durch die Nerven übertragen wird, so hat der Vorgang in den Nerven weder irgendeine Ähnlichkeit mit dem Tisch der Außenwelt, der den geistigen Eindruck ursprünglich hervorruft, noch mit der Vorstellung von dem Tisch, die in unserem Bewußtsein entsteht*. In dem Zentral-Dechiffrierungsbureau werden die Botschaften geordnet und übersetzt, und zwar zum Teil vermöge einer instinktiven, von unseren Vorfahren ererbten Fähigkeit, anschauliche Bilder zu formen, zum Teil mit Hilfe wissenschaftlichen Vergleichens und Schlußfolgerns. Auf dieser äußerst indirekten und hypothetischen Schlußweise beruht unsere gesamte Scheinbekanntschaft mit der Außenwelt und alle Theorien über ihren Aufbau. Die Außenwelt ist uns bekannt, weil sich gleichsam Fäden von ihr zu unserem Bewußtsein ziehen, aber es sind nur die Enden dieser Fäden in unserem Bewußtsein, die wir wirklich kennen. Aus diesen Enden konstruieren wir rückschließend mit mehr oder weniger Erfolg das übrige, so wie der Paläontologe einen ausgestorbenen Riesen der Vorwelt aus seinen Fußstapfen rekonstruiert.

Der Geist-Stoff ist jene Anhäufung von Relationen und Relatis, die das Baumaterial der physikalischen Welt bilden. Unser Versuch, diesen Aufbau auszuführen, zeigte jedoch, daß von dem, was in den Urbeziehungen enthalten ist, vieles fortfällt, weil es für den verlangten Bau unnötig ist. Wir ver-

* Ich meine Ähnlichkeit in bezug auf das innere Wesen. Es ist wahr, (wie Bertrand Russell betont hat), daß die symbolische Beschreibung seiner Struktur für den Tisch der Außenwelt und für die Vorstellung vom Tische in unserem Bewußtsein die gleiche ist, vorausgesetzt, daß diese Vorstellung wissenschaftlich richtig ist. Wenn der Physiker nicht den Versuch macht, hinter diese Struktur zu dringen, so ist es für ihn gleichgültig, auf welchen Tisch wir uns in unserer Diskussion beziehen.

treten praktisch die gleiche Ansicht, die W. K. Clifford im Jahre 1875 hervorgehoben hat:

„Die Folge von Empfindungen, aus denen das Bewußtsein des Menschen besteht, ist die Wirklichkeit, die in unserem Geiste die Vorstellung von Vorgängen in seinem Gehirn hervorruft.“

Das heißt: Das, was der Mensch in sich selbst als eine Folge von Empfindungen kennt, ist die Wirklichkeit. Versucht aber ein außenstehender Beobachter, diese Wirklichkeit mit allen möglichen Apparaten zu ergründen, so beeinflusst sie deren Zeigerstellungen so, daß sie mit einer bestimmten Konfiguration der Gehirnmaterie identifiziert wird. Wieder zitieren wir Bertrand Russell*:

„Es folgt daraus, daß, wenn ein Physiologe ein Gehirn untersucht, sich das, was er sieht, in ihm und nicht in dem untersuchten Hirn abspielt. Was in dem toten Hirn vor sich geht, während der Physiologe es untersucht, gestehe ich nicht zu wissen; aber solange sein Besitzer lebte, bestand mindestens ein Teil seines Inhalts aus dessen Wahrnehmungen, Gedanken und Gefühlen. Da nun aber dieses Hirn auch aus Elektronen bestand, so sind wir zu schließen genötigt, daß ein Elektron eine Gruppierung von Ereignissen ist, und daß, wenn das Elektron sich in einem menschlichen Hirn befindet, einige der es zusammensetzenden Ereignisse wahrscheinlich zu den ‚psychischen Zuständen‘ des Menschen gehören, um dessen Hirn es sich handelt. Oder jedenfalls besteht die Wahrscheinlichkeit, daß sie Teile solcher ‚psychischer Zustände‘ sind; denn man braucht nicht anzunehmen, daß ein Teil eines psychischen Zustandes selbst wieder ein psychischer Zustand sein müsse. Was unter einem ‚psychischen Zustand‘ zu verstehen ist, will ich nicht erörtern; für uns ist die Hauptsache, daß dieser Ausdruck Wahrnehmungsinhalte umfassen muß. Ein Wahrnehmungsinhalt ist also ein Ereignis oder eine Gruppe von solchen, von denen jedes einzelne wieder zu einer oder mehreren der Gruppen gehört, die die Elektronen im Gehirn ausmachen. Das ist, glaube ich, die konkreteste Aussage, die über Elektronen gemacht werden kann; alles, was sonst noch darüber gesagt werden kann, ist mehr oder weniger abstrakt und mathematisch.“

* Bertrand Russell, Philosophie der Matière, Deutsch von K. Grelling, Teubner 1929. S. 335.

Es kommt mir hier vor allem auf die Bemerkung an, daß ein Teil eines psychischen, d. h. geistigen Zustandes * nicht notwendig ebenfalls ein geistiger Zustand sein muß. Wir können zweifellos den Inhalt unseres Bewußtseins während eines kurzen Zeitabschnittes in mehr oder weniger elementare Grundempfindungen zerlegen. Doch darf man deswegen nicht voraussetzen, daß diese psychologische Analyse uns die Elemente enthüllen wird, aus deren Maßzahlen die Atome und Elektronen gebildet sind. Die Gehirnmaterie ist nur eine Seite des gesamten geistigen Zustandes, und ihre Analyse auf Grund physikalischer Untersuchungen läuft keineswegs parallel zur Analyse des geistigen Zustandes durch eine psychologische Untersuchung. Meiner Ansicht nach wollte Russel darauf aufmerksam machen, daß mit „Teil eines geistigen Zustandes“ nicht notwendig ein solcher Teil gemeint sein muß, der mit Hilfe psychologischer Untersuchungsmethoden erkannt wird, sondern daß auch eine abstraktere Art der Teilung zulässig ist.

Dies könnte zu Schwierigkeiten führen, wenn wir vollkommene Identität zwischen Geist-Stoff und Bewußtsein fordern wollten. Doch wie wir wissen, ruhen im Geiste Erinnerungen, deren wir uns im Augenblick nicht bewußt sind, die wir uns aber jederzeit ins Bewußtsein rufen können. Wir haben das unbestimmte Gefühl, daß Dinge, bei denen uns dies nicht gelingt, dennoch irgendwo bereitliegen und plötzlich in unserem Geiste auftauchen können. Unser Bewußtsein ist nicht etwas scharf Umgrenztes, es geht allmählich in das Unterbewußtsein über, und wir müssen annehmen, daß diesem irgend etwas Unbestimmtes zugrunde liegt, das in stetigem Zusammenhang mit unserer geistigen Natur steht. Dieses unbestimmte Etwas identifiziere ich mit dem Weltstoff. Wir nehmen es ähnlich unserem bewußten Empfinden an, da jetzt, nachdem wir uns von dem formalen und symbolischen Charakter aller physikalischen Größen überzeugt haben, gar nichts weiter übrigbleibt, dem es ähnlich sein könnte.

Man hat vorgeschlagen, den Grundstoff der Welt „Neutralstoff“ zu nennen, da aus ihm sowohl Geist wie Materie hervorgehen. Wenn dadurch ausgedrückt werden

* K. Grelling übersetzt „mental state“ sehr richtig mit „psychischer Zustand“. Im Zusammenhang dieses Buches möchten wir jedoch den Ausdruck „geistiger Zustand“ beibehalten. (D. Übers.)

soll, daß er sich nur in einzelnen begrenzten Inseln zu einem wirklichen bewußten Geist verdichtet, und daß selbst innerhalb dieser Inseln das, was geistig erkannt ist, keineswegs einem vollständigen Inventar alles dessen äquivalent ist, was da vielleicht wirklich vorhanden sein mag, so bin ich damit einverstanden. Doch würde ich annehmen, daß die Selbstkenntnis des Bewußtseins ganz oder doch hauptsächlich eine Erkenntnisart ist, die sich der Beschreibung durch eine Inventarmethode überhaupt entzieht. Sicher ist auch der Ausdruck Geist-Stoff durchaus verbesserungsfähig, doch scheint mir „Neutralstoff“ nicht das Geeignete. Die Bezeichnung Neutralstoff legt die Vermutung nahe, daß es zwei Wege gäbe, auf denen man Einblick in sein wahres Wesen gewinnen könne. Es gibt aber nur den einen Weg durch unsere direkte Kenntnis des Geistes. Der Versuch, von der physikalischen Welt aus dem Wesen des Weltgrundes sich zu nähern, führt immer nur in dem zyklischen System der Physik im Kreise herum und kann uns niemals dem Weltstoff nahe bringen.

Ich denke, wir haben uns von der Illusion der Substanz bereits so weit entfernt, daß der Ausdruck „Stoff“ kein Mißverständnis mehr hervorrufen kann. Sicher liegt mir jede Materialisierung oder Substantialisierung des Geistigen fern. Geist ist . . . , aber Sie wissen ja selbst, was Geist ist, und ich brauche sein Wesen nicht erst zu erklären. Das Wort „Stoff“ soll zum Ausdruck bringen, daß es sich um den Untergrund für den Aufbau der Welt handelt, und keinerlei nähere Bestimmung über das Wesen desselben in sich schließen.

Der auf Tatsachen eingestellte Physiker wird sich nur schwer die Auffassung zu eigen machen, die Grundlage aller Dinge sei letztlich geistiger Natur. Aber niemand kann leugnen, daß der Geist der erste und unmittelbarste Gegenstand unserer Erfahrung ist, und alles andere nur abgeleitete Schlußfolgerungen, seien sie intuitiv oder auf logischem Wege erfolgt. Vielleicht wäre es uns niemals ernsthaft in den Sinn gekommen, die Welt könne auf irgend etwas anderes gegründet sein, hätten wir nicht unter dem Eindruck gestanden, daß es noch einen anderen Stoff gäbe, von einer ungleich anheimelnderen Art „konkreter“ Realität, etwas, das viel zu träge und stumpf ist, um ein Trugbild vorzutäuschen. Dieser Rivale erweist sich nun als Liste von Zeigerablesungen; und wenn es auch möglich ist, eine symbolische

Welt aus solchem „Stoff“ zu konstruieren, so wird dabei die Frage nach der wahren Natur der Erfahrungswelt nur beiseite gestellt.

Diese Auffassung von der Beziehung zwischen der Welt der Materie und der des Geistes ist vielleicht geeignet, bis zu einem gewissen Grade die Spannung zwischen Wissenschaft und Religion auszugleichen. Die Physik schien ein Gebiet der Realität in Besitz zu haben, das in jeder Beziehung sich selbst genüge. Darum nahm sie überhaupt nicht Stellung zu dem, dessen höhere Realität uns durch eine innere Stimme versichert wird, und sie verfolgte ihren Weg ganz unabhängig davon. Man kann sie um eine solche Unabhängigkeit beneiden, aber man ist beunruhigt über diese anscheinend ganz auf sich selbst gestellte Welt, in der Gott zu einer unnötigen Hypothese herabsinkt. Wohl bekennen wir, daß die Wege Gottes unerforschlich sind; aber lebt nicht in unserem Fühlen noch etwas von der Art des religiösen Geistes der alten Propheten, die Gott anriefen, sein Königtum zu offenbaren und durch Zeichen und Wunder darzutun, daß die Kräfte der Natur seinem befehlenden Willen untertan sind? Und selbst wenn der Physiker widerrufen wollte und zugeben, daß unter den Kräften, die Sterne und Elektronen auf ihren Bahnen leiten, ein allgegenwärtiger Geist walten muß, auf den die heiligen Dinge des Bewußtseins hinweisen, würde dann unsere Beunruhigung nicht noch größer werden? Denn wir müßten ja befürchten, daß der fromme Physiker die Absicht hätte, Gott auf ein System von Differentialgleichungen zurückzuführen, wie er es mit allen anderen Kräften gemacht hat, die zu verschiedenen Zeiten eingeführt wurden, um die Ordnung im physikalischen System wieder herzustellen. Dieser Mißgriff ist bei unserer neuen Auffassung von der Beziehung zwischen materieller und geistiger Welt jedenfalls vermieden. Denn der Geltungsbereich der Differentialgleichungen der Physik ist auf jenes metrische, zyklische System beschränkt, das nur einen begrenzten Ausschnitt aus einer ungleich breiteren Realität herausgreift. Mögen sich die Verästelungen der Zyklen infolge neuer wissenschaftlicher Entdeckungen auch noch so weit erstrecken, sie können ihrer innersten Natur nach niemals in jenen Urgrund eindringen, in dem ihr Sein und ihre Wirklichkeit ruht. In diesem Urgrund liegt unser eigenes geistiges Bewußtsein verankert, und wenn irgendwo, so können wir hier eine Macht finden, die größer ist als unser Bewußtsein,

doch gleichen Ursprungs. Soweit wir diesen geistigen Ursprung in unserem Bewußtsein kennen, ist er wesentlich nichtmetrisch, und so können seine leitenden Gesetze unmöglich den Differentialgleichungen und anderen mathematischen Gleichungen der Physik analog sein, die nur dadurch Inhalt und Sinn erhalten, daß metrische Größen eingesetzt werden. Die naivste anthropomorphe Darstellung einer geistigen Gottheit kann niemals so weit ab von der Wahrheit liegen, wie ein durch metrische Gleichungen erfaßtes Bild des göttlichen Geistes.

Definition der Realität. Es ist Zeit, daß wir die unbestimmten Begriffe Realität und Existenz schärfer zu fassen suchen, die wir bisher einfach angewendet hatten, ohne uns weiter um den Sinn zu kümmern, den sie vermitteln sollen. Ich habe eine gewisse Scheu vor diesem Worte Realität, das nicht eine gewöhnliche definierbare Eigenschaft bezeichnet, sondern die Dinge, auf die es angewendet wird, mit einer Art Heiligenschein umgibt. Ich zweifle, ob irgend jemand von uns auch nur die geringste Ahnung hat, was er unter Realität oder Wirklichkeit oder Existenz zu verstehen hat, außer wenn es sich um sein eigenes Selbst handelt. Dies ist eine kühne Behauptung, doch bitte ich, sie nicht mißzuverstehen. Es ist natürlich durchaus möglich, einen in sich folgerichtigen Gebrauch des Wortes Realität zu machen, indem man eine willkürlich festgesetzte Definition zugrunde legt. Wenn ich selbst z. B. eine Sache real nenne, so wird sich der Sinn, den ich damit verbinde, wahrscheinlich mit der Definition decken, ein Ding sei dann real, wenn es Ziel einer Forschungsrichtung ist, der ich persönlich Wichtigkeit beimesse. Wollte man jedoch nicht mehr als dies verlangen, so würde man die Bedeutung, die dem Worte Realität gewöhnlich beigemessen wird, stark beschneiden. In der Physik können wir eine farblose wissenschaftliche Definition der Realität geben, die frei von jeder gefühlsmäßig mystischen Beimengung ist. Doch ist das alles nicht das Rechte, denn wir wollen ja gerade durch den Ausdruck „Realität“ ein bestimmtes Gefühl hervorrufen. „Wirklichkeit“ ist ein höchst effektvolles Schlußwort für eine Rede. Wir lesen in einem Zeitungsbericht: „und dann fuhr der Redner mit den Worten fort: So sind denn Einigkeit und Freundschaft, nach denen ich zu streben nie aufgehört habe, jetzt endlich Wirklichkeit! (lauter Beifall).“ Der Begriff, den wir hier mit

so viel Mühe zu bestimmen trachten, heißt nicht „Realität“, sondern „Realität (lauter Beifall)“.

Obgleich uns die wissenschaftliche Definition noch nicht zum Ziele führt, wollen wir doch von ihr ausgehen. Vergewärtigen wir uns zunächst folgendes: Das einzige, was mir für diese Untersuchung zur Verfügung steht, ist der Inhalt meines Bewußtseins. Doch können Sie mir einen Teil von dem Inhalte Ihres Bewußtseins mitteilen, so daß derselbe innerhalb meines eigenen Bewußtseins für mich zugänglich wird. Aus allgemein anerkannten Gründen nehme ich mit Sicherheit an, daß Ihr Bewußtsein von gleicher Beschaffenheit ist wie das meine, wenn ich auch nicht gern die Aufgabe übernehmen würde, den Beweis für die Stichhaltigkeit dieser Gründe zu führen. Ich benutze diesen gleichsam entlehnten Teil meines Bewußtseins, „um mich an Ihre Stelle zu versetzen“. Dementsprechend teilt sich der Gegenstand meiner Untersuchung in die Bewußtseinsinhalte vieler Menschen, von denen jeder einem Standpunkt entspricht. Es erhebt sich das Problem, das Sehen von diesen verschiedenen Standpunkten zu vereinigen, und auf diese Weise entsteht die Außenwelt der Physik. Vieles ist nur individuell, obgleich es in jedem Bewußtsein enthalten ist, anderes läßt sich offenbar durch einen Willensakt ändern; aber es gibt einen festen Bestand, den unser Bewußtsein mit jedem andern gemein hat. Diesem gemeinsamen Element gilt unsere Untersuchung. Wir wollen versuchen, es so erschöpfend und genau wie möglich zu beschreiben und herauszufinden, nach welchen Gesetzen es einmal mit dem einen und dann mit dem andern Standpunkt verbunden ist. Es liegt kein Grund vor, warum dieses allen gemeinsame Element seinen eigentlichen Platz eher in dem Bewußtsein eines Menschen als in dem eines andern haben sollte. Es muß also einem neutralen Boden angehören, — einer Außenwelt.

Es ist wahr, daß ich unabhängig von der Verbindung mit anderen bewußten Wesen ganz stark den Eindruck von dem Vorhandensein einer Außenwelt habe; aber getrennt von jeder solchen Verbindung würde ich keinen Grund haben, diesem Eindruck zu trauen. Die meisten unserer gemeinsamen Eindrücke von Substanz, von „weltweiten Augenblicken“ usw. haben sich als Täuschung herausgestellt, warum sollten wir dem Eindruck einer außerhalb des wahrnehmenden Bewußtseins existierenden Welt mehr trauen? Auch die Welt meiner Träume erweckt in mir das gleiche

starke Gefühl eines außerhalb von mir Existierenden. Die Traumwelt ist allerdings weniger vernunftgemäß, doch spricht dieser Einwand eher dafür, daß sie außerhalb von mir existiert, da er ja eine stärkere Trennung von der inneren Fähigkeit der Vernunft bedeutet. Solange wir es nur mit einem einzigen Bewußtsein zu tun haben, ist die Hypothese, daß ein Teil seines Inhaltes auf die Existenz einer Außenwelt zurückzuführen sei, völlig müßig. Alles, was von dieser Außenwelt ausgesagt werden könnte, wäre nur eine Wiederholung dessen, was mit weit größerer Sicherheit von der Welt des Bewußtseins behauptet werden kann. Diese Hypothese erweist sich erst dann als nützlich, wenn sie ein Mittel bildet, die Welten von vieler Leute Bewußtsein, die verschiedene Standpunkte inne haben, zu einer Welt zu vereinigen.

Die Außenwelt der Physik ist somit ein Zusammenklang aller Welten, die sich den verschiedenen Standpunkten bieten. Es besteht ein allgemeines Übereinkommen über die prinzipiellen Regeln, nach denen dieser Zusammenklang erzielt wird. Aussagen über die Außenwelt müssen, wenn sie nicht vieldeutig sind, entweder richtig oder falsch sein. Diese Notwendigkeit ist von manchen Philosophen verneint worden. Es wird häufig gesagt, daß wissenschaftliche Theorien über die Welt weder wahr noch falsch zu sein brauchen, sondern nur zweckmäßig oder unzweckmäßig. Es ist eine beliebte Phrase, daß das Maß für den Wert einer wissenschaftlichen Theorie in ihrer Gedankenökonomie bestehe. Etwas einfach zu sagen, ist sicher besser, als viele Worte zu machen. Man kann auch weit leichter beweisen, daß eine wissenschaftliche Theorie zweckmäßig oder gedankenökonomisch ist, als daß sie wahr ist. Aber wenn wir auch im praktischen Leben unsere Ziele nicht so hoch stecken mögen, so brauchen wir deswegen doch nicht unsere Ideale aufzugeben. Und solange ein Unterschied besteht zwischen einer wahren und einer falschen Theorie, muß unser Streben sein, die falsche auszuschalten. Ich für meinen Teil halte daran fest, daß die stetige Weiterentwicklung der Wissenschaft nicht nur aus Nützlichkeitsgründen einen Fortschritt bedeutet. Es ist ein Vordringen gegen immer reinere Wahrheit. Doch wohlverstanden, die Wahrheit, die wir in der Naturwissenschaft suchen, ist die Wahrheit über eine Außenwelt, die uns als Forschungsobjekt vorliegt, und ist nicht an irgendeine Ansicht über den Zustand dieser

Welt gebunden, ob sie den Heiligenschein der Realität trägt und „lauten Beifall“ verdient oder ob das nicht der Fall ist.

Wenn man den Zusammenklang als harmonisch empfindet und daher annehmen kann, daß die Zusammensetzung korrekt ausgeführt ist, nennt man die Außenwelt und alles, was in ihr in Erscheinung tritt, real, ohne sich viel Gedanken darüber zu machen. Wenn wir (als Wissenschaftler) die Realität und Existenz von irgend etwas in der Außenwelt behaupten, so geben wir dadurch unserer Überzeugung Ausdruck, daß die Regeln des Zusammenpassens korrekt angewendet worden sind, daß es sich um keinen Irrtum bei dem Prozeß der Synthese handelt, oder um eine Halluzination, die nur einem einzigen Bewußtsein angehört, oder um eine unvollkommene Darstellung, die nur gewisse Gesichtspunkte umfaßt, zu anderen aber in Widerspruch steht. Wir weigern uns einfach, die schreckliche Möglichkeit in Betracht zu ziehen, daß die Außenwelt, nach all unserer Mühe ihr beizukommen, aus Mangel an Existenz disqualifiziert werden könnte. Wir haben nämlich keine Ahnung, worin ihre Qualifikation bestehen sollte, oder inwiefern das Ansehen der Welt durch eine solche Bestätigung ihrer Existenz erhöht werden würde. Die Außenwelt ist die Welt, welche in uns die gewöhnliche Erfahrung hervorruft, und keine andere Welt könnte für uns dieselbe Rolle ausfüllen, und wenn sie die Qualifikationsprüfung mit noch so hohen Ehren bestanden hätte.

Diese für den Hausgebrauch der Physik gemachte Definition genügt dem schon erwähnten Prinzip, das jetzt für alle Definitionen in der Physik angenommen ist, nämlich, daß die Definition einer Sache dem Wege entsprechen muß, auf dem sie tatsächlich erkannt wird, und nicht irgendeiner anderweitigen Bedeutung, die wir ihr beilegen zu müssen glauben. Ebenso wie die Materie den Begriff der Substanthaftigkeit abstreifen mußte, so muß auch die Existenz ihres Heiligenscheines entkleidet werden, bevor sie Gegenstand physikalischer Betrachtungen werden kann. Sobald es sich hingegen um die Frage nach der Existenz von etwas handelt, das nicht der Außenwelt der Physik angehört, müssen wir selbstverständlich über die physikalische Definition hinausgehen. Schon die Frage nach der Realität der physikalischen Welt selbst erfordert die Entscheidung von einer höheren Warte aus, als sie uns die Methoden der Physik allein liefern können.

Die Außenwelt der Physik ist als Antwort auf ein bestimmtes Problem der menschlichen Erfahrung gebildet worden. Vom Fachstandpunkt aus betrachtet der Physiker dieses Problem nicht anders als jede andere Frage, auf die er bei seinen Arbeiten zufällig stößt, ebenso wie jemand ein ihn fesselndes Rätsel aufgreift, das er zufällig in einer Zeitung findet. Sein einziges Interesse besteht darin, daß das Problem korrekt gelöst wird. Doch tauchen bei der Lösung eines Problems oft Fragen auf, die mit der Lösung selber nichts zu tun haben. Eine solche Sonderfrage, die sich ganz natürlich bei Untersuchungen über die Außenwelt ergibt, ist die, ob es eine höhere Berechtigung dafür gibt, daß wir gerade um die Lösung des Welträtsels weit hartnäckiger wetteifern, als um die Lösung irgendeines anderen Problems der menschlichen Erfahrung. Nur ist es nicht sehr klar, was für eine Art besonderer Berechtigung der Physiker für sein Forschen in Anspruch nehmen sollte, denn die Abfassung eines derartigen Anspruches gehört nicht zu seinem Beruf. Aber es ist sicher, daß er eine solche höhere Berechtigung zu haben glaubt, die weder in der ästhetischen Vollkommenheit der Lösung noch in den materiellen Vorteilen, die aus seiner Wissenschaft erwachsen, begründet ist. Niemals würde er dulden, daß in dem einmütigen Streben nach Wahrheit der Gegenstand seiner Forschung beiseitegeschoben würde. Doch können wir kaum etwas Bestimmteres darüber aussagen, als daß die Wissenschaft eine Art „Heiligenschein“ für ihre Welt beansprucht.

Wenn wir nun daran gehen, für die Atome und Elektronen der Außenwelt nicht nur die konventionelle Realität der Praxis, sondern die „Realität (lauter Beifall)“ aufzufinden, so müssen wir nicht am Ende, sondern am Anfang der physikalischen Forschung suchen. Am Anfang müssen wir jene höhere Bestätigung finden, welche die Dinge der physikalischen Welt über die Produkte einer willkürlichen Geistesübung heraushebt. Dies schließt eine gewisse Wertung unseres Forschertriebes ein. Wie aber kann man eine solche Wertung begründen? Jedenfalls nicht auf Grund unserer gewöhnlichen Urteilskraft, denn diese kann nur nach dem Grade des Erfolges werten, also danach, ob unser Forschungstrieb uns schließlich zu Dingen führt, die wirklich existieren und ihren Heiligenschein zu Recht tragen. Bei unserem vergeblichen Suchen nach diesem unfaßbaren Heiligenschein jagt uns die Urteilskraft wie ein Weberschiffchen

hin und her durch die Kette der logischen Schlußfolgerungen. Aber einerlei woher, der Geist hat das feste Vertrauen, daß er an gewissen Fragen eine Weihe zu spüren vermag, die sie durch eine unanfechtbare Autorität erhalten haben. Man kann das auf verschiedene Weise ausdrücken: Was uns immer wieder zur Erforschung dieser Fragen treibt, ist ein Teil unseres innersten Wesens; es ist ein in uns liegender Zweck, den wir erfüllen müssen. Haben wir nun dies gemeint, als wir uns von der Realität der Außenwelt in einem höheren Sinne zu vergewissern strebten? Es liegt wohl auf dem Wege dahin, ist aber doch nicht ganz, was wir suchten. Ich zweifle, ob wir das, was unserer Forderung zugrunde liegt, jemals fassen können, ohne die kühnere Hypothese zu machen, daß unser Suchen und alles, was wir dadurch erreichen, Wert besitzt in den Augen eines absoluten Wertbestimmers.

Was auch immer wir als letzte Bestätigung der Realität der Außenwelt anerkennen werden, immer werden wir dann auf der gleichen Basis noch vieles andere zulassen müssen, das ebenfalls außerhalb des Rahmens der Physik liegt. Wir erkennen, daß starke Wurzeln unseres Seins sich in andere Richtungen erstrecken, die weit ab von den Sinneseindrücken führen, und ohne daß lange Ketten logischer Schlußfolgerungen davon ausgehen. Ich lege nicht besonderen Wert darauf, Ausdrücke wie „Existenz“ und „Realität“ zu entlehnen, um diese anderen Gebiete damit zu schmücken, denen das Streben unserer Seele gilt. Ich möchte lieber sagen: Wann immer sich die Frage nach der Realität in ihrer transzendentalen Bedeutung erhebt (sei dies bei Untersuchungen über die physikalische Welt oder bei anderen), führt sie zu einer Einstellung, von der aus wir den Menschen nicht als Bündel von Sinneseindrücken auffassen, sondern als ein Wesen, das sich eines Zweckes und einer Verantwortung bewußt ist, die auf einer höheren Ebene liegen als die Außenwelt.

Von dieser Einstellung aus erkennen wir eine geistige Welt neben der physikalischen Welt. Die Erfahrung — d. h. das Selbst mit seiner Umgebung — umfaßt mehr als den Inhalt der physikalischen Welt, der auf einen Komplex metrischer Symbole beschränkt ist. Wie wir gesehen haben, stellt die physikalische Welt die Antwort auf ein ganz bestimmtes lebenswichtiges Problem dar, auf das wir bei der Prüfung unserer Erfahrung gestoßen sind, und die Lösung

keines anderen Problems ist mit einer derartigen Sorgfalt und Präzision betrieben worden. Es ist kaum wahrscheinlich, daß uns ein ähnlicher Weg zum Verständnis der nicht-sensorischen Komponenten unseres Wesens führen wird. Auch winken hier nicht die gleichen Ziele. Wenn Sie den Unterschied so stark empfinden, daß Ihnen der Ausdruck geistige Welt eine irreführende Analogie zu bedeuten scheint, so will ich diese Bezeichnung gern fallen lassen. Nur das möchte ich anerkannt sehen, daß alle, die in dem Suchen nach Wahrheit vom Bewußtsein ausgehen als dem Sitz einer Selbst-Kennntnis mit Zielen und Verantwortungen, die nicht auf die Ebene des Materiellen beschränkt sind, sich ebenso den harten Tatsachen der Erfahrung gegenübersehen, wie diejenigen, die vom Bewußtsein als einem Hilfsmittel zur Ablesung von Spektroskopen und Mikrometerschrauben ausgehen.

Beispiele aus der Physik. Wenn Sie nicht glauben wollen, daß in der Frage, ob ein Ding existiert oder nicht, etwas Unbestimmtes liegen kann, so lassen Sie uns folgendes Problem betrachten. Wir wollen eine Verteilung von Materie in dem Einsteinschen sphärischen Raume untersuchen, der, wie Sie wissen, „endlich, doch unbegrenzt“ ist. Wir nehmen die Verteilung so an, daß jedem Partikelchen Materie ein genau gleiches bei seinen „Antipoden“ (des sphärischen Raumes) entspricht. (Es läßt sich manches dafür anführen, daß die Materie infolge des Gravitationsgesetzes notwendig so verteilt sein muß, doch ist dies nicht sicher.) Jede Gruppe von Partikeln findet sich also in genau der gleichen Struktur und Anordnung, und sogar mit der genau gleichen Umgebung bei den Antipoden wieder. Die beiden Gruppen werden also durch keine experimentelle Prüfung zu unterscheiden sein. Wenn wir nun eine Reise rund um die sphärische Welt (also immer geradeaus) unternehmen, werden wir zuerst auf eine Gruppe A stoßen, und, nachdem wir halb herumgekommen sind, auf eine genau gleiche Gruppe A' , die sich durch kein Merkmal von der ersten Gruppe unterscheiden läßt; ein weiterer halber Umlauf bringt uns wieder zu einer genau gleichen Gruppe, von der wir aber dieses Mal entscheiden, daß es die ursprüngliche Gruppe A sei. Überlegen wir einmal. Wir sehen als gegeben an, daß wir auf jeden Fall, wenn wir nur weit genug gehen, zu derselben Gruppe zurückkehren. Warum machten

wir nicht den einleuchtenden Schluß, daß dies bereits eintrat, als wir auf die Gruppe A' stießen? Alles war doch genau so, als wenn wir die ursprüngliche Gruppe A erreicht hätten? Wir haben eine Folge von genau den gleichen Erscheinungen angetroffen, und aus irgendeinem willkürlichen Grunde haben wir geschlossen, daß nur jede zweite Folge wirklich die gleiche sei. Es steht nichts im Wege, alle diese Folgen miteinander zu identifizieren, nur würde der Raum dann „elliptisch“ statt „sphärisch“ sein. Was aber ist die wirkliche Wahrheit? Sie dürfen nicht daran denken, daß ich A und A' von vornherein so eingeführt habe, als wären sie nicht dieselbe Gruppe von Partikeln, denn dies würde die Antwort vorwegnehmen. Stellen Sie sich vor, daß Sie tatsächlich auf einer Reise um die Welt dieses Abenteuer bestehen, ohne vorher das geringste darüber gehört zu haben. Dann können Sie die Antwort nicht finden. Können Sie dann überhaupt verstehen, was mit der Frage gemeint ist? Ich nicht. Von ihrer Beantwortung kann jedenfalls nichts anderes abhängen, als die Entscheidung, ob wir für A und A' zwei verschiedene Heiligenscheine vorsehen sollen, oder ob einer genügt.

Die Beschreibungen, die wir von den Erscheinungen der Atomphysik geben, sind von außerordentlicher Lebendigkeit. Wir sehen die Atome mit ihren Schalen von kreisenden Elektronen hierhin und dorthin schießen, zusammenstoßen und zurückprallen. Freie Elektronen lösen sich aus den Schalen, schießen mit hundertfacher Geschwindigkeit hinweg, in scharfer Kurve weichen sie den Atomen aus, ihnen um Haaresbreite entschlüpfend. Säumige werden eingefangen und den Schalen einverleibt; die dabei frei gewordene Energie setzt den Äther in Schwingungen. Röntgenstrahlen treffen auf die Atome und heben die Elektronen auf höhere Bahnen. Wir sehen die Elektronen wieder zurücksinken, manchmal schrittweise, manchmal mit einem großen Sprung; wir sehen sie gefangen in der Sackgasse der Metastabilität, zögernd vor „verbotenen Übergängen“. Hinter allem aber steht das Wirkungsquantum h , mit mathematischer Präzision jede Veränderung regelnd. Dies ist das Bild, das lebhaft zu unserem Verständnis spricht, kein unsubstantielles Phantom, das wie ein Traum entschwindet.

Das Schauspiel ist so faszinierend, daß wir vielleicht ganz vergessen, daß wir früher einmal danach forschten, was

ein Elektron eigentlich sei. Unsere Frage wurde niemals beantwortet. Wir können keinerlei vertrautes Vorstellungsbild um das Elektron weben, es gehört der Liste der Anwärter an. So dürfen wir auch obige Beschreibung atomarer Vorgänge nur cum grano salis verstehen. Zu sagen, daß das Elektron auf eine höhere Bahn gehoben wird, ist eine auf Übereinkommen beruhende Art, gewisse Zustandsänderungen des Atoms zu schildern, die man in Wirklichkeit überhaupt nicht mit mikrokosmisch aufgefaßten Bewegungen im Raume in Verbindung bringen kann. Irgend etwas Unbekanntes tut etwas, doch wissen wir nicht was. Das ist es ungefähr, worauf unsere Theorie hinausläuft, und klingt nicht gerade vielversprechend. Lewis Carroll will (in „Through the Looking-Glass“) etwas Ähnliches ausdrücken, indem er dazu neue Worte bildet*:

Die glittigen Tobs
Drehn und wibbeln in der Walle.

Hier ist dieselbe Suggestion lebhaften Treibens und dieselbe Unbestimmtheit über die Natur des Getriebes. Und trotzdem gelangen wir von einem so wenig versprechenden Anfang schließlich zu einem gewissen Resultat. Wir bringen Ordnung in einen Haufen anscheinend gar nicht miteinander in Beziehung stehender Erscheinungen; wir machen Voraussagen und diese Voraussagen treffen tatsächlich ein. Der Grund — der einzige Grund — dieses Erfolges ist, daß sich unsere Beschreibung nicht auf unbekannte Agenzien beschränkt, die in ein unbekanntes Getriebe eingreifen, sondern daß in diese Beschreibung Zahlen eingehen. Einfach zu betrachten, wie Elektronen innerhalb der Atome ihre Kreise beschreiben, führt zu nichts. Aber wenn wir betrachten, wie in einem Atom acht und in einem anderen Atom sieben Elektronen kreisen, so beginnen wir den Unterschied zwischen Sauerstoff und Stickstoff zu erfassen. Acht glittige Tobs wibbeln in der Sauerstoffwalle; sieben in der Stickstoffwalle. Führt nur einige Zahlen ein und jedes Kauderwelsch wird zur Wissenschaft. Wir können sogar eine Voraussage wagen: Wenn eines dieser „Tobs“ entschlüpft, so kleidet sich der Sauerstoff gewissermaßen in das Gewand des Stickstoffs und muß ihm in manchen Dingen ähnlich

* Im Original:

The slithy toves
Did gyre and gimble in the wabe.

werden. In den Sternen und Sternnebeln kann man solche Wölfe in Schafskleidern finden, die uns ohne diese Kenntnis in Verwirrung gebracht hätten. Unsere wesentliche Unkenntnis der Fundamentalgrößen der Physik käme ganz gut zum Ausdruck, wollten wir sie wirklich in „Kauderwelsch“ beschreiben. Vorausgesetzt, alle Zahlen und somit alle metrischen Attribute blieben unverändert, so würde die Unverständlichkeit des Übrigen nicht das Geringste ausmachen. Aus den Zahlen geht jene Harmonie der Naturgesetze hervor, die zu enthüllen das Ziel jeder Naturwissenschaft ist. Wir erfassen die Weise, aber nicht den Spieler. Die Worte des Trinculo in Shakespeares Sturm könnten sich auf die moderne Physik beziehen: „Es ist die Weise unseres Liedes, vom Bilde des Niemand aufgespielt.“

VERURSACHUNG

In dem alten Konflikt zwischen freiem Willen und Prädestination stand die Physik bisher ganz entschieden auf seiten der Prädestination. Ohne den Geltungsbereich der Naturgesetze besonders zu überschätzen, neigte sie aus Gefühlsgründen der Ansicht zu, was immer im Schoße der Zukunft verborgen sein möge, liege schon in den Konfigurationen der Vergangenheit vorherbestimmt.

Der Schöpfung junger Morgen schrieb
Das Urteil schon vom Tage des Gerichts.

Ich will Ihnen nicht voreilig die fertige Lösung eines Problems aufdrängen, das schon so viel Unruhe in Kirche und Haus gebracht hat. Es geht mir, wie wohl den meisten Leuten; an eine völlige Vorherbestimmung in dem weiten Reiche der Natur, das Leben und Bewußtsein einschließt, kann ich nicht glauben. Und doch gelingt es uns nicht, irgendeine Art Gesetz oder kausale Verknüpfung zu denken, die anders als vollkommen deterministisch wäre. Es widerspricht unserem Empfinden von der Würde des Geistes, ihn als Registrator einer diktierten Folge von Gedanken und Gefühlen aufzufassen; aber ebensowenig ist es mit seiner Würde vereinbar, ihn der Willkür von kausal nicht gebundenen Impulsen zu überlassen. Doch will ich auf diesen Zwiespalt nicht eingehen. Meine Aufgabe ist es, auseinanderzusetzen, was die physikalische Wissenschaft zu der Frage zu sagen hat, soweit diese in ihr Gebiet eingreift. Und sie greift sicherlich ein, da das, was man menschlichen Willen nennt, nicht völlig von den Muskelbewegungen, die er hervorruft, und von der damit verbundenen Beeinflussung der materiellen Welt getrennt sein kann. Auf der wissenschaftlichen Seite ist nun eine neue Situation entstanden. Es ist eine Folge des Hinzukommens der Quantentheorie, daß die Physik nicht länger an ein deterministisches Gesetzeschema gebunden ist. In den letzten Fassungen der theoretischen Physik ist

der Determinismus gänzlich fallen gelassen und es ist zum mindesten sehr zweifelhaft, ob er jemals wieder hervorgeholt werden wird.

Der vorige Absatz ist dem Originalmanuskript meines Edinburger Vortrages entnommen. Zu dieser Zeit war die Haltung der Physik gegenüber dem Determinismus indifferent. Mochte auch ein System streng kausaler Gesetze allen Erscheinungen zugrunde liegen, die praktische Arbeit der Physik suchte zur Zeit nicht danach, sondern verfolgte Ziele, die wichtiger erschienen. Man war sich durchaus bewußt, in den neuen Theorien die kausale Grundlage aus den Augen verloren zu haben; manche beklagten das und hielten eine Wiederherstellung des kausalen Unterbaus für unbedingt geboten.

Als ich das Kapitel ein Jahr später überarbeitete, war die vorher indifferente Haltung gegenüber dem Determinismus teilweise ausgesprochen feindlich geworden, und zwar infolge der Aufstellung des Prinzips der Unbestimmtheit durch Heisenberg (S. 219). Ich hatte nur noch für eine hastige Überprüfung der weitreichenden Folgen dieses Prinzips Zeit und hätte mich überhaupt gescheut, so wenig durchdachte Ideen einzufügen, wenn sie nicht die Vorstellungen noch besser zu begründen schienen, zu denen die früheren Entwicklungen geführt hatten. Die Zukunft ist eine Verknüpfung von kausalen Einflüssen der Vergangenheit mit unvoraussagbaren Elementen — unvoraussagbar nicht nur, weil es praktisch unmöglich ist, die zu einer präzisen Voraussage nötigen Daten zu erlangen, sondern weil keine mit unserer Erfahrung kausal verbundenen Daten existieren. Es wird notwendig sein, einen so bedeutenden Wechsel in der Anschauung eingehender zu begründen. Inzwischen können wir feststellen, daß die physikalische Wissenschaft ihren gefühlsmäßigen Widerstand gegen die Lehre vom freien Willen aufgegeben hat. Wer heute noch an einer deterministischen Theorie der Geistestätigkeit festhält, kann sich nicht mehr auf die Übereinstimmung mit der experimentellen Kenntnis von den Gesetzen der unorganischen Natur berufen, sondern muß seine Theorie durch eigene Untersuchungen über den Geist selber zu stützen suchen.

Verursachung und Pfeil der Zeit. Ursache und Wirkung sind eng verknüpft mit dem Pfeil der Zeit. Die

Ursache muß der Wirkung vorangehen. Auch die Relativität der Zeit hat diese Reihenfolge nicht verwischt. Ein Ereignis Hier-Jetzt kann nur Ereignisse in dem Kegel der absoluten Zukunft verursachen, und kann selbst nur Ereignisse in dem Kegel der absoluten Vergangenheit zur Ursache haben. Niemals kann es zu einem Ereignis des neutralen Keiles in einer kausalen Beziehung stehen, da die hierzu notwendige Beeinflussung sich mit Überlichtgeschwindigkeit fortpflanzen müßte. Es ergibt sich nun die erstaunliche Tatsache, daß diese einfache Vorstellung von Ursache und Wirkung mit einem streng kausalen Schema unvereinbar ist. Wie kann ich ein Ereignis in der absoluten Zukunft hervorrufen, wenn diese Zukunft bereits vor meiner Geburt vorausbestimmt war? Obige Vorstellung von Verursachung setzt implizite voraus, daß irgend etwas in der Welt in dem Augenblicke Hier-Jetzt geboren werden kann, von dem nur ein Einfluß in den Kegel der Zukunft ausgeht, das aber keine Bindung zu dem Kegel der absoluten Vergangenheit hat. Die physikalischen Gesetze erster Art geben nirgends eine solche einseitige Bindung; jede Veränderung in einem vorgegebenen Zustand der Welt schließt stillschweigend Veränderungen ihres vergangenen Zustandes symmetrisch zu Veränderungen ihres zukünftigen Zustandes mit ein. Es gibt somit in der Physik erster Art, die keinen Zeitpfeil kennt, auch keine Unterscheidung zwischen Ursache und Wirkung. Die Ereignisse sind durch eine symmetrische Kausalbeziehung miteinander verknüpft, die unabhängig von der Richtung ist, in der wir sie betrachten.

Die Physik erster Art verlangt ein streng kausales Schema, aber Kausalität ist eine symmetrische Beziehung und etwas anderes als die Einbahnbeziehung von Ursache und Wirkung. Die Physik zweiter Art hinwiederum unterscheidet zwischen Ursache und Wirkung, aber sie beruht nicht auf einem kausalen Schema und ist indifferent dagegen, ob strenge Kausalität herrscht oder nicht.

Der Hebel an einer Signalanlage wird gezogen und das Signal springt vor. Wir können die Verbindung aufzeigen, die zwangsläufig die Stellungen von Hebel und Signal miteinander verknüpft; auch können wir feststellen, daß die Bewegungen nicht synchron erfolgen und die Zeitdifferenz berechnen. Doch ordnen die Gesetze der Mechanik dieser Zeitdifferenz kein absolutes Vorzeichen zu; soweit wir diese allein in Betracht ziehen, ist die Annahme, das Springen des

Signales habe die Bewegung des Hebels verursacht, ebenso berechtigt wie die entgegengesetzte Annahme. Es gibt nun zwei Möglichkeiten festzustellen, welches von beiden Ereignissen die Ursache des anderen ist: Wir können uns auf das Zeugnis des Bahnwärters berufen, der überzeugt ist, er habe die geistige Entscheidung getroffen, den Hebel in Bewegung zu setzen. Doch ist dieses Kriterium nur dann stichhaltig, wenn wir annehmen, daß es sich dabei um eine echte Entscheidung zwischen zwei möglichen Wegen handelte, daß nicht nur eine geistige Registrierung von etwas Vorherbestimmtem stattfand. Oder wir können uns auf ein Gesetz zweiter Art berufen, indem wir feststellen, daß beim Springen des Signales das Zufallselement in der Welt größer war als bei der Bewegung des Hebels. Es ist aber charakteristisch für alle Gesetze zweiter Art, daß sie nichts von strenger Verursachung wissen. Sie befassen sich nicht mit dem, was geschehen muß, sondern mit dem, was wahrscheinlich geschieht. Die Unterscheidung zwischen Ursache und Wirkung hat somit in einem geschlossenen System von Gesetzen erster Art gar keinen Sinn. Um die Unterscheidung überhaupt treffen zu können, müssen wir das Schema dieser Gesetze durchbrechen und Betrachtungen über die Freiheit des Willens oder über Wahrscheinlichkeit anstellen, die gleicherweise diesem Schema fremd sind. Es liegt hier eine gewisse Analogie zu dem Verhalten der zehn verschwindenden Krümmungskoeffizienten vor, die sich nur erkennen ließen, wenn das geschlossene System der Welt durch die Einführung fremder Standardmaße durchbrochen wurde.

Wir wollen übereinkommen, daß im folgenden unter Verursachung oder Kausation* die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung, unter Kausalität die symmetrische Beziehung verstanden werden soll, in der keinerlei Unterschied zwischen Ursache und Wirkung zum Ausdruck gelangt. In der Physik erster Art ist die Kausalität vollkommen an die Stelle der Kausation getreten. Der Idee nach glaubte man die ganze Welt, Vergangenheit und Zukunft, durch Kausalitätsbeziehungen zu einem streng deterministischen Schema verbunden. Bis vor ganz kurzer Zeit war die herrschende Ansicht, daß ein solches deterministisches Schema existieren müsse (das nur durch übernatürliche Einwirkung möglicherweise aufgehoben werden könne). Wir dürfen

* Im Englischen: „causation“ im Gegensatz zu „causality“ (Kausalität).

dies darum die „orthodoxe“ Anschauung nennen. Man wußte natürlich, daß wir die Ordnungsform dieses kausalen Schemas nur teilweise kennen, doch war es das ausgesprochene Ziel der theoretischen Physik, dieses Schema lückenlos aufzuzeigen.

Diese Ersetzung der Kausation durch die Kausalität in der orthodoxen Physik ist in einer Beziehung sehr bedeutsam. Wir dürfen nicht dulden, daß die Kausalität jene intuitive Bestätigung für sich in Anspruch nimmt, die in Wirklichkeit nur der Kausation zukommt. Wir glauben uns im Besitze der intuitiven Erkenntnis, daß dieselbe Ursache jedesmal dieselbe Wirkung hervorrufen muß; doch beanspruchen wir nicht, eine intuitive Erkenntnis zu haben, daß dieselbe Wirkung jedesmal aus derselben Ursache entstanden sein müsse. Aus diesem Grunde kann man nicht sagen, daß die Forderung nach einem strengen auf Kausalitätsbeziehungen beruhenden Determinismus sich auf intuitive Erkenntnis stützt.

Was ist nun die Ursache für einen so glühenden Glauben an die orthodoxe Hypothese, daß die Erscheinungen der Physik letztlich ein vollkommen deterministisches Gesetzschema zur Voraussetzung haben? Meiner Ansicht nach lassen sich zwei Ursachen hierfür aufzeigen:

1. Die bisher entdeckten Fundamentalgesetze der Natur weisen offenbar diesen deterministischen Typus auf und haben durch ihre erfolgreichen Voraussagen zu den größten Triumphen der Physik geführt. Es ist nur natürlich, Vertrauen zu der Richtigkeit eines Vorgehens zu haben, das bereits so große Erfolge gezeitigt hat. In der Tat ist die Einstellung durchaus gesund, den Geltungsbereich physikalischer Voraussagen so lange für unbegrenzt zu halten, als seine Grenzen nicht tatsächlich in Erscheinung getreten sind.

2. Die allgemein angenommenen erkenntnistheoretischen Grundlagen der Physik setzen ein deterministisches Schema dieser Art voraus. Diese Auffassung zu verändern, erfordert einen weit tiefer gehenden Wechsel in unserer Einstellung gegenüber Naturerkenntnis überhaupt, als nur in der Aufgabe einer unhaltbaren Hypothese liegen würde.

Zur Erläuterung dieses zweiten Punktes müssen wir daran erinnern, daß jede Kenntnis von der physikalischen Welt auf logischem Wege aus den Nachrichten abgeleitet ist, die mittels der Nerven unser Gehirn erreichen. Die

übliche Auffassung der Naturerkenntnis setzt also die Gültigkeit eines deterministischen Schemas von Schlußfolgerungen voraus, das vollkommen zu enthüllen das Ideal ist, dem wir Schritt für Schritt zustreben. Wie wir bereits gezeigt haben, ist die Kette unserer logischen Schlußfolgerungen einfach die Umkehrung der Kette physikalischer Kausalitätsbeziehungen, durch welche die Ereignisse der Außenwelt mit diesen Nervennachrichten verknüpft sind. Wenn also das System der Übertragung dieser Nachrichten durch die Außenwelt nicht deterministisch ist, so kann auch nicht das System unserer Schlußfolgerungen ihre Quelle betreffend deterministisch sein, und unsere Wissenschaftslehre beruht auf einem unmöglichen Ideal. In diesem Falle müßte unsere Einstellung zu dem gesamten System unserer Naturerkenntnis eine gründliche Änderung erfahren.

Wir werden diese Gründe ausführlicher betrachten, doch ist es vielleicht zweckmäßig, bereits an dieser Stelle auch unsere Entgegnungen zusammenfassen:

1. In der letzten Zeit hat die Anwendung erwiesenermaßen statistischer Gesetze, die als solche nicht auf kausaler Grundlage beruhen, zu den größten Triumphen physikalischer Voraussagung geführt. Überdies haben sich die großen Fundamentalgesetze, die man bisher als streng kausal determiniert angesehen hatte, bei genauerer Prüfung als statistische Gesetze erwiesen.

2. Mag den atomaren Vorgängen ein kausales Schema zugrunde liegen oder nicht, jedenfalls ist es zur Zeit nicht das praktische Ziel der modernen Atomtheorie, ein solches nachzuweisen und gerade darum ist der Fortschritt so schnell. Es hat sich also die Lage ergeben, daß wir an einer erkenntnistheoretischen Auffassung der Physik festhalten, die nicht mehr dem tatsächlichen Ziel der physikalischen Forschung entspricht.

Voraussagbarkeit von Ereignissen. Lassen Sie uns einen Fall betrachten, der für eine erfolgreiche wissenschaftliche Voraussagung typisch ist. Für den 11. August 1999 ist eine in Cornwall sichtbare Sonnenfinsternis prophezeit, und man nimmt allgemein an, daß diese Sonnenfinsternis durch die gegenwärtige Konstellation von Sonne, Mond und Erde bereits vollkommen vorherbestimmt ist. Es liegt durchaus nicht in meiner Absicht, unnötige Zweifel zu erregen, ob diese Sonnenfinsternis auch wirklich stattfinden wird. Ich

nehme an, es wird der Fall sein, aber lassen Sie uns die Gründe für diese Annahme einmal näher untersuchen. Die Voraussage beruht auf Folgerungen aus dem Gravitationsgesetz, also einem Gesetz, das nichts als eine selbstverständliche Wahrheit ist, wie wir im siebenten Kapitel gezeigt haben. Zwar wird dadurch der Wert der Prophezeiung nicht herabgesetzt, aber es liegt die Vermutung nahe, daß wir gar nicht mehr als so großartige Propheten dastehen werden, sobald es sich um Gesetze handelt, die keine solche selbstverständlichen Wahrheiten sind. Ich könnte getrost die Prophezeiung wagen, daß auch im Jahre 1999 $2 \times 2 = 4$ sein wird, aber das Eintreffen dieser Prophezeiung dürfte kaum irgend jemanden in der Überzeugung bestärken, daß die Welt (oder wenn Sie wollen der menschliche Geist) von deterministischen Gesetzen beherrscht werde. Ich glaube, auch in einer noch so regellos geleiteten Welt sind gewisse Voraussagen möglich, sobald man die selbstverständlichen Wahrheiten nicht ausschließt.

Doch liegen die Dinge nicht ganz so einfach. Das Gravitationsgesetz ist nur vom Standpunkt der makrokosmischen Physik eine selbstverständliche Wahrheit. Es hat den Raum zur Voraussetzung und Messungen mit groben materiellen und optischen Hilfsmitteln. Infolgedessen kann es nicht über die Genauigkeitsgrenze dieser groben Meßinstrumente hinaus verfeinert werden. Das Gravitationsgesetz stellt somit zwar eine selbstverständliche Wahrheit dar, jedoch mit einem möglichen Irrtum, der klein, aber nicht unendlich klein ist. Die klassischen Gesetze gelten im Grenzfall für sehr große Quantenzahlen, und das System von Sonne, Erde und Mond ist ein solches System hoher Quantenzahl (S. 197). Die Voraussagbarkeit von Konfigurationen ist also nicht charakteristisch für Naturerscheinungen im allgemeinen, sondern nur für solche, bei denen es sich um eine große Zahl von Wirkungsquanten handelt, denn in einem solchen Falle haben wir es nicht mit dem Verhalten eines Einzelindividuum, sondern mit dem mittleren Verhalten einer großen Anzahl zu tun.

Das Leben des Menschen ist sprichwörtlich unsicher. Dennoch sind wenig Dinge sicherer als die Zahlungsfähigkeit einer Lebensversicherungsgesellschaft. Man darf sich so fest auf die Gesetzmäßigkeit der Mittelwerte verlassen, daß man es für vorbestimmt halten kann, daß die Hälfte aller jetzt geborenen Kinder ein Alter von x Jahren über-

schreiten werde. Doch können wir daraus niemals ersehen, ob die Lebensspanne des jungen A. B. bereits in das Buch des Schicksals eingetragen ist, oder ob sich sein Leben noch verlängern läßt, indem man ihn lehrt, nicht vor fahrende Autobusse zu laufen. Die Sonnenfinsternis des Jahres 1999 steht so fest wie die Bilanz einer Lebensversicherungsgesellschaft, aber der nächste Quantensprung eines Atoms ist so unsicher wie Ihr Leben und meines.

Wir sind also in der Lage, dem Hauptargument für ein Vorherbestimmtheit der Zukunft entgegenzutreten, nämlich dem Argument: „da die bisher erkannten Naturgesetze einem Typus angehören, der zu ganz bestimmten Aussagen über die Zukunft führt, ist es nur vernünftig, anzunehmen, daß auch alle übrigen, noch nicht aufgezeigten Gesetze der Natur von demselben Typus sein werden“. Hierauf können wir erwidern, daß es die charakteristische Eigenschaft aller Naturerscheinungen ist, die mit Erfolg vorausgesagt worden sind, daß sie Effekte darstellen, die von der mittleren Konfiguration einer ungeheuren Menge von Einzelindividuen abhängen. Durchschnittsergebnisse aber sind voraussagbar, eben weil sie Durchschnitt sind, und darum unabhängig von dem Typus der Gesetze, nach denen die zugrunde liegenden Einzelercheinungen verlaufen.

Betrachten wir ein einziges Atom im Quantenzustand 3, das sich ganz allein auf der Welt befindet. Die klassische Theorie stellte die Frage: „Was wird es im nächsten Augenblick tun?“ und hoffte auch, eine bestimmte Antwort zu finden. Die Quantentheorie läßt für das Atom nur den Übergang zu zwei niedrigeren Quantenzuständen zu und ersetzt somit obige Frage durch die folgende: Welches von zwei möglichen Dingen wird das Atom im nächsten Augenblick tun? Auch macht die Quantentheorie gar nicht den Versuch, hierauf eine bestimmte Antwort zu finden, sondern begnügt sich damit, die Wahrscheinlichkeiten zu berechnen, die den Quantensprüngen 1 bzw. 2 zukommen. Während der klassische Physiker das Atom mit Mechanismen zu füllen suchte, die sein künftiges Verhalten genau regeln, versieht der Quantenphysiker das Atom mit Einrichtungen, die nur die Wahrscheinlichkeit seines künftigen Verhaltens bestimmen. Er widmet sich gewissermaßen der Aufgabe des Buchmachers und nicht der des Trainers.

Nach Auffassung der neuen Quantentheorie ist es in der Struktur der Welt vorbestimmt, daß von 500 Atomen des

Zustandes 3 ungefähr 400 Atome in den Zustand 1 übergehen werden, 100 jedoch in den Zustand 2, — soweit man bei einem Vorgang, der Wahrscheinlichkeitsschwankungen unterliegt, überhaupt von einer Vorbestimmung sprechen kann. Das Wahrscheinlichkeitsverhältnis 4 : 1 findet seinen adäquaten Ausdruck in der Darstellung des Atoms, d. h. irgend etwas, das ein Verhältnis von 4 : 1 symbolisiert, befindet sich in jedem der 500 Atome. Doch unterscheiden sich die Atome der 1. Gruppe durch keinerlei Kennzeichen von denen der 2. Gruppe. Vielleicht neigen die meisten Physiker der Ansicht zu, daß solche Kennzeichen dennoch in der Natur vorhanden sind, wenn sie auch in der Darstellung des Atoms vorläufig nicht zum Ausdruck kommen, daß diese Kennzeichen aber bei fortschreitender Entfaltung der Theorie zutage treten werden. Natürlich ist es dabei nicht notwendig, daß die betreffenden Kennzeichen sich in dem Atom selbst befinden; sie können ebensogut der das Atom beeinflussenden Umgebung angehören. Wir könnten z. B. Würfel in einer Weise beschweren, daß die Wahrscheinlichkeit, eine 6 zu werfen, gleich 4 : 1 wird. Dann wird sowohl bei den Würfeln, die tatsächlich eine 6 ergeben haben, als bei denen, bei welchen dies nicht der Fall war, diese Wahrscheinlichkeit ihrem inneren Aufbau infolge der vorgenommenen Schwerpunktsverlagerung eingeprägt sein. Aber das Ergebnis eines bestimmten Wurfes ist nicht an dem betreffenden Würfel markiert. Nichtsdestoweniger ist dieses Ergebnis streng kausal begründet (abgesehen vielleicht von dem menschlichen Elemente, das beim Werfen des Würfels in Frage kommt), denn es wird durch die hierfür in Betracht kommenden äußeren Einflüsse bestimmt. Unsere eigene Einstellung hierzu ist vorläufig folgende: Es kann sein, daß die zukünftige Entwicklung der Physik solche kausalen Kennzeichen entweder im Atome selbst oder in seiner Umgebung aufzeigen wird, aber ebensogut kann dies auch nicht geschehen. Bisher haben sich jedenfalls alle kausalen Kennzeichen, wann immer wir solche entdeckt zu haben glaubten, als Irrtum erwiesen, und es hat sich gezeigt, daß der scheinbare Determinismus auf andere Weise zustande gekommen war. Darum neigen wir zu der Ansicht, daß solche kausalen Kennzeichen möglicherweise überhaupt nicht existieren.

Aber, wird man sagen, es ist unvorstellbar, daß in einem Atom die Möglichkeiten für den einen oder den andern Weg so haarscharf ausbalanciert sind, daß nirgends in der Welt

in ihrem jetzigen Zustand eine Spur des schließlich entscheidenden Faktors vorhanden ist. Dieser Einwand beruft sich auf das intuitive Gefühl, und so ist es uns ausnahmsweise gestattet, ebenfalls mit der Berufung auf unsere intuitive Erkenntnis zu erwidern. Ich bin im Besitze einer intuitiven Erkenntnis weit unmittelbarer Natur als irgendeine Erkenntnis, die sich auf die Objekte der physikalischen Welt bezieht, und diese Erkenntnis sagt mir, daß nirgends in dem jetzigen Zustand der Welt eine Spur davon aufgezeigt werden kann, ob ich im nächsten Augenblick die rechte Hand heben werde oder die linke. Diese Handlung hängt von einem freien Akt meines Willens ab, der noch nicht getroffen ist, noch bereits seine Schatten vorauswirft. Mein intuitives Gefühl sagt mir, daß die Zukunft entscheidende Faktoren bringen kann, die nicht vorher in der Vergangenheit heimlich verborgen lagen*.

Die Sachlage ist so, daß die Gesetze, denen das Verhalten der mikroskopisch kleinen Elemente der physikalischen Welt unterliegt — der einzelnen Atome, Elektronen und Quanten —, keine bestimmte Voraussage darüber machen, was das Einzelindividuum im nächsten Augenblick tun wird. Ich beziehe mich hier auf die Gesetze, die von der alten und neuen Quantentheorie wirklich aufgezeigt und formuliert worden sind. Diese Gesetze lassen verschiedene Möglichkeiten für die Zukunft zu und bestimmen die Wahrscheinlichkeit für jede. Im allgemeinen werden sich diese Wahrscheinlichkeiten ungefähr die Waage halten und dem ehrgeizigen Propheten wenig Chancen geben, sich hervorzutun. Aber geringe Chancen für eine zutreffende Prophezeiung über das Verhalten des Einzelindividuums können sich bei passend gewählter Statistik zu großen Chancen für eine richtige Prophezeiung über das Verhalten einer größeren Anzahl von Individuen zusammensetzen, und der vorsichtige Prophet kann Voraussagungen dieser Art ohne ernstes Risiko wagen. In der Tat lassen sich alle die erfolgreichen Prophezeiungen, die bisher der Kausalität zugeschrieben wurden, auf diese Quelle zurückführen. Es ist zutreffend, daß die Quantengesetze für das Einzelindividuum keineswegs mit dem Obwalten strenger Kausalität unverein-

* Es ist durchaus zulässig bei der Erwidern eines Argumentes, das sich auf intuitive Erkenntnis stützt, die Stichhaltigkeit intuitiver Erkenntnis anzunehmen; jedoch würde es eine *petitio principii* bedeuten, würden wir uns unabhängig davon auf unsere Intuition berufen.

bar sind, nur kümmern sie sich gar nicht um Kausalität. Wenn wir uns aber diese Indifferenz zunutze machen, um wieder einen strengen Determinismus als Grundlage der Weltstruktur einzuführen, so müssen wir uns darüber klar sein, daß uns nur unsere philosophische Einstellung dazu treibt und nicht die Kenntnis irgendeiner experimentellen Tatsache, die zugunsten des Determinismus spräche.

Wie steht es nun aber mit der Analogie zu der theologischen Lehre von der Prädestination? Was immer gegen diese Lehre gesagt werden mag, jedenfalls schien sie bisher in harmonischer Übereinstimmung mit dem strengen Determinismus in der materiellen Welt zu stehen. Doch wenn wir uns jetzt bei der Klärung dieser Frage auf eine Analogie zu den neuen physikalischen Auffassungen berufen wollten, so würde die Antwort wie folgt lauten: Es ist in dem Schicksal des Einzelindividuums nicht vorherbestimmt, ob es einen bestimmten von zwei Zuständen erreichen wird. Das Einzige, was man vielleicht als vorherbestimmt ansehen könnte, sind die Wahrscheinlichkeiten, die für Erreichung des einen bzw. anderen Zustandes sprechen.

Die neue erkenntnistheoretische Einstellung der Physik. Wissenschaftliche Forschung vermittelt uns keinerlei Kenntnis über das innere Wesen der Dinge. „Wenn wir die Eigenschaften eines Körpers mit Hilfe physikalischer Größen beschreiben, so vermitteln wir eine Kenntnis, die davon handelt, wie die verschiedenen metrischen Indikatoren auf das Vorhandensein des betreffenden Körpers reagieren, und von weiter nichts“ (S. 253). Wenn aber ein Körper sich nicht dem Gesetze der Kausalität entsprechend verhält, und somit ein gewisses Element der Unsicherheit auch in bezug auf die Reaktion metrischer Indikatoren vorhanden ist, so scheint damit dieser Art der Kenntnis aller Boden entzogen zu sein. Es ist dann nicht vorausbestimmt, welchen Betrag eine Waage bei Belastung mit einem bestimmten Körper anzeigen wird, infolgedessen besitzt der Körper keine definierte Masse. Ebensowenig ist vorherbestimmt, wo sich der Körper im nächsten Augenblick befinden wird, also besitzt er keine definierte Geschwindigkeit, auch nicht der Ort, an dem sich die von dem Körper reflektierten Lichtstrahlen im Mikroskop schneiden, daher besitzt er keine definierte Lage usw. Es hat keinen Zweck, zu erwidern, daß der Körper in Wirklichkeit wohl eine definierte Masse, Ge-

schwindigkeit, Lage usw. besitzt und daß wir diese nur nicht kennen. Eine solche Behauptung könnte sich, wenn ihr überhaupt irgendein Sinn zukommt, nur auf das innere Wesen der Dinge beziehen, das außerhalb der Grenzen physikalischer Erkenntnis liegt. Wir können keine dieser Eigenschaften aus irgend etwas, das unserer Beobachtung zugänglich wäre, mit Genauigkeit ableiten, denn der Zusammenbruch der Kausalität hat auch die Kette unserer Schlußfolgerungen zerrissen. Also besitzen wir keine Kenntnis davon, wie die einzelnen Indikatoren auf das Vorhandensein des zu untersuchenden Körpers reagieren und können folglich überhaupt nichts von ihm aussagen. Wozu also erst so viel Worte? Der Körper, den wir als Inbegriff dieser (jetzt unbestimmt gewordenen) Zeigerablesungen ansahen, ist in der physikalischen Welt überflüssig geworden. Dies ist der tote Punkt, zu dem die alte Auffassung der Naturwissenschaft notwendig führt, sobald wir an der Geltung strenger Kausalität zu zweifeln beginnen.

In der makrokosmischen Betrachtungsweise kann diese Schwierigkeit umgangen werden. Wenn auch ein Körper keine bestimmte Lage inne hat, so kann es doch sein, daß seine Lage innerhalb bestimmter Grenzen außerordentlich wahrscheinlich ist. Sobald es sich aber um sehr große Wahrscheinlichkeiten handelt, bedeutet ein Ersetzen von Gewißheit durch Wahrscheinlichkeit keinen großen Unterschied. Es behaftet die Welt nur mit einer ganz geringen Verschwommenheit, die praktisch keine Bedeutung hat. Für die Theorie aber sind die Folgen um so tiefgehender. Alle Wahrscheinlichkeiten beruhen letzten Endes auf einer Wahrscheinlichkeit a priori: ohne Voraussetzung einer solchen Grundlage könnte nichts über die Größe einer Wahrscheinlichkeit ausgesagt werden. Wenn wir nun Wahrscheinlichkeiten, deren Berechnung außerordentlich hohe Werte ergeben hat, der Gewißheit des alten Schemas äquivalent setzen, so fügen wir dadurch auch eine Wahrscheinlichkeit a priori als Baustein der Weltstruktur ein und weben eine Art symbolischer Form hinein, die innerhalb des alten Schemas niemals zum Ausdruck gelangen kann.

Soweit die mikrokosmische Betrachtungsweise in Betracht kommt, halten sich im allgemeinen die Wahrscheinlichkeiten ungefähr die Waage und es gibt nichts, worauf der wissenschaftliche „Pointeur“ mit Sicherheit setzen könnte. Definieren wir einen Körper auch weiterhin als Bündel von

Zeigerablesungen (bzw. von außerordentlich wahrscheinlichen Zeigerablesungen), so kann man bei atomaren Größenordnungen nicht mehr von „Körpern“ in diesem Sinne reden. Alles, was uns bleibt, ist ein Bündel von Wahrscheinlichkeiten. Und in der Tat entspricht dies gerade der Schrödingerschen Darstellungsweise des Atoms als Wellenzentrum seiner Wahrscheinlichkeitsfunktion ψ .

Man hatte es früher gewöhnlich nur mit Wahrscheinlichkeiten zu tun, die aus Mangel an Kenntnis entstanden waren, und man hoffte, durch Erweiterung der Kenntnis jede Bezugnahme auf Wahrscheinlichkeiten ausschalten und durch exakte Tatsachen ersetzen zu können. Jetzt aber stellt es sich als fundamentaler Zug der Schrödingerschen Theorie heraus, daß seine Wahrscheinlichkeiten nicht auf diese Weise ausgeschaltet werden sollen. Ist ψ genügend konzentriert, so bezeichnet es die Stelle, an der sich das Elektron befindet; ist es diffus, so liefert es uns nur eine ungenaue Angabe dieser Stelle. Dabei ist aber diese ungenaue Angabe nicht etwas, das im Idealfall durch genaue Kenntnis ersetzt werden sollte, denn ψ selbst tritt ja als Quelle des vom Atom ausgesandten Lichtes auf, indem die Periode dieses Lichtes gleich der Schwebungsperiode von ψ ist. Dies bedeutet, daß der diffuse Charakter von ψ nicht als Symbol für eine Unsicherheit aufgefaßt werden kann, die auf mangelnder Kenntnis beruht. Er ist vielmehr das Symbol für ein Fehlen der Kausalität — eine Unbestimmtheit des Verhaltens, die für das Atom charakteristisch ist.

Es gibt im wesentlichen zwei Wege, um Aufschluß über das Innere des Atoms zu erlangen. Man kann Eintritt oder Austritt von Elektronen und man kann Eintritt oder Austritt von Licht beobachten. Bohr hat eine Atomstruktur angenommen, die durch ein streng kausales Gesetz mit der ersten Erscheinungsgruppe verbunden ist, während Heisenberg und seine Nachfolger von der zweiten Gruppe von Erscheinungen ausgehen. Wären beide Auffassungen von der Struktur des Atoms miteinander vereinbar, so würde dies zugleich einen streng kausalen Zusammenhang der beiden ihnen zugrunde liegenden Typen von Erscheinungen in sich schließen. Offenbar fehlt aber ein solch kausales Bindeglied, und wir müssen uns infolgedessen mit einer Beziehung zufrieden geben, in der die Größen des einen Atommodelles in bezug auf das andere Modell Wahrscheinlichkeiten bedeuten. Vielleicht stimmen einige Details in den beiden

Theorien nicht ganz mit dieser Auslegung überein, doch scheint die Aufstellung einer solchen Beziehung den idealen Ausdruck darzustellen für die Beschreibung der Gesetze einer nicht vollkommen kausalen Welt, nämlich daß die kausale Quelle der einen Erscheinung zugleich für die andere Erscheinung nur die Wahrscheinlichkeit einer solchen kausalen Quelle bedeutet. Wenigstens scheint die Schrödingersche Theorie entschieden darauf hinzuweisen, daß die leitenden Gesetze der wirklichen Welt nach diesem Plane angelegt sind.

Das Prinzip der Unbestimmtheit. Wir haben bisher gezeigt, wie die moderne Physik das Postulat einer streng vorausbestimmten Zukunft fallengelassen hat, indem sie es einfach unbeachtet läßt, ohne es geradezu zu verwerfen. Mit der Aufstellung des Prinzips der Unbestimmtheit beginnt nun eine ausgesprochene feindliche Einstellung gegenüber dem Determinismus.

Betrachten wir den einfachsten Fall, in dem wir eine Voraussagung der Zukunft für möglich halten. Angenommen, wir haben ein Partikel, dessen gegenwärtige Lage und Geschwindigkeit uns bekannt ist. Nehmen wir weiter an, daß es keiner Störung unterliegt, so können wir seine Stellung für den folgenden Augenblick vorhersagen. (Eigentlich ist bereits die Annahme, daß es keiner Störung unterliegt, ebenfalls eine Voraussagung, doch wollen wir diese Annahme der Einfachheit halber zulassen.) Gerade diese einfache Voraussage verbietet nun das Prinzip der Unbestimmtheit ausdrücklich, denn es sagt aus, daß wir nicht zugleich Lage und Geschwindigkeit eines Partikelchens im gegenwärtigen Moment genau kennen können.

Auf den ersten Blick scheint darin ein innerer Widerspruch zu liegen. Der Genauigkeit unserer Kenntnis der Lage des Partikelchens ist keinerlei Grenze gezogen, vorausgesetzt, daß wir nicht gleichzeitig nach einer genauen Kenntnis seiner Geschwindigkeit streben. Nun wohl; lassen Sie uns in diesem Augenblick eine außerordentlich genaue Bestimmung der Lage vornehmen, und nachdem wir einen kurzen Augenblick gewartet haben, nehmen wir wieder eine solche genaue Bestimmung der Lage vor. Indem wir die beiden genauen Bestimmungen miteinander vergleichen, erhalten wir die genaue Geschwindigkeit des Partikels und schlagen dem Prinzip der Unbestimmtheit ein Schnippchen.

Doch kann uns diese Bestimmung der Geschwindigkeit von keinerlei Nutzen für eine Voraussage der Zukunft sein, denn als wir die zweite genaue Lagebestimmung vornahmen, haben wir das Partikel so grob behandelt, daß es nicht länger die Geschwindigkeit besitzt, die wir so sorgfältig bestimmten. Wir haben eine rein retrospektive Geschwindigkeit berechnet. Diese Geschwindigkeit existiert nicht in der Gegenwart, sondern im Futurum exaktum, sie existiert niemals und wird auch nie existieren, aber es kann eine Zeit kommen, wo sie existiert haben wird. Wir können sie nirgends in Abb. 4 eintragen, die eine absolute Vergangenheit und eine absolute Zukunft enthält, aber keine absolute zweite Zukunft oder Futurum exaktum.

Die Geschwindigkeit, die wir einem Partikelchen jetzt zuschreiben, kann als Antizipation seiner zukünftigen Lage aufgefaßt werden. Wenn wir also sagen, daß sie unerkennbar ist (oder nur mit einem gewissen Grad von Unbestimmtheit erkennbar ist), so drücken wir damit aus, daß wir die Zukunft nicht vorausbestimmen können. In demselben Augenblick, wo die Zukunft erfüllt ist, so daß es sich nicht mehr um eine Antizipation der Zukunft handelt, wird die Geschwindigkeit erkennbar.

Die klassische Auffassung, daß ein Partikelchen notwendig eine wohlbestimmte (wenn auch nicht notwendig erkennbare) Geschwindigkeit im Augenblicke Jetzt haben muß, läuft darauf hinaus, ein Stück der unbekanntes Zukunft für ein unerkennbares Element der Gegenwart auszugeben. Durch diesen Trick schiebt die klassische Physik der Natur fälschlich ein deterministisches Schema unter, indem sie die unbekanntes Zukunft in die Gegenwart einschmuggelt, im Vertrauen darauf, daß wir nicht nachdrücklich untersucht werden, ob dieselbe dadurch auch wirklich erkennbarer geworden ist.

Das gleiche Prinzip findet auf jede Erscheinung Anwendung, die wir vorauszubestimmen suchen, es sei denn, daß das Verlangen nach Exaktheit unter einem Haufen von Mittelwerten erstickt wird. Jeder Koordinate entspricht ein Impuls, und das Prinzip der Unbestimmtheit sagt aus, daß die Bestimmung des Impulses um so ungenauer wird, je genauer wir die Koordinate bestimmen. Auf diese Weise sorgt die Natur dafür, daß die Kenntnis einer Hälfte der Welt zugleich die Unerkennbarkeit der anderen Hälfte verbürgt — die aber, wie wir gesehen haben, nachträglich behoben wird,

sobald wir denselben Teil der Welt rückschauend betrachten. Wir können uns kaum mit einer Darstellung der Welt zufrieden geben, die so viel Unerkennbares enthält. Schon früher haben wir versucht, uns von unerkenntlichen Dingen zu befreien, d. h. von allen den Vorstellungen, die in keinem kausalen Zusammenhang zu unserer Erfahrung stehen. So haben wir die Vorstellung einer Geschwindigkeit gegen den Äther eliminiert, ebenso das „richtige“ räumliche Bezugssystem u. a. m. Nun muß dieses neue unerkenntliche Element gleichfalls aus der Gegenwart entfernt werden. Sein Platz ist in der Zukunft, da es dort nicht länger unerkenntlich ist. Für die Gegenwart bedeutet es den Versuch einer Vorwegnahme von etwas, das nicht vorweggenommen werden kann.

Wenn wir die physikalischen Symbole der Außenwelt daraufhin untersuchen, inwiefern sie sich zu einer Vorausbestimmung der Zukunft eignen, so müssen wir auf der Hut vor einer retrospektiven Betrachtung derselben sein. Es ist leicht, ein guter Prophet zu sein, nachdem das Ereignis bereits stattgefunden hat.

Das Natürliche und das Übernatürliche. Eine recht ernste Folge davon, daß wir die Forderung strenger Kausalität für die Außenwelt fallen gelassen haben, besteht darin, daß wir keine klare Unterscheidungsmöglichkeit mehr zwischen dem Natürlichen und dem Übernatürlichen besitzen. In einem früheren Kapitel habe ich das unsichtbare Agens, das zur Erklärung der Gravitationskraft erfunden worden war, mit einem „Dämon“ verglichen. Und in der Tat, ist denn eine Auffassung der Welt, die solche unsichtbaren Kräfte zuläßt, wissenschaftlicher als die Weltanschauung des Wilden, der alles, was ihm in der Natur geheimnisvoll erscheint, dem Wirken unsichtbarer Dämonen zuschreibt? Die Stellung des Physikers der Newtonschen Schule war jedoch gegen solche Einwände durchaus gesichert. Er konnte nämlich erwidern, daß sein Gravitationsdämon einem strengen Kausalitätsgesetz gemäß handelt und folglich in keiner Weise mit dem verantwortungslosen Dämon des Wilden verglichen werden könne. Sobald wir uns aber vom Kausalgesetz loslösen, fällt diese Verteidigungsmöglichkeit weg. Meiner Ansicht nach wird auch der Wilde einräumen, daß sein Dämon bis zu einem gewissen Grade bestimmte Gewohnheiten zeige, und daß man daher ungefähr voraussehen könne, was er im nächsten Augenblick tun werde.

Doch könne er ebensogut plötzlich seinem eigenen Willen folgen. Es ist gerade dieser Mangel an innerer Konsequenz, der den Dämon des Wilden früher ungeeignet erscheinen ließ, neben seinem Bruder, dem Gravitationsdämon, als physikalische Größe zugelassen zu werden.

Dies ist auch der Grund, warum man so viel Aufhebens um „mich“ gemacht hat, denn auch ich „habe einen eigenen Willen“, oder bin zum mindesten überzeugt davon, einen zu besitzen. Der Physiker muß also entweder sein kausales Schema der Willkür meines übernatürlichen Eingreifens aussetzen, oder er muß meine übernatürlichen Eigenschaften wegerklären. Der Materialist wählte aus Gründen der Selbstverteidigung diesen letzteren Weg. Er entschied sich dafür, daß ich nicht übernatürlich sei, sondern nur kompliziert. Wir hingegen sind zu dem Schlusse gelangt, daß es nirgends ein streng kausales Verhalten gibt. Und so können wir kaum die Beschuldigung von uns weisen, daß wir mit der Abschaffung des Kriteriums der Kausalität den Dämonen des Wilden Tür und Tor geöffnet haben. Es ist ein folgenschwerer Schritt, den wir getan haben, doch brauchen wir darum noch nicht das Ende aller wahren Wissenschaft zu fürchten. Schließlich können wir die Dämonen ja wieder hinauswerfen, wenn sie einzudringen versuchen, ebenso wie es Einstein mit dem sehr achtbaren kausalen Dämon getan hat, der sich Gravitation nannte. Wohl ist es uns jetzt verboten, gewisse Standpunkte als unwissenschaftlichen Aberglauben abzutun, aber es bleibt uns noch erlaubt, sie als ungesunde Wissenschaft zurückzuweisen, falls die Umstände dieses Urteil rechtfertigen.

Der freie Wille. Vom philosophischen Standpunkt aus ist die Untersuchung von hohem Interesse, inwieweit diese veränderte Einstellung der Naturwissenschaft gegenüber der Kausalität unsere Auffassung von der Freiheit des menschlichen Geistes berührt. Es ist unmöglich, einen vollkommenen Determinismus der materiellen Welt von einem Determinismus des Geistes zu trennen. Betrachten wir zum Beispiel eine Wetterprophezeiung auf ein Jahr im voraus. Zwar ist es nicht wahrscheinlich, daß eine solche Vorhersage jemals mit praktischem Erfolg ausführbar sein wird, doch ist der „orthodoxe“ Physiker nicht davon überzeugt, daß sie auch theoretisch unmöglich ist. Er besteht darauf, daß das Wetter vom nächsten Jahre schon jetzt voraus-

bestimmt ist. Wir müßten für eine solche Prophezeiung eine außerordentlich eingehende Kenntnis aller gegenwärtigen Bedingungen besitzen, denn eine ganz geringe lokale Abweichung kann einen lawinenartig anwachsenden Einfluß ausüben. Wir müssen den Zustand der Sonne untersuchen, um die Schwankungen der von ihr ausgesandten Wärme und korpuskularen Strahlung vorhersagen zu können. Wir müssen in die Eingeweide der Erde tauchen, um vulkanische Eruptionen voraussehen zu können, die möglicherweise einen Staubschleier über die Atmosphäre breiten, wie es der Katmai auf Alaska im Jahre 1912 getan hat. Aber auch in die geheimen Falten des menschlichen Geistes müssen wir eindringen. Ein Kohlenstreik, ein großer Krieg können die atmosphärischen Bedingungen direkt verändern. Ein achtlos weggeworfenes Zündholz kann eine Entforstung bewirken, die Regenmenge und andere klimatische Verhältnisse beeinflußt. Wie wir sehen, ist ein vollkommen deterministischer Verlauf der anorganischen Erscheinungen unmöglich, wenn er nicht Hand in Hand geht mit einem Determinismus, der den Geist selber beherrscht. Und umgekehrt, wenn wir Freiheit des Geistes wünschen, so muß diese Befreiung bis zu einem gewissen Grade auch auf die materielle Welt übergreifen. Offenbar steht dieser Befreiung seitens der Physik kein Hindernis mehr entgegen.

Wir wollen das Problem näher untersuchen, wie es möglich ist, daß der Geist die materiellen Atome gleichsam erfaßt, so daß die Bewegungen unseres Körpers und unserer Glieder durch einen Willensakt geleitet werden können. Ich denke, wir können jetzt darüber beruhigt sein, daß es sich um einen echten Willensakt handelt. Die Materialisten meinten, daß die Bewegungen, die durch einen Willensakt hervorgerufen zu sein scheinen, in Wirklichkeit Reflexbewegungen infolge materieller Prozesse innerhalb des Gehirnes sind, so daß der Willensakt zu einer unwesentlichen Nebenerscheinung herabsinkt, die mit den rein physikalischen Erscheinungen parallel läuft. Diese Ansicht setzt aber voraus, daß das Resultat der Anwendung physikalischer Gesetze auf das Gehirn vollkommen determiniert ist. Es hat keinen Sinn, das Verhalten eines bewußten Hirnes dadurch zu erklären, daß man sagt, es sei genau dasselbe wie das eines mechanischen Gehirns, wenn das Verhalten des letzteren ebenfalls undeterminiert gelassen wird. Wenn aber die physikalischen Gesetze nicht streng kausal sind, so ist

alles, was wir hierüber aussagen können, daß das Verhalten des bewußten Gehirnes eines der möglichen Verhalten des mechanischen ist. So ist es in der Tat; und die Entscheidung zwischen diesen möglichen Verhaltensweisen ist das, was wir einen Willensakt nennen.

Nun werden Sie vielleicht fragen: Wenn ein Atom einen bestimmten von mehreren möglichen Quantensprüngen wählt, ist dies ebenfalls ein „Willensakt“? Das wohl kaum. Die Analogie ist doch gar zu gering. Es verhält sich damit so, daß weder für das Gehirn noch für das Atom etwas in der physikalischen Welt, d. h. in der Welt der Zeigerablesungen, existiert, das die Entscheidung vorausbestimmt. Diese Entscheidung ist eine Tatsache der physikalischen Welt, die zwar Folgen für die Zukunft mit sich bringt, mit der Vergangenheit aber keine kausale Verbindung besitzt. Im Falle des Gehirns haben wir einen direkten Einblick in die geistige Welt, die hinter der Welt der Zeigerablesungen liegt, und in dieser Welt stellt sich uns diese physikalische Tatsache der Entscheidung in einem neuen Bilde dar, das wir für die Offenbarung ihrer wahren Natur halten müssen — sofern dem Ausdruck *w a h r e N a t u r* irgendein Sinn zukommen soll. Im Falle des Atoms haben wir keine solche direkte Einsicht in das, was hinter den Zeigerablesungen liegt. Wir glauben, daß sich hinter allen Zeigerablesungen ein Hintergrund hindurchzieht, der somit auch mit dem Hintergrunde unseres Gehirnes zusammenhängt. Doch liegt nicht mehr Anlaß vor, den Hintergrund des spontanen Verhaltens eines Atoms als „Willensakt“ zu bezeichnen, als dazu, den Hintergrund seines kausalen Verhaltens „Vernunft“ zu nennen. Wir müssen uns klar sein, daß wir nicht etwa in den Hintergrund die strenge Kausalität wieder einführen wollen, nachdem wir sie aus der Welt der Zeigerablesungen verbannt haben. In dem einen Falle, wo wir einen gewissen Einblick in diesen Weltengrund tun, nämlich bei unserm eigenen Gehirn, sind wir jedenfalls nicht bereit, auf die Freiheit des Geistes und des Willens zu verzichten. Und ebensowenig wollen wir die Vermutung aufstellen, daß beim Atom Kennzeichen einer Vorherbestimmung, die in den Zeigerablesungen nicht gefunden werden konnten, in dem unbekanntem Urgrunde unentdeckbar existieren. Auf die Frage, ob ich zugeben würde, daß die Ursache der Entscheidung des Atoms irgend etwas mit der Ursache der Entscheidung unseres Gehirns gemeinsam habe, würde ich einfach erwidern: Es gibt

keine solche Ursache. Im Falle des Gehirnes besitze ich eine tiefere Einsicht in diese Entscheidung, und diese Einsicht offenbart sie mir als Willensakt, d. h. als etwas, das außerhalb aller Kausalität liegt.

Eine geistige Entscheidung zwischen den beiden Möglichkeiten, mich nach rechts oder nach links zu wenden, ruft eine von zwei verschiedenen Folgen von Impulsen längs meiner Nerven bis zu den Füßen hervor. In irgendeinem Gehirnzentrum ist das mögliche Verhalten gewisser Atome oder Elemente der physikalischen Welt direkt durch die geistige Entscheidung determiniert—oder, wie man es vielleicht ausdrücken kann, die physikalische Beschreibung dieses Verhaltens stellt die metrisch faßbare Seite der geistigen Entscheidung dar. Es würde eine immerhin mögliche, wenn auch schwierige Hypothese sein, wollte man annehmen, daß ganz wenige Atome (oder vielleicht nur ein einziges Atom) diesen direkten Kontakt mit unserer bewußten Entscheidung haben, und daß diese wenigen Atome als Weiche dienen, um die materielle Welt in die eine oder andere Bahn zu lenken. Aber physikalisch betrachtet ist es unwahrscheinlich, daß jedem Atom im Gehirn seine Aufgabe so präzise zugeteilt ist, daß zugleich mit seinem Verhalten auch alle möglichen Unregelmäßigkeiten im Verhalten der übrigen Atome geregelt werden können. Wenn ich die Vorgänge in meinem eigenen Geist überhaupt richtig verstehe, so gibt es da kein kleinelches Herumexperimentieren mit einzelnen Atomen.

Ich glaube nicht, daß unsere Entscheidungen durch das Verhalten gewisser Schlüsselatome bestimmt sind. Sollten wir ein Atom aus Einsteins Gehirn herausgreifen können und behaupten, wenn dieses eine Atom einen falschen Quantensprung gemacht hätte, so würde es einen entsprechenden Fehler in der Relativitätstheorie ergeben haben? Schon in Anbetracht der physikalischen Einflüsse durch die Temperatur und des Durcheinanders der Atomzusammenstöße ist es unmöglich, etwas Derartiges aufrechtzuerhalten. Offenbar müssen wir dem Geist nicht nur die Macht zugestehen, das Verhalten einzelner individueller Atome zu entscheiden, sondern auch systematisch auf ganze Atomgruppen Einfluß auszuüben, d. h. also willkürlich in die Wahrscheinlichkeiten atomistischen Verhaltens eingreifen zu können. Dies ist immer einer der unsichersten Punkte in der Theorie der Wechselwirkung zwischen Geist und Materie gewesen.

Einwirkung auf statistische Gesetze. Hat der Geist die Macht, statistische Gesetze aufzuheben, die für die nichtorganische Materie gelten? Wird dies verneint, so sind die Möglichkeiten für eine Einwirkung viel zu eng begrenzt, als daß der Geist jene Ergebnisse zustande bringen könnte, die wir als Folgen geistiger Entscheidungen beobachten. Sobald wir aber eine Einwirkung auf statistische Gesetze als möglich zulassen, machen wir einen echten physikalischen Unterschied zwischen unorganischer und organischer (oder jedenfalls zwischen unorganischer und bewußter) Materie. Ich möchte jedoch eine derartige Hypothese lieber vermeiden, wenn es auch notwendig ist, die etwaigen Folgen ehrlich ins Auge zu fassen. Die von der modernen Quantentheorie aufgezeigte Unbestimmtheit bedeutet nur einen kleinen Schritt zur Befreiung unserer Handlungen von deterministischem Zwang. Bildlich gesprochen: Wir haben die Unsicherheit in der Erhaltung oder Zerstörung des menschlichen Lebens erkannt, aber es bleibt noch übrig, eine Unsicherheit herauszufinden, die imstande wäre, die statistischen Berechnungen einer Versicherungsgesellschaft umzustößen. Theoretisch ist es denkbar, daß die eine Unsicherheit die andere bedingt, so wie das Schicksal von Millionen durch die Hand des Mörders von Serajewo entschieden wurde. Doch ist die Hypothese, daß der Geist mit Hilfe von zwei oder drei Schlüsselatomen im Gehirn seine Wirkung ausübt, ein zu verzweifelter Ausweg, und darum lehne ich sie aus den bereits angeführten Gründen ab.

Es ist ein großer Unterschied, ob wir dem Geiste die Möglichkeit zugestehen, darüber zu entscheiden, welchen von zwei wahrscheinlichen Wegen ein nichtorganisches Atom einschlagen soll, oder ob wir annehmen, der Geist könne eine Menge von Atomen solche Konfigurationen bilden lassen, die von den physikalischen Gesetzen zweiter Art als „zu unwahrscheinlich“ verworfen werden. Hier besteht nämlich die Unwahrscheinlichkeit darin, daß eine große Anzahl von einander unabhängiger Elemente einstimmig zusammenwirken müßten, um das verlangte Ergebnis herbeizuführen. Es handelt sich dabei um eine Unwahrscheinlichkeit derselben Art wie bei dem zufälligen Zusammentreffen aller Atome eines Gases in nur einer Hälfte eines Gefäßes. Wir sehen uns daher zu der Annahme gezwungen, daß in dem physikalischen Teil des Gehirnes, der unmittelbar durch eine geistige Entscheidung beeinflußt wird, eine Art gegenseitiger

Abhängigkeit des Verhaltens der einzelnen Atome vorhanden ist, die sich in unorganischer Materie nicht vorfindet.

Ich bin mir wohl bewußt, daß die Annahme dieses Unterschiedes zwischen lebender und toter Materie einen äußerst folgenschweren Schritt bedeutet. Aber ich glaube, daß dadurch die Schwierigkeit, um die es sich bei der Wechselwirkung zwischen Geist und Materie handelt, ein wenig verringert, wenn auch nicht ganz behoben wird. Wenn wir den Aufbau der Materie unverändert lassen und nur eine gewisse Einwirkung auf die Wahrscheinlichkeit ihres nicht determinierten Verhaltens fordern, so bedeutet dies meiner Ansicht nach einen weniger schweren Eingriff in die Naturgesetze, als andere Arten geistiger Einwirkung, die man angenommen hat. (Allerdings beruht diese Ansicht vielleicht nur darauf, daß wir von diesen Wahrscheinlichkeiten nicht genug verstehen, um die ganze Verruchtheit unserer Forderung ermessen zu können.) Wenn sie nicht ihren eigenen Namen Lügen strafen will, so läßt eine Wahrscheinlichkeit Modifizierungen zu, die bei gewöhnlichen physikalischen Größen nicht möglich wären. Niemals kann mit irgendeinem Ereignis oder Verhalten nur eine ganz bestimmte Wahrscheinlichkeit verknüpft sein, vielmehr kann man nur von „einer Wahrscheinlichkeit nach Maßgabe gewisser gegebener Informationen“ sprechen, und die betreffende Wahrscheinlichkeit ändert sich mit dem Umfang dieser Informationen. Ich empfinde es als einen besonders unbefriedigenden Zug der neuen Quantentheorie in ihrem gegenwärtigen Stadium, daß sie sich dieser Tatsache kaum bewußt zu sein scheint und es uns überläßt, die Grundlage an Informationen zu erraten, auf die sich ihre Wahrscheinlichkeitstheoreme beziehen.

Lassen Sie uns das Problem noch von einer anderen Seite beleuchten: Wenn die Einheit des menschlichen Bewußtseins nicht Täuschung ist, so muß es eine entsprechende Einheit in den Relationen des Geist-Stoffes geben, der hinter den Zeigerablesungen liegt. Indem wir unsere Maßzahlen des Relationsgefüges verwenden, wie wir es im elften Kapitel gezeigt haben, bilden wir Materie und Kraftfelder, die den Hauptfeldgesetzen identisch unterliegen. Die so gebildeten Atome eines bewußten Gehirnes werden sich einzeln in keiner Weise von Atomen unterscheiden, deren Hintergrund keine solche Einheit aufweist. Doch scheint es einleuchtend, daß wir bei Betrachtung ihres gemeinsamen Verhaltens auch

diese breitere Grundlage einer einheitlichen Richtung im Geist-Stoff mit in Rechnung ziehen müssen und nicht erwarten können, daß die statistischen Resultate mit denjenigen übereinstimmen, die einem Relationsgefüge beliebigen Ursprungs entsprechen.

Selbst jeder Materialist wird wohl, wenn er ehrlich an das Problem herantritt, zu ähnlichen Schlußfolgerungen gelangen wie wir. Denn er wird in der physikalischen Welt etwas brauchen, das der symbolischen Einheit der Atome entspricht, die mit einem individuellen Bewußtsein verbunden sind, und nur für derartig verbundene Atome existiert. Eine derartige Einheit muß naturgemäß solche physikalischen Voraussagen über den Haufen werfen, die eine ganz dem Zufall überlassene Unabhängigkeit zur Voraussetzung haben. Besagter Materialist hat ja nicht nur die Aufgabe, die mannigfaltigen Vorstellungsbilder und Gedanken des Geistes in materielle Konfigurationen zu übersetzen, sondern er muß auch eine Art physikalischer Parallele für die Einheit des Ego aufzeigen.

WISSENSCHAFT UND MYSTIZISMUS

Eines Tages beschäftigte mich zufällig das Problem der „Erzeugung von Wellen durch den Wind“. Ich nahm eines der grundlegenden Werke über Hydrodynamik zur Hand und las:

Die Gleichungen (12) und (13) setzen uns instand, ein verwandtes, besonders wichtiges Problem in Angriff zu nehmen, nämlich die Erzeugung und Erhaltung von Wellen in einem viskosen Medium durch geeignete, an der Oberfläche angreifende Kräfte.

Wenn die äußeren Kräfte p'_{yy} und p'_{xy} durch Vielfache von $e^{ikx + \alpha t}$ gegeben sind, wo k und α bekannt sind, so bestimmen obige Gleichungen A und C und infolgedessen auch mit Hilfe von (9) den Wert von η . Wir finden also

$$\frac{p'_{yy}}{g\varrho\eta} = \frac{(\alpha^2 + 2\nu k^2\alpha + \sigma^2)A - i(\sigma^2 + 2\nu km\alpha)C}{gk(A - iC)},$$

$$\frac{p'_{xy}}{g\varrho\eta} = \frac{\alpha}{gk} \cdot \frac{2i\nu k^2 A + (\alpha + 2\nu k^2)C}{(A - iC)},$$

wo $\sigma^2 = gk + T'k^3$ ist...

Und so über zwei Seiten weiter. Zum Schluß wird es klar, daß ein Wind von geringerer Stärke als 0,8 km je Stunde die Oberfläche unbewegt lassen wird. Bei einer Windstärke von 1,6 km je Stunde bedeckt sich die Oberfläche mit kleinen Kräuselwellen, die den Kapillarwellen zuzuschreiben sind und sofort aufhören, sobald die störende Ursache fortfällt. Bei einer Windstärke von 3,2 km je Stunde treten die Gravitationswellen in Erscheinung. Zum Schluß bemerkt der Autor bescheiden: „Unsere theoretischen Untersuchungen eröffnen uns eine beträchtliche Einsicht in die Anfangsstadien der Wellenbildung.“

Bei einer anderen Gelegenheit lag mir das gleiche Thema von der „Erzeugung von Wellen durch den Wind“ im Sinn, doch dieses Mal war ich in einer Stimmung, der ein anderes Buch entsprach, und ich las:

Wasser lächeln im Kuß des Windes,
Strahlen leuchtend des Himmels Reichtum wieder.
Aber mit Herrscherhand wehrt Frost dem Tanz der
All der gleitenden Lieblichkeit. [Wellen,
Weiß, in ungebrochnem Glanze breitet er die Fläche,
Ein einziges Leuchten;
Weiter, schimmernder Friede
Unter dem Schleier der Nacht.

Die magischen Worte zaubern die Szene wieder vor unser Auge. Wieder fühlen wir uns nahe der Natur, in ihr verschmelzend, bis wir erfüllt sind von der Heiterkeit tanzender Wellen im Sonnenschein und dem Schauer frostleuchtender Winternächte. Und wir schämen uns keineswegs dieser Empfindungen und rufen nicht etwa: „Welche Schande für einen Mann mit fünf gesunden Sinnen und wissenschaftlicher Bildung, sich auf diese Weise täuschen zu lassen! Nächstes Mal will ich lieber Lambs Hydrodynamik mitnehmen.“ Es ist gut, daß es im Leben solche Augenblicke gibt, das kümmerlich und eng wäre, wenn wir kein Gefühl für jenen Sinn der Welt um uns hätten, der sich nicht in die Maße und Gewichte des Physikers fassen, noch durch die Symbole des Mathematikers beschreiben läßt.

Wohl war es ein Trugbild, und wir können leicht die plumpe Täuschung aufzeigen. Ätherschwingungen mannigfaltiger Wellenlängen wurden unter verschiedenen Winkeln von der gestörten Trennungsfläche zwischen Luft und Wasser reflektiert, trafen unser Auge und erregten durch photoelektrische Wirkung einen Reiz, der sich entlang des Sehnervs zum Gehirn fortpflanzte. Hier setzte der Geist mit seiner Arbeit ein und webte eine Empfindung aus diesem Reiz. Zwar war das gelieferte Material mager genug, aber der Geist entnahm seiner Vorratskammer einen Reichtum an Assoziationen, mit denen er das Skelett bekleidete. Und der Geist besah sein Werk und fand, daß es sehr gut war. Seine kritischen Fähigkeiten waren eingelullt. Wir hatten aufgehört zu analysieren und waren uns nur der Empfindung im ganzen bewußt. Die Lauheit der Luft, der Geruch des Grases, das sanfte Streicheln des Windes vereinten sich mit dem gesehenen Bilde zu einer einzigen die Grenzen unseres „Ich“ auslöschenden Empfindung um uns und in uns. Immer kühnere Gedankenverbindungen

dungen drangen aus der „Vorratskammer“ des Geistes. Vielleicht erinnerten wir uns der Phrase „lächelnde Wasser“. Wellen — Kräuseln — Lächeln — Heiterkeit — die Vorstellungen jagten einander. Ganz unlogischerweise fühlten wir uns glücklich, obgleich kein vernünftiger Mensch sagen kann, was an einem Wellenzug von Ätherschwingungen Beglückendes sein könnte. Ein Gefühl ruhiger Heiterkeit durchdrang den ganzen Eindruck. Die Heiterkeit in uns selbst war in der Natur, in den Wellen, überall. So war es.

Es war eine Illusion. Warum uns dann überhaupt damit beschäftigen? Diese luftigen Gebilde, die der Geist, sobald er nicht streng unter Kontrolle gehalten wird, in die Außenwelt hineinprojiziert, sollten von keinerlei Belang für den sein, der ernsthaft nach Wahrheit sucht. Lassen Sie uns zu der soliden Substanz der Dinge zurückkehren, zu dem materiellen Wasser, das sich unter dem Druck des Windes und der Kraft der Gravitation gemäß den Gesetzen der Hydrodynamik bewegt. Aber diese solide Substanz der Dinge ist ja ebenfalls ein Trugbild! Auch sie ist ein Phantasiegebilde, vom Geist in die Außenwelt projiziert. Wir haben die Substanz aus der einheitlichen Flüssigkeit in das Atom verjagt, aus dem Atom in das Elektron, und da ist sie uns verloren gegangen. Aber wenigstens, wird man sagen, haben wir am Ende unserer Jagd etwas Wirkliches gefunden: Protonen und Elektronen. Oder, wenn die neue Quantentheorie auch diese Bilder als zu konkret verwirft und uns aller zusammenhängenden Vorstellungsbilder überhaupt beraubt, so bleiben uns wenigstens symbolische Koordinaten und Impulse und Hamiltonsche Funktionen, die sich alle gleicherweise dem Zwecke weihen, uns zu versichern, daß $qp - pq = ih/2\pi$ ist.

Ich habe in einem früheren Kapitel zu zeigen versucht, wie wir auf diesem Wege zu einem zyklischen Schema gelangen, das seinem inneren Wesen nach immer nur einen Teilausdruck unserer Umgebung darstellen kann. Es ist nicht die Realität selbst, sondern nur ihr Skelett. „Wirklichkeit“ ist uns in den Bedrängnissen der Jagd verloren gegangen. Und nachdem wir zuerst den Geist als Wirker von Trugbildern ausgeschlossen haben, müssen wir am Ende zu ihm zurückkehren und sagen: „Hier sind Welten, die wir ordnungsgemäß und regelrecht auf einer Basis erbaut haben, die weit sicherer ist als Deine Phantasiegebilde. Aber wir haben nichts, was eine von ihnen zur

Tatsache machen kann. Bitte wähle Du eine aus und webe Deine Bilder hinein. Nur das kann ihr Wirklichkeit verleihen.“ Wir haben die geistigen Phantasiegebilde ausgemerzt, um zu der ihnen zugrunde liegenden Realität zu gelangen, und haben gefunden, daß die Realität des Urgrundes unlösbar mit einer ihm innewohnenden Fähigkeit, eben diese Phantasiegebilde im Geiste zu erwecken, verknüpft ist. Da nun der Geist, der diese Gebilde webt, zugleich der einzige Bürge für Realität ist, kann Realität nur auf dem Grunde von Illusionen gesucht werden. Illusionen verhalten sich zur Realität wie der Rauch zum Feuer. Ich will damit nicht etwa die alte Unwahrheit vorbringen: „Kein Rauch ohne Feuer“. Aber es ist vernünftig, zu fragen, ob nicht in den mystischen Illusionen des Menschen der Widerschein einer darunter liegenden Realität zu finden ist.

Um eine klare Frage zu stellen: „Warum sollte es für uns gut sein, einen derartigen Zustand der Selbsttäuschung zu erleben, wie ich ihn oben beschrieben habe?“ Ich denke, jeder wird zugeben, daß es gut ist, eine Seele zu besitzen, die empfänglich ist für die Einflüsse der Natur, daß es gut ist, diese Empfänglichkeit in uns auszubilden und nicht jederzeit ohne Scheu unsere Umwelt mathematisch physikalisch zu zerpflücken. Und dies ist nicht nur in einem utilitarischen Sinne gut, sondern gut in einem höheren Sinne als notwendig zur Erfüllung des Lebens, das uns gegeben ist. Es ist keine Medizin, die von Zeit zu Zeit zu nehmen ratsam ist, um mit erneuter Kraft zu der legitimen Beschäftigung unseres Geistes, der wissenschaftlichen Forschung, zurückkehren zu können. Ebensogut könnte man die seelische Hingabe an die Natur durch die Behauptung verteidigen, daß sie dem nicht mathematisch gebildeten Verstand wenigstens in schwächerem Maße dasselbe Entzücken an der Außenwelt verschaffte, das weit vollkommener durch eine Kenntnis ihrer Differentialgleichungen gewährt würde. [Damit Sie aber nicht denken, ich wollte mich über die Hydrodynamik lustig machen, lassen Sie mich bei dieser Gelegenheit versichern, daß ich intellektuelle (wissenschaftliche) Verständnisfähigkeit keineswegs niedriger stelle als mystische Empfänglichkeit. Ich kenne Stellen, die in mathematischen Symbolen geschrieben sind und sich in ihrer Erhabenheit durchaus mit den oben angeführten Versen von Rupert Brooke messen können.] Aber ich denke, darin werden Sie sicher mit mir übereinstimmen, daß man un-

möglich zugeben kann, die eine Art der Auffassung lasse sich völlig durch die andere ersetzen. Wie kann man denn nun etwas für gut halten, was auf reiner Selbsttäuschung beruht? Das würde ja alle unsere Begriffe von Ethik über den Haufen werfen. Meiner Meinung nach gibt es hier nur zwei Möglichkeiten: Entweder man hält jedwede Hingabe an den mystischen Kontakt mit der Natur für unheilvoll und ethisch falsch, oder man muß zugeben, daß wir in diesen Stimmungen und Gefühlen etwas von der wahren Beziehung der Welt zu uns selbst erhaschen — eine Beziehung, von der wir keinerlei Andeutung in der wissenschaftlichen Analyse ihres Inhaltes finden. Ich glaube, selbst der glühendste Materialist wird die erste Auffassung nicht vertreten oder zum mindesten nicht ins praktische Leben übertragen. Folglich nehme ich die zweite Auffassung als richtig an, nämlich, daß an der Wurzel all dieser Trugbilder und Illusionen eine Art der Wahrheit liegt.

Lassen Sie uns einen Augenblick innehalten und überlegen, wie weit die Illusion reicht. Handelt es sich um ein Körnchen Realität, das unter einem Berg von Trugbildern vergraben liegt? Dann wäre es unsere Aufgabe, unseren Geist wenigstens von einem Teil der Illusionen zu befreien und zu versuchen, die Wahrheit in reinerer Form zu erkennen. Aber ich kann nicht glauben, daß viel Trügerisches in dem tiefen Eindruck lag, den jene Naturszene auf uns ausgeübt hat. Ich glaube nicht, daß ein vollkommeneres Wesen als wir viel von dem, was wir selber empfinden, als falsch verwerfen würde. Es ist nicht so sehr unsere Empfindung selbst trügerisch, sie wird vielmehr durch unsere nach innen schauende Prüfung mit trügerischen Phantasien umkleidet. Wollte ich versuchen, die wesentliche Wahrheit, die uns die mystische Erfahrung enthüllt, in Worte zu kleiden, so würde ich sagen, daß zwischen unserem Geist und der Welt keine scharfe Trennung besteht. Unsere Gefühle der Heiterkeit oder Melancholie und ebenso unsere tieferen Empfindungen sind nicht in uns allein beschlossen, in ihnen erhaschen wir den Schimmer einer Realität, die über die engen Grenzen unseres Einzelbewußtseins hinausgeht; die Schönheit und Harmonie im Antlitz der Natur sind in der Wurzel eins mit der Heiterkeit, die das Gesicht des Menschen verklärt. Ungefähr derselben Wahrheit suchen wir Ausdruck zu verleihen, wenn wir sagen, daß die physikalischen Größen nur ein Extrakt aus Zeigerable-

sungen sind und daß ihnen eine Natur zugrunde liegt, die eins ist mit unserer eigenen. Doch kleide ich diese Dinge nicht gern in Worte und unterziehe sie nicht gern einer Prüfung von außen. Wir haben gesehen, wie in der physikalischen Welt der Sinn dadurch grob verändert wurde, daß wir die Welt als von außen betrachtet aufgefaßt haben, statt, wie sie wesentlich sein muß, von innen betrachtet. Durch die nach innen gerichtete Untersuchung fördern wir die Wahrheit heraus für eine Betrachtung von außen. Im mystischen Fühlen aber erfassen wir die Wahrheit von innen und sie ist, wie sie sein soll, ein Teil von uns selbst.

Symbolische Erkenntnis und innere Erkenntnis. Wir wollen nun diesen Einwand gegen die introspektive Betrachtungsweise ausführlicher beleuchten. Es gibt zwei Arten von Erkenntnis, die ich als symbolische und als innere Erkenntnis bezeichnen möchte. Ich weiß nicht, inwieweit die Behauptung zutrifft, daß logisches Schließen nur auf symbolische Erkenntnis anwendbar sei, doch sind jedenfalls die üblicheren Formen logischer Schlußweise allein an Hand symbolischer Erkenntnis entwickelt worden. Die innere Erkenntnis entzieht sich jeder Kodifikation und Analyse, oder vielmehr, sobald wir eine Analyse vorzunehmen suchen, geht das Charakteristische der inneren Erkenntnis verloren und wird durch Symbolismus ersetzt.

Als Beispiel wollen wir die Analyse des Humors betrachten. Ich nehme an, daß es möglich ist, das Wesentliche des Humors bis zu einem gewissen Grade zu analysieren und in verschiedene Witzklassen einzuteilen. Es werde uns nun ein angeblicher Witz vorgelegt und wir unterziehen ihn vorerst einer wissenschaftlichen Analyse der Art, wie wir sie bei einem chemischen Salz zweifelhafter Natur vornehmen würden. Nach sorgfältiger Untersuchung stellen wir fest, daß es sich wirklich und wahrhaftig um einen Witz handelt. Logischerweise müßte unsere nächste Handlung nun darin bestehen, daß wir über den Witz lachen. Doch glaube ich mit Sicherheit voraussagen zu können, daß am Ende dieser Prozedur jedem von uns alle Neigung zum Lachen vergangen sein wird. Es geht eben nicht, daß die innere Wirkungsweise eines Witzes ans Tageslicht der Analyse gezerzt wird. Die Klassifizierung betrifft eine symbolische Kenntnis vom Humor, die alles verwahrt, was für einen Witz charakteristisch ist, nur nicht das, was uns zum

Lachen bringt. Das wahre Verständnis muß spontan kommen, nicht durch zergliedernde Prüfung. Und ebenso verhält es sich mit unserem mystischen Empfinden gegenüber der Natur, ja ich wage zu sagen mit unserer mystischen Erkenntnis Gottes. Es gibt Menschen, denen das unmittelbare Gefühl von der Gegenwart des göttlichen Wesens, das die Seele durchdringt, eine weit klarere Erkenntnis bedeutet als alle übrigen Dinge unserer Erfahrung. Sie empfinden das Fehlen dieses Sinnes ebenso als eine Art geistigen Mangel an einem Menschen, wie wir es bei dem völligen Fehlen des Sinnes für Humor tun. Wir können auch diese innere Erfahrung zu analysieren versuchen, so wie wir den Humor analysiert haben, und eine Theologie oder Philosophie begründen, die das in wissenschaftliche Form bringt, was wir durch logische Schlüsse gefunden haben. Aber wir dürfen nicht vergessen, daß solche Theologie symbolische Erkenntnis ist, während die Erfahrung innere Erkenntnis ist. Und ebensowenig wie man das Lachen über einen Witz durch die wissenschaftliche Klarlegung seiner inneren Struktur hervorrufen kann, ebensowenig wird eine Diskussion über die Attribute Gottes (oder eines nicht persönlichen Gottesbegriffs) jenen Widerhall im Innersten der Seele erwecken, der das Wesentliche aller religiösen Erfahrung ist.

Verteidigung des Mystizismus. Wir haben erkannt, daß die Größen der Physik ihrem innersten Wesen nach nur einen Teilausschnitt der Wirklichkeit bilden können. Wie aber sollen wir uns mit dem übrigen auseinandersetzen, das uns mindestens ebenso nahe angeht wie die physikalischen Gegebenheiten? Gefühl, Zweck, Wert sind ebenso Teil unseres Bewußtseins wie die Sinnesempfindungen. Wir folgen den Sinnesempfindungen und finden, daß sie uns zu einer Außenwelt führen, die Gegenstand der naturwissenschaftlichen Betrachtung ist. Wir folgen den anderen Elementen unseres Wesens und finden, daß sie uns führen — nicht in eine Welt des Raumes und der Zeit, aber sicher doch irgendwohin. Wenn Sie jedoch den Standpunkt einnehmen, daß sich die Gesamtheit unseres Bewußtseins in dem Tanz der Moleküle unseres Gehirnes spiegelt, so daß jeder Empfindung eine bestimmte Figur in diesem Tanze entspricht, dann allerdings führen alle Seiten unseres Bewußtseins gleicherweise zur Außenwelt der Physik. Doch nehme ich

an, daß Sie gleich mir diese Ansicht verworfen haben und mit mir übereinstimmen, daß das Bewußtsein als Gesamtheit etwas Größeres ist als jene quasi-metrischen Aspekte desselben, die das physikalische Gehirn bilden sollen. Dann müssen wir uns also mit den Teilen unseres Wesens auseinandersetzen, die sich nicht durch metrische Angaben erfassen und nicht in Raum und Zeit bannen lassen. Wenn ich sage, daß wir uns mit ihnen auseinandersetzen müssen, so verstehe ich darunter nicht etwa eine wissenschaftliche Untersuchung. Unser erster Schritt wird darin bestehen, den naiven Vorstellungen, mit denen unser Geist sie bekleidet, eine allgemeingültige Fassung zu geben, ähnlich wie es mit den naiven Vorstellungen geschehen ist, welche die materielle Welt des täglichen Lebens ausmachen.

Unsere Vorstellung von dem uns vertrauten Tisch hat sich als Illusion erwiesen. Aber wenn uns eine prophetische Stimme vor diesem Trugbild gewarnt hätte und wir infolgedessen jede weitere Forschung als unnütz aufgegeben hätten, so wäre der wissenschaftliche Tisch niemals entdeckt worden. Um zur Realität des Tisches vorzudringen, müssen wir mit Sinnesorganen begabt sein, die allerhand Bilder und Illusionen um ihn weben. Und so scheint es mir, soll sich die Welt dem Menschen voller offenbaren, so muß der erste Schritt darin bestehen, daß er seine Fähigkeit, Bilder und Illusionen zu weben, im Dienste der höheren Kräfte seiner Natur entwickelt, so daß sie uns nicht länger in die Irre führen, sondern uns eine geistige Welt eröffnen — eine Welt, die zweifellos zum Teil aus Phantasiegebilden besteht, aber in der wir nicht weniger leben als in der Welt, die uns unsere Sinne offenbaren und die ebenfalls mit Illusionen durchwebt ist.

Der Mystiker, der diese Verteidigungsrede vor einem Tribunal von Wissenschaftlern hielte, würde sie vielleicht in folgender Weise beenden: „Obgleich die uns vertraute Welt der täglichen Erfahrung einiges an wissenschaftlicher Wahrheit zu wünschen übrig läßt, ist sie gut genug, um in ihr zu leben. Tatsächlich wäre die wissenschaftliche Welt der Zeigerablesungen als Wohnstätte unmöglich. Sie ist eine symbolische Welt und nur einem Symbol kann es in ihr behagen. Ich aber bin kein Symbol. Ich bin aus jener geistigen Aktivität gebildet, die Sie für eine Pflanzstätte von Trugbildern ansehen, und muß sogar die Welt, die mir meine Sinne enthüllen, transformieren, um sie mit meinem eigenen

Wesen in Übereinstimmung zu bringen. Ich bestehe nicht bloß aus Sinnen; auch der übrige Teil meines Wesens muß leben und wachsen; und ich soll Bericht erstatten von jener Umgebung, in welche er hinausdeutet. Die Vorstellung aber, die ich von meiner geistigen Umgebung habe, darf nicht mit Ihrer wissenschaftlichen Welt der Zeigerablesungen verglichen werden. Sie ist eine Alltagswelt, vergleichbar der materiellen Welt unserer gewöhnlichen Erfahrung. Und ich behaupte, daß ihr nicht mehr und nicht weniger Realität zukommt als dieser. Vor allem aber ist sie keine Welt der Analyse, sondern eine Welt, um in ihr zu leben.“

Wenn auch zugestanden wird, daß uns dies aus der Sphäre exakter Erkenntnis hinausführt, und daß es kaum denkbar ist, daß jemals auf diesen Teil unserer Umwelt irgend etwas, das exakter Wissenschaft entspricht, anwendbar sein wird, so bleibt doch der Mystiker unbußfertig. Daraus, daß wir unfähig sind, in exakter Weise über unsere Umgebung Bericht zu erstatten, folgt noch nicht, daß es besser wäre, zu behaupten, wir lebten in einem Vakuum.

Es kann sein, daß das Tribunal zugeben wird, die Verteidigung gegen den ersten Angriff sei gut geführt gewesen, und daß es dann zu gleichgültiger Duldung übergehen wird: „Nun wohl, mach es wie Du willst. Schließlich ist dies eine harmlose Form des Glaubens — anders als die dogmatische Theologie. Du brauchst eine Art geistigen Tummelplatz für jene merkwürdigen Neigungen der Natur des Menschen, die manchmal von ihm Besitz ergreifen. So lauf denn und spiele. Aber behellige nicht ernsthafte Leute, die dafür sorgen müssen, daß die Welt in ihrem Geleise bleibt.“ Die Gefahr droht jetzt nicht mehr vom wissenschaftlichen Materialismus, der bestrebt ist, für die geistigen Kräfte eine natürliche Erklärung zu finden, sondern von jenem weit tödlicheren moralischen Materialismus, der sie verachtet. Nur wenige vertreten mit Überlegung* die philosophische Einstellung, daß die treibenden Kräfte des Fortschritts nur der materiellen Seite unserer Umwelt angehören, doch können auch nur wenige von sich behaupten, daß sie nicht mehr oder weniger unter dem Einfluß dieser Philosophie ständen. Stören wir ja nicht die „praktischen Leute“, die so eifrig Geschichte machen und uns mit immer schnelleren Schritten unserem Schicksal entgegenführen, als Schar von

menschlichen Ameisen die Erde zu verheeren. Wir wollen nur fragen: Ist es denn wahr, daß die wirksamsten Faktoren in der Geschichte die materiellen Kräfte gewesen sind? Nennen Sie sie Gottes oder des Teufels, Fanatismus, Unvernunft, aber unterschätzen Sie nicht die Macht des Mystikers. Der Mystizismus mag als Irrtum bekämpft oder als göttliche Inspiration geglaubt werden, niemals aber darf er Gegenstand gleichgültiger Duldung sein:

Wir lassen die Saiten erklingen,
Wir weben der Träume Band.
Wo Fels und Brandung ringen,
Da gehn wir an einsamem Strand.
Wir sitzen weltentlegen,
Wo bleiches Mondlicht fällt;
Und dennoch, wir bewegen
In Ewigkeit die Welt.

Realität und Mystizismus. Aber eine Verteidigung vor einem Tribunal von Wissenschaftlern braucht noch nicht als Antwort auf die Frage in unserer eigenen Brust zu gelten. Das Wort *Realität* verfolgt uns. Ich habe bereits versucht, mich mit den Fragen auseinanderzusetzen, die sich hinsichtlich seiner Bedeutung erheben. Aber das Problem der Realität bedrängt uns so beharrlich, daß ich auf die Gefahr hin, mich zu wiederholen, es nochmals vom Standpunkt der Religion aus einer Betrachtung unterziehen muß. Ein Kompromiß zwischen Illusion und Realität mag vielleicht für unsere Einstellung gegenüber der physikalischen Umwelt tauglich sein, aber einen derartigen Kompromiß in Fragen der Religion zulassen, hieße mit heiligen Dingen ein leichtfertiges Spiel treiben. Denn der Frage nach Realität kommt in religiösen Dingen eine weit größere Wichtigkeit zu als irgendwo sonst. Niemand regt sich darüber auf, ob dem, was wir unter Humor verstehen, eine Realität zugrunde liegt. Den Künstler, der in seinen Werken Seelisches zum Ausdruck bringen will, kümmert es wenig, ob und inwiefern man behaupten kann, daß es eine Seele gibt. Selbst der Physiker ist nicht wesentlich daran interessiert, ob seine Atome und Elektronen wirklich existieren. Für gewöhnlich behauptet er, daß dies der Fall sei, aber, wie wir gesehen haben, gebraucht er das Wort Existenz als eine Art Fachausdruck und niemand fragt danach, ob es mehr bedeutet

als einen auf Konvention beruhenden Ausdruck. In den meisten Disziplinen (vielleicht sogar mit Einschluß der Philosophie) scheint es zu genügen, daß wir darin übereinstimmen, welchen Dingen wir Realität zuerkennen wollen und welchen nicht, und daß wir hinterher erst herauszufinden suchen, in welchem Sinne wir das Wort gebraucht haben. Und so kommt es, daß die Religion das einzige Gebiet ist, in dem die Frage nach Realität und Existenz als von vitaler Bedeutung empfunden wird.

Wie aber können wir eine Antwort auf diese Frage finden? Als Dr. Johnson merkte, daß er sich in Erörterungen verwickelte über „Bischof Berkeleys geistreiche Sophistik, die Nicht-Existenz der Materie und die Idealität der ganzen Welt zu beweisen“, antwortete er, „indem er seinen Fuß mit aller Kraft gegen einen großen Stein stieß, daß er zurückprallte, — ‚Ich widerlege es so‘“. Zwar ist nicht ganz klar, wofür ihm diese Handlung eine Gewähr bedeutete, doch gab sie ihm offenbar Trost. Und heutzutage fühlt sich der Realwissenschaftler ebenfalls versucht, seine Zuflucht vor diesen Gedankengängen zu etwas zu nehmen, das man mit dem Fuß stoßen kann, obgleich er sich bewußt sein müßte, daß Rutherford von jenem großen Steine kaum etwas übrig gelassen hat, gegen das zu stoßen sich verlohnte.

Es besteht noch immer die Neigung, eine Art magischen Trost in dem Wort „Wirklichkeit“ zu suchen, wie früher vielleicht in jenem gesegneten Worte „Mesopotamien“. Wenn ich aber für die Wirklichkeit Gottes oder der Seele eintreten will, so würde ich sicher weder Johnsons großen Stein, noch die p 's und q 's der Quantentheorie zum Vergleich heranziehen. Das eine ist eine offenkundige Täuschung, das andere aber ein abstrakter Symbolismus. So habe ich kein Recht, dies Wort in Fragen der Religion anzuwenden, um zu deren Verteidigung jenes tröstliche Gefühl zu entlehnen, das wir (wahrscheinlich ebenfalls zu unrecht) mit der Vorstellung von Steinen und Quantenkoordinaten verbinden.

Mein wissenschaftlicher Instinkt warnt mich davor, auf die Frage „Was ist wirklich?“ eine Antwort in einem umfassenderen Sinne zu suchen, als es in der Wissenschaft üblich ist, denn wahrscheinlich wird ein solcher Versuch sein Ende in leeren Worten und hochtönenden Phrasen finden. Wir alle wissen, daß es Gebiete des menschlichen Geistes und der Seele gibt, die außerhalb der Welt der

Physik liegen. In unserer mystischen Empfänglichkeit für die Wunder der Schöpfung um uns, in dem Ausdruck der Kunst; in dem sehnächtigen Verlangen nach Gott, strebt die Seele aufwärts und sucht die Erfüllung von etwas, das tief ihrer Natur eingepflanzt ist. Die Rechtfertigung für dieses Streben liegt in uns selbst, in einem mächtigen Triebe, der zugleich mit unserem Bewußtsein erwacht, in einem inneren Licht, das von einer höheren Macht ausgeht als der unsrigen. Die Wissenschaft kann diese innere Rechtfertigung kaum in Frage stellen, denn auch ihr Streben entspringt einem Trieb, dem unser Geist folgen muß, einem Fragen, das nicht unterdrückt werden kann. Sei es in diesem geistigen Streben der Wissenschaft oder in dem mystischen Verlangen der Seele, das Licht winkt von oben und das Drängen in unserer Brust gibt Antwort. Können wir es nun nicht dabei bewenden lassen? Ist es wirklich nötig, das trostreiche Wort „Wirklichkeit“ heranzuholen und freundschaftlich auszuteilen wie einen Schlag auf die Schulter?

Das Problem der Wirklichkeit der physikalischen Welt ist Teil des umfassenderen Problems der Wirklichkeit aller Erfahrung überhaupt. Man kann die Erfahrung als eine Verbindung des Selbst und seiner Umgebung auffassen, und so gehört es zu unserem Problem, diese zwei mitwirkenden Komponenten gegeneinander abzugrenzen. Leben, Religion, Erkenntnis, Wahrheit sind alle in das Problem mit einbegriffen, denn sie beziehen sich teils auf die Entdeckung des Selbst, teils auf die Entdeckung der Umwelt an Hand der gemachten Erfahrung. Wir alle müssen uns einmal in unserem Leben auf irgendeine Weise mit diesem Problem auseinandersetzen und es ist wesentlich dabei, daß wir, die wir das Problem zu lösen haben, selber Teil des Problems sind. Wenn wir uns nach seinem letzten Ursprung fragen, so finden wir die Antwort in uns selbst, in dem Gefühl eines uns innewohnenden Zweckes, welches uns zwingt, ewig der Lösung nachzujagen. Unsere Bestimmung ist, irgend etwas durch unser Leben zu erfüllen. Es sind geistige Kräfte in uns gelegt, die ihre Erfüllung und ihre Entspannung in der Lösung finden müssen. Es mag anmaßend scheinen, daß wir so darauf dringen, die Wahrheit in die Form unseres eigenen Wesens zu gießen, doch liegt es eher so, daß die Frage nach Wahrheit nur aus dem Wunsch nach Wahrheit entspringen kann, der unserem Wesen eingeboren ist.

In dem Symbolismus der Physik wird ein Regenbogen als ein Band von Ätherschwingungen beschrieben, das aus Wellenlängen des Bereiches von ungefähr 0,000040 cm bis 0,000072 cm in einer bestimmten systematischen Anordnung zusammengesetzt ist. Von einem gewissen Standpunkt aus entstellen wir also die Wahrheit, wenn wir den schimmern- den Farbenbogen bewundern, und sollten uns bemühen, unseren Geist dahin zu bringen, daß wir von einem Regen- bogen denselben Eindruck empfangen, wie von einer Tabelle von Wellenlängen. Doch so spiegelt sich der Regenbogen in einem unpersönlichen Spektroskop; wir aber geben nicht die ganze Wahrheit und nicht die volle Bedeutung unserer Erfahrung wieder — denken wir an den Ausgangs- punkt unserer Betrachtung —, wenn wir die Faktoren ver- nachlässigen, durch die wir selbst uns von einem Spektro- skop unterscheiden. Zwar kann man nicht sagen, daß der Regenbogen, als Teil der Welt, dazu bestimmt ist, den leb- haften Eindruck von Farbe zu vermitteln, aber vielleicht können wir sagen, daß es zur Bestimmung des menschlichen Geistes als Teiles der Welt gehört, ihn so zu empfinden.

Bedeutung und Wert. Wenn wir an die glitzernden Wellen denken, die sich zu einem Lächeln kräuseln, so er- teilen wir dieser Naturszene offenbar eine Bedeutung, die nicht in ihr war. Den physikalischen Elementen des Wassers — den kleinen bewegten elektrischen Ladungen — lag sicher jede Absicht fern, den Eindruck zu erwecken, daß sie glücklich seien. Aber ebenso fern lag ihnen die Absicht, den Eindruck von Substanz oder Farbe oder geometrischer Wellenform zu vermitteln. Wenn überhaupt in diesem Zu- sammenhang von einer Absicht die Rede sein kann, so war es die Absicht, gewissen Differentialgleichungen zu genügen, und auch das nur, weil sie Geschöpfe des Mathematikers sind, der nun einmal eine Vorliebe für Differentialgleichungen hat. Weder die physikalische noch die mystische Bedeu- tung der Szene liegt dort in der Außenwelt, sie ist h i e r, in unserm Geist.

Was wir aus der Welt machen, hängt sicher weitgehend von den Sinnesorganen ab, die wir zufällig besitzen. Wie muß sich die Welt verändert haben, seit der Mensch sich mehr auf seine Augen verläßt als auf seine Nase! Sie sind allein in den Bergen, umhüllt von erhabener Stille. Aber rüsten Sie sich mit einem künstlichen elektrischen Sinnes-

organ aus und ach! der Äther hallt vom Getön des Savoy-
Orchesters wider. Oder mit den Worten des Trinkulo:

Die Insel ist voll Lärm,
Voll Tön' und süßer Lieder, die ergötzen
Und niemand Schaden tun. Mir klimpern manchmal
Viel tausend helle Instrument' ums Ohr,
Und manchmal Stimmen.

Im großen und ganzen sehen wir in der Natur das, wo-
nach wir suchen, oder wonach zu suchen wir ausgerüstet
sind. Natürlich meine ich damit nicht, daß wir die Einzel-
heiten der Szene beliebig anordnen können, aber wir können
durch Verteilung von Licht und Schatten entsprechend
unserer eigenen Wertbetonung Dinge daraus hervortreten
lassen, die im großen und ganzen die Eigenschaften haben,
die unserer Wertung entsprechen. In diesem Sinne bringt
der Wert, den wir der Dauer beimessen, die Welt schein-
barer Substanzhaftigkeit hervor; in diesem Sinne schafft
vielleicht der Gott in unserer Brust den Gott in der Natur.
Doch niemals können wir einen vollständigen Überblick
gewinnen, solange wir unser Bewußtsein von der Welt ab-
sondern, von der es ein Teil ist. Wir können über das, was
ich den „Hintergrund der Zeigerablesungen“ genannt habe,
nur Vermutungen aussprechen, doch scheint zum mindesten
die Annahme vernünftig, daß der Wertgehalt, der der Welt
Licht und Schatten verleiht, wenn er absolut ist, diesem
Hintergrunde angehören muß. So ist er unerkennbar für
physikalische Betrachtungsweise, denn er kommt nicht in
den Zeigerablesungen zum Ausdruck, aber erkennbar für
das Bewußtsein, dessen Wurzeln ebenfalls in jenem Ur-
grunde ruhen. Ich habe nicht den Wunsch, dies zu einer
Theorie auszubauen, es lag mir nur daran, folgenden Ge-
dankengang herauszuschälen: Wir sind beschränkt auf die
Kenntnis der physikalischen Welt und besitzen nur in dem
isolierten Bewußtsein jedes Einzelnen einen Berührungspunkt
mit jenem Urgrunde. So können wir den Gedanken
von der Einheit des Ganzen nicht voll erfassen, der wesent-
lich für eine vollständige Theorie ist. Wahrscheinlich ist
die menschliche Natur in hohem Maße durch natürliche
Zuchtwahl spezialisiert worden, und es läßt sich durchaus
darüber diskutieren, ob die Wertung der Dauer und andere
jetzt scheinbar fundamentale Züge wirklich wesentliche
Grundeigenschaften des Bewußtseins sind oder sich erst

durch Wechselwirkung mit der Außenwelt ausgebildet haben. In diesem Falle würde der Geist den Wertgehalt, den er in die Außenwelt hineinlegt, ursprünglich selber aus dem äußeren Weltstoff empfangen haben. Ein solches Hinüber- und Herüberwechseln von Werten ist, wie ich denke, mit unserer Auffassung nicht unverträglich, daß der Weltstoff, der hinter den Zeigerablesungen liegt, seinem Wesen nach in kontinuierlichem Zusammenhange mit dem Geiste steht.

Betrachten wir die Welt vom praktischen Standpunkt aus, so können wir das, was dem Bewußtsein des normalen Menschen als Wert gilt, zum allgemeinen Wertmaßstab erheben. Aber die offenbare Willkür dieser Wertung läßt das Verlangen nach einem endgültigen und absoluten Wertmaß entstehen. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder es gibt keine absoluten Werte, dann müssen wir die Bestätigung durch den inneren Mahner in unserem Bewußtsein als letzte Instanz ansehen und jedes Suchen nach einer höheren Bestätigung wäre müßig. Oder es gibt absolute Werte, dann können wir nur das optimistische Vertrauen haben, daß die von uns empfundenen Werte ein schwacher Abglanz dessen sind, was dem absoluten Richter als Wert gilt, d. h. daß wir eine gewisse Einsicht in den Geist des Absoluten besitzen, aus dem jenes Streben und jene letzte Bestätigung kommen, deren Berechtigung wir gewöhnlich ununtersucht lassen.

Ich habe mich natürlich bemüht, den Ausblick, den wir in diesen Vorlesungen gewonnen haben, so einheitlich wie möglich zu gestalten, doch sollte es mich nicht wundern, wenn er trotzdem unter der Schärfe kritischer Betrachtung recht unzusammenhängend erscheint. Einheitlichkeit kann nur zugleich mit einem endgültigen Abschluß erreicht werden; und es beunruhigt uns mehr, ob wir unsere Beweisführungen an der richtigen Stelle angesetzt haben, als ob wir so glücklich gewesen sind, sie zum richtigen Ende zu führen. Ich möchte die wesentlichen Punkte, deren Erörterung von einem philosophischen Standpunkt aus mir wichtig schien, wie folgt zusammenfassen:

1. Der symbolische Charakter der physikalischen Größen ist allgemein erkannt worden, und das Schema der Physik hat jetzt eine Formulierung gefunden, in der ohne weiteres deutlich zum Ausdruck kommt, daß es sich um einen Teilausschnitt aus etwas Umfassenderen handelt.

2. Die Forderung strenger Kausalität für die materielle Welt wurde aufgegeben. Es ist eine neue Auffassung von den leitenden Naturgesetzen im Werden begriffen, und es ist nicht möglich, vorauszusagen, welche Form sie schließlich annehmen wird. Doch deutet alles darauf hin, daß die Forderung strenger Kausalität endgültig fallen gelassen wurde. Dies enthebt uns der früher bestehenden Notwendigkeit, entweder anzunehmen, daß der Geist ebenfalls einem deterministischen Gesetz unterworfen ist, oder aber ihm die Fähigkeit zuzuschreiben, das deterministische Gesetz der materiellen Welt willkürlich aufzuheben.

3. Indem wir erkennen, daß die physikalische Welt vollkommen abstrakt ist und abgesehen von ihrer Bindung zum Bewußtsein keinerlei „Tatsächlichkeit“ besitzt, setzen wir das Bewußtsein wieder in eine fundamentale Stellung ein, anstatt es als unwesentliche Komplikation anzusehen, die in einem späten Entwicklungsstadium inmitten der unorganischen Natur dann und wann angetroffen wird.

4. Unser inneres Gefühl, daß wir berechtigt sind, gewissen Empfindungen unseres Bewußtseins eine „reale“ physikalische Welt zuzuordnen, ist anscheinend in keiner wesentlichen Beziehung von dem Gefühl der Berechtigung verschieden, mit dem wir einer anderen Seite unseres Wesens ein geistiges Gebiet zuordnen.

Mit dieser Philosophie soll nicht irgend etwas Neues gesagt sein. Besonders der erste Punkt ist von vielen Autoren hervorgehoben worden, und zweifellos von vielen Naturwissenschaftlern bereits vor den letzten Umwälzungen in der theoretischen Physik persönlich gebilligt worden. Aber es wirft doch ein anderes Licht auf diese Materie, wenn sie durch eingehende Untersuchungen an Hand des geltenden physikalischen Systems von einer rein philosophischen Doktrin, die man intellektuell billigen kann oder nicht, zu einem wesentlichen Teil der modernen wissenschaftlichen Einstellung erhoben wird.

Überzeugung. Sie sind nun mit mir durch 14 Kapitel dem Pfade gefolgt, auf dem die exakte Wissenschaft zur Erkenntnis zu gelangen sucht. Ich habe dabei die philosophischen Betrachtungen dargestellt, wie sie sich aus den anerkannten wissenschaftlichen Schlußfolgerungen von selbst ergaben, und zwar, wie ich hoffe, ohne sie zu theologischen Zwecken zu verdrehen. In diesem Kapitel ist mein

Standpunkt nicht mehr vorwiegend wissenschaftlich gewesen. Ich ging von dem Teil unserer Erfahrung aus, der außerhalb des Bereiches naturwissenschaftlicher Beobachtungen liegt, oder zum mindesten so geartet ist, daß seine wesentliche Bedeutung sich physikalischen Beobachtungsmethoden entzieht. Bei allen mystischen Religionen wurzelt der Glaube in einer inneren Überzeugung von der Bedeutung oder, wie ich es genannt habe, in einem inneren Gefühl der Berechtigung eines Strebens, das unserem Bewußtsein immanent ist. Dies muß betont werden, denn die Berufung auf eine intuitive Überzeugung dieser Art war zu allen Zeiten die Grundlage der Religion, und ich will nicht den Eindruck erwecken, daß wir eine neue und wissenschaftlichere Begründung gefunden hätten. Ich weise die Vorstellung entschieden zurück, als könne der eigentümliche Glaubensinhalt der Religion aus den Gegebenheiten der Physik oder mit Hilfe physikalischer Methoden abgeleitet werden. Von der Voraussetzung ausgehend, daß eine mystische Religion nicht auf naturwissenschaftlicher Erkenntnis, sondern (sei es mit Recht oder mit Unrecht) auf einer als fundamental anerkannten inneren Erfahrung, und somit auf Selbstkenntnis des Bewußtseins beruht, können wir jetzt die verschiedenen Einwände beleuchten, die von seiten der Naturwissenschaft gegen eine solche mystische Überzeugung sich vorbringen lassen, und können auch die Konflikte erörtern, die sich möglicherweise mit denjenigen wissenschaftlichen Anschauungen ergeben, die ihrem Wesen nach ebenfalls auf Tatsachen der inneren Erfahrung durch Selbstkenntnis beruhen.

Es ist notwendig, daß wir das Wesen der Überzeugung, aus der die Religion entspringt, näher untersuchen, um nicht den Anschein zu erwecken, als würden wir einer blinden Verwerfung der Logik als Führer zur Wahrheit das Wort reden. Daß die logischen Schlußfolgerungen hier eine Lücke lassen, müssen wir zugeben, doch kann man das nicht als Ablehnung logischer Schlußfolgerung auslegen. Wir stoßen auf die gleiche Lücke, wenn wir in unseren Schlüssen über die physikalische Welt nur weit genug zurückgehen. Schlußfolgerungen müssen an Gegebenes anknüpfen, und so können die letzten Gegebenheiten uns nur durch einen nicht auf Schlüssen beruhenden Prozeß offenbart werden — durch eine Selbstkenntnis dessen, was in unserem Bewußtsein ist. Um einen Ansatzpunkt für die Methoden der Vernunft zu

finden, müssen wir von irgend etwas Kenntnis haben. Aber auch das genügt nicht, wir müssen auch von der Bedeutung dieser Kenntnis überzeugt sein. Wir sind somit gezwungen, den Anspruch zu erheben, daß die menschliche Natur die Fähigkeit besitzt, sei es aus eigener Kraft oder inspiriert durch eine über ihr stehende Macht, ein gültiges Urteil über diese Bedeutung zu fällen. Ohne diese Annahme können wir nicht einmal zu einer physikalischen Welt gelangen*.

Wir müssen somit die Überzeugung postulieren, daß gewissen Bewußtseinszuständen des inneren Gewährwerdens mindestens die gleiche Bedeutung zukommt, wie denjenigen Bewußtseinszuständen, die wir Sinnesempfindungen nennen. Vielleicht ist es gut, an dieser Stelle darauf hinzuweisen, daß die Zeit infolge ihres zweifachen Zuganges zu unserem Bewußtsein (S. 55) bis zu einem gewissen Grade die Kluft zwischen Sinneseindrücken und diesen anderen Zuständen des Gewährwerdens überbrückt. Unter letzteren ist auch die Erfahrungsbasis zu suchen, auf der jede Religion beruht. Diese innere Überzeugung kann kaum Gegenstand einer Erörterung sein, sie hängt einzig von der Stärke unserer Empfindung des inneren Gewährwerdens ab.

Aber—wird man vielleicht sagen—zugegeben, wir haben eine solche Abteilung des Bewußtseins, könnten wir nicht trotzdem die Natur dessen, was wir zu erfahren glauben, vollkommen mißverstehen? Dieser Einwand scheint mir nicht zuzutreffen. Was unsere Erfahrung von der physikalischen Welt anbelangt, so haben wir allerdings die Bedeutung unserer Empfindungen sehr falsch gedeutet, und es ist das Werk der Wissenschaft gewesen, zu entdecken, daß die Dinge ganz anders sind, als sie scheinen. Doch reißen wir auch nicht unsere Augen aus, weil sie dabei beharren, uns mit phantastischen Farben zu täuschen, anstatt uns einfach die Wahrheit über die einzelnen Wellenlängen zu offenbaren. Wenn Sie es so nennen wollen, so leben wir inmitten einer derartig mißdeuteten Umwelt. Trotzdem hieße es die Wahrheit sehr einseitig auffassen, wollten wir die schimmernden Farben unserer Umgebung für nichts weiter als eine Miß-

* Wir können natürlich ein Problem, das an bestimmte Gegebenheiten anknüpft, auch lösen, ohne von der Bedeutung dieser Gegebenheiten überzeugt zu sein. Darin besteht die „offizielle“ wissenschaftliche Einstellung oder der „Fachstandpunkt“ des Physikers, wie ich früher einmal sagte (S. 281). Aber eine physikalische Welt, die nichts weiter wäre als die Lösung eines zum Zeitvertreib gewählten Problems, ist nicht gemeint.

deutung halten—eine Auffassung, die nur die Umgebung für wichtig hält, den bewußten Geist aber für unwesentlich. In den rein wissenschaftlichen Kapiteln haben wir gezeigt, daß der Geist auf den Verlauf des Weltbaues entscheidend einwirkt. Ohne ihn bliebe nur ein formloses Chaos. Es ist das Ziel der physikalischen Wissenschaft, soweit ihr Geltungsgebiet reicht, die der Welt zugrunde liegende fundamentale Ordnungsform bloßzulegen. Aber ebenso ist es die Aufgabe der Wissenschaft, die Tatsache wenn möglich zu erklären oder aber demütig hinzunehmen, daß aus dieser Welt geistige Wesen erstanden sind, mit der Fähigkeit begabt, diese nackte Grundstruktur in den Reichtum unserer Erfahrung zu wandeln. Es ist keine Mißdeutung, eher eine Großtat des Geistes — vielleicht das Resultat von langen Zeitaltern biologischer Entwicklung —, daß es uns gelungen ist, aus dieser rohen Grundlage die uns vertraute Welt zu formen. Es liegt darin eine Erfüllung des Zweckes der menschlichen Natur. Wenn wir nun gleicherweise die geistige Welt mit einer religiösen Färbung umkleiden, die jenseits alles dessen liegt, was wir in ihren nackten äußeren Eigenschaften begreifen, so dürfen wir vielleicht mit der gleichen inneren Überzeugung behaupten, daß auch dies keine Mißdeutung ist, sondern die Erfüllung von etwas Göttlichem in des Menschen Natur.

Lassen Sie mich nochmals auf die Analogie zwischen der wissenschaftlichen Theologie und einer fiktiven Wissenschaft des Humors zurückgreifen, die ich (nach Rücksprache mit einer klassischen Autorität) „Geloologie“ nennen möchte. Zwar ist eine Analogie niemals ein überzeugender Beweis, doch wird sie uns hier gute Dienste leisten. Betrachten wir einen Schotten, dessen Hang zur Philosophie und vollkommene Unfähigkeit, einen Witz zu verstehen, sprichwörtlich sind. Es ist kein Grund vorhanden, warum er nicht als Geloologe hohe Ehren ernten und zum Beispiel eine äußerst scharfsinnige Untersuchung über den Unterschied zwischen britischem und amerikanischem Humor schreiben sollte. Sein Vergleich zwischen den beiden Witzarten wird sogar in der Erkenntnis, daß er weder die Pointe des einen noch des anderen zu verstehen fähig ist, ganz besonders unparteiisch und gerecht ausfallen. Aber es würde vollkommen nutzlos sein, ihn um seine Ansicht darüber zu befragen, welche Nation mit ihrem Humor den richtigeren Weg verfolgt. Denn für eine solche Entscheidung wäre ein verständnisvolles Einfühlen notwendig; er müßte (um einen

Ausdruck von der anderen Seite meiner Analogie zu gebrauchen) gewissermaßen bekehrt werden. Alles, was uns vom Geloeologen und vom philosophisch eingestellten Theologen an Hilfe oder Kritik kommen kann, ist die Bestätigung, daß „Methode in dem Wahnsinn“ ist. Der Geloeologe wird vielleicht beweisen, daß die heitere Aufnahme einer Tischrede das Resultat guten Essens und guter Zigarren ist, nicht aber das Zeichen eines feinen Verständnisses für Witze. Der Theologe wiederum würde vielleicht dartun, wie die mystische Ekstase der Anachoreten Fieberphantasien eines kranken Körpers und nicht himmlische Offenbarungen sind. Meiner Ansicht nach sollte man keinen von beiden mit einer Untersuchung über die Realität des Sinnes betrauen, dessen Besitz wir für uns in Anspruch nehmen, noch über die Richtung seiner Entwicklung. Das gehört vor das Forum unseres inneren Gefühles für Wert und Unwert, an das wir alle bis zu einem gewissen Grade glauben, obgleich es strittig sein kann, bis zu welchem Grade dieser Glaube gerechtfertigt ist. Ohne dieses innere Gefühl würde — so scheint es — nicht nur die Religion, sondern auch die gesamte physikalische Welt und jedes Vertrauen auf vernunftgemäßes Denken ins Wanken geraten.

Man hat öfters die Frage an mich gestellt, ob es heute nicht wissenschaftliche Argumente gäbe, deren Beweiskraft sich kein vernünftiger Atheist verschließen könne. Es ist ebensowenig möglich, einem Atheisten religiöse Überzeugung einzuwähmern, wie einem Schotten Verständnis für Witze. Die einzige Hoffnung für eine „Bekehrung“ des Schotten bietet das Zusammensein mit lustigen Gefährten, denn dabei geht ihm vielleicht die Erkenntnis auf, daß ihm irgend etwas im Leben entgeht, das zu erreichen wertvoll ist. Wahrscheinlich liegt in verborgenen Winkeln seines feierlichen Gemütes der Samen des Humors versteckt und harret der Erweckung durch einen derartigen Anstoß von außen. Das gleiche Verfahren ließe sich vielleicht auch zur Verbreitung religiöser Überzeugungen empfehlen, zumal es den Vorzug hat, vollkommen orthodox zu sein.

Wir können nicht behaupten, schlüssige Beweise zu liefern. Der Beweis ist das Idol, vor dem sich der reine Mathematiker martert. In der Physik begnügen wir uns im allgemeinen damit, vor dem Altar der Wahrscheinlichkeit zu opfern. Und sogar der reine Mathematiker gestattet sich widerstrebend trotz seiner starren Logik ge-

wisse Vorurteile. Er ist niemals ganz überzeugt, daß sein mathematisches Schema fehlerfrei sei, und die mathematische Logik war ebenso großen Revolutionen unterworfen wie die theoretische Physik. Mit der gleichen Unzulänglichkeit stolpern wir alle einem unerreichbaren Ideale nach. Wir haben in der Wissenschaft bisweilen Überzeugungen von der richtigen Lösung eines Problems, an denen wir unverbrüchlich festzuhalten suchen, ohne sie eigentlich rechtfertigen zu können. Wir lassen uns dabei von einem angeborenen Sinn für die Gemäßheit der Dinge leiten. Und ebenso können in der geistigen Sphäre Überzeugungen in uns entstehen, an denen festzuhalten unsere innerste Natur uns gebietet. Ich habe ein Beispiel einer solchen inneren Überzeugung angeführt, das selten oder nie in Zweifel gezogen worden ist, nämlich, daß die Hingabe an den mystischen Einfluß eines schönen Naturschauspiels richtig und dem menschlichen Geiste gemäß ist, obgleich sie für jenen „Beobachter“, von dem wir in den ersten Kapiteln gesprochen haben, eine unverzeihliche Exzentrizität gewesen wäre. Man spricht oft von der religiösen Überzeugung als von einer Hingabe. Sie kann nicht durch Vernunftgründe jenen aufgezwungen werden, die ihr Gebot nicht in der eigenen Brust empfinden.

Es ist meiner Ansicht nach unvermeidbar, daß diese Überzeugungen immer eine persönliche Auffassung dessen betonen, was wir zu erfassen suchen. Wir müssen die geistige Welt aus Symbolen aufbauen, die wir unserer eigenen Persönlichkeit entnehmen, so wie wir die physikalische Welt aus den metrischen Symbolen des Mathematikers erbauen. Sonst würde sie unerfaßbar bleiben als eine geistige Umgebung, die wir dunkel in Augenblicken der Exaltation fühlen, die uns aber in dem grauen Einerlei des Alltags wieder verloren geht. Um dieses Gefühl stetig in uns zu erhalten, müssen wir imstande sein, uns der Weltseele inmitten unserer Sorgen und Pflichten in jener einfacheren Beziehung von Seele zu Seele zu nähern, in der alle wahre Religion ihren Ausdruck findet.

Mystische Religionen. Wir haben gesehen, daß das zyklische Schema der Physik einen Hintergrund zur Voraussetzung hat, der außerhalb des Bereiches ihrer Forschung liegt. In diesem Hintergrund haben wir zunächst unsere eigene Persönlichkeit zu suchen, dann aber vielleicht auch

eine größere Persönlichkeit. Jedenfalls bildet die Idee eines allgemeinen Geistes oder Logos, wie ich glaube, eine durchaus einleuchtende Schlußfolgerung aus dem gegenwärtigen Stand der theoretischen Physik, zum mindesten aber ist sie mit ihr in harmonischer Übereinstimmung. Trotzdem aber kann wissenschaftliche Forschung bestenfalls nur zur Aufstellung eines farblosen Pantheismus führen. Niemals erteilt die Wissenschaft Antwort auf die Frage, ob der Weltgeist gut oder böse ist, und ihr hinkender Beweis der Existenz Gottes kann ebensogut in einen Beweis der Existenz des Teufels gekehrt werden.

Dies ist meiner Ansicht nach ein weiteres Beispiel für die Begrenztheit physikalischer Bilder, die uns schon früher beschäftigt hat, nämlich, daß darin Gegensätze immer nur durch + und — dargestellt werden. Vergangenheit und Zukunft, Ursache und Wirkung sind auf diese unzulängliche Weise dargestellt. Und es verursacht der Physik viel Kopfzerbrechen, warum Protonen und Elektronen nicht einfach Gegensätze sind, da doch unsere gesamte Vorstellung von elektrischen Ladungen verlangt, daß positive und negative Elektrizität sich wie plus und minus verhalten. Die Richtung des Zeitpfeils konnte nur durch jene merkwürdige Mischung von Teleologie und Statistik bestimmt werden, die wir als den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kennen; oder ausführlicher: Die Richtung des Pfeiles konnte mit Hilfe statistischer Gesetze bestimmt werden, aber seine Bedeutung als leitender Faktor, der die „Welt mit Sinn erfüllt“, konnte nur auf Grund teleologischer Annahmen abgeleitet werden. Wenn aber die Physik nicht einmal bestimmen kann, in welcher Richtung ihre eigene Welt betrachtet werden soll, um wieviel weniger können wir von ihr Führung in ethischen Dingen erhoffen. Wir vertrauen einem inneren Sinn für das Gemäße, wenn wir die physikalische Welt in der Richtung gegen die Zukunft orientieren, und ebenso müssen wir einem inneren Mahner vertrauen, wenn wir die geistige Welt in der Richtung nach dem Guten orientieren.

Wenn auch die Physik ihren Zuständigkeitsbereich beschränkt hat, so daß ein Hintergrund bleibt, den wir nach Belieben mit einer Realität geistiger Art erfüllen können oder sogar sollen, so haben wir trotzdem von ihrer Seite die unnachgiebigste Kritik zu gewärtigen. „Hier“, sagt die Wissenschaft, „ich habe Dir ein Gebiet gelassen, in das ich mich nicht hineinmischen will. Auch will ich annehmen, daß

Du in der Selbstkenntnis des Bewußtseins eine Art direkten Zugang zu diesem Gebiet besitzt, so daß es nicht notwendig ein Gebiet reinen Nichtwissens sein muß. Aber wie willst Du nun vorgehen? Steht Dir irgendein System von Schlußfolgerungen aus mystischen Erfahrungstatsachen zur Verfügung, das dem System vergleichbar wäre, dessen sich die Wissenschaft bei der Entwicklung ihrer Kenntnis von der Außenwelt bedient? Ich bestehe keineswegs darauf, daß Du gerade meine Methode anwendest, die, wie ich anerkenne, für Dich unbrauchbar ist, doch müßtest Du wenigstens irgendeine verfechtbare Methode haben. Es ist durchaus möglich, daß die von Dir angeführte Erfahrungsbasis stichhaltig ist, aber was habe ich für einen Grund, die religiöse Interpretation, die ihr allgemein gegeben wird, für mehr anzusehen als eine romantisch verworrene Schwärmerei?“

Für die Beantwortung dieser Frage bin ich eigentlich nicht zuständig. Ich kann nur ihre Berechtigung anerkennen. Zwar habe ich mir meine Aufgabe bereits dadurch erleichtert, daß ich nur mystische Religionen betrachte — und ich fühle mich auch nicht berufen, andere zu verteidigen —, doch übersteigt es trotzdem meine Kompetenz, eine Antwort zu geben, die irgendwie Anspruch auf Vollständigkeit erheben könnte. Obgleich die Einsicht unseres Bewußtseins die einzige Möglichkeit darstellt, zu einer *i n n e r e n* Kenntnis der hinter den physikalischen Symbolen liegenden Realität zu gelangen, so dürfen wir uns offenbar doch nicht einfach ohne Nachprüfung auf sie verlassen. Die Geschichte lehrt uns, wie religiöser Mystizismus oft zu Übertreibungen geführt hat, die keineswegs gebilligt werden können. Auch nehme ich an, daß übertriebene Sensibilität gegenüber ästhetischen Einflüssen ein Zeichen von einer ungesunden neurotischen Gemütsart sein kann. Bis zu einem gewissen Grade müssen wir pathologische Zustände des Gehirnes in den Momenten scheinbarer innerer Erleuchtung zulassen. Man beginnt schließlich zu fürchten, daß, nachdem wir alle Fehlerquellen aufgezeigt und ausgeschaltet haben, nichts mehr von „uns“ übrigbleiben wird. Aber wir müssen uns ja auch bei Betrachtung der physikalischen Welt letztlich auf unsere Sinne verlassen, obgleich sie uns durch grobe Täuschungen irreführen können. So mag auch in ähnlicher Weise der Zugang des Bewußtseins zur geistigen Welt mit Fallen besetzt sein, doch braucht deswegen ein Fortschreiten auf diesem Wege durchaus nicht unmöglich zu sein.

Besonderes Gewicht muß auf folgende Feststellung gelegt werden: Religion oder Kontakt mit einer geistigen Macht muß, um überhaupt eine allgemeine Bedeutung zu haben, durchaus eine gewöhnliche Angelegenheit des täglichen Lebens sein und sollte infolgedessen in jeder Diskussion als solche behandelt werden. Hoffentlich haben Sie meine Bezugnahme auf den Mystizismus nicht falsch aufgefaßt und geglaubt, ich wolle mich auf irgendwelche abnormale Erfahrungen und Offenbarungen beziehen. Ich kann nicht beurteilen, welche Beweiskraft (wenn überhaupt eine) den ungewöhnlicheren Formen der Erfahrung und inneren Einsicht zugestanden werden muß. Jedenfalls aber wäre die Annahme, mystische Religion beruhe im wesentlichen auf derartigen Ausnahmeerfahrungen, ebenso irrig wie die Ansicht, Einsteins Theorie betreffe nur die Perihelbewegung des Merkur und einige andere ungewöhnliche Beobachtungstatsachen. Handelt es sich aber um eine Angelegenheit des täglichen Lebens, so ist, wie mir scheint, der in Erörterungen religiöser Fragen übliche Ton meistens völlig unangemessen und pedantisch.

Als Physiker wissen wir, daß Farbe nur eine Frage der Wellenlängen von Ätherschwingungen ist, und trotzdem hat diese Erkenntnis das Gefühl nicht zu verdrängen vermocht, daß Augen, die Licht von ungefähr 480 Milliontel Millimeter Wellenlänge widerspiegeln, Gegenstand der Poesie sein können, aber solche, die Wellenlängen um 530 Milliontel Millimeter widerspiegeln, unbesungen bleiben müssen. Wir haben uns noch nicht die Praxis der Laputaner angeeignet, die, „wenn sie z. B. die Schönheit einer Frau oder eines Tieres preisen wollen, sie mit Hilfe von Rhomben, Kreisen, Parallelogrammen, Ellipsen und anderen geometrischen Ausdrücken beschreiben“. Der Materialist, dessen Überzeugung es ist, daß alle Erscheinungen sich aus Elektronen, Quanten und ähnlichen Dingen, deren Verhalten mathematisch beschrieben werden kann, zusammensetzen, müßte somit auch glauben, daß seine Frau durch eine sehr komplizierte Differentialgleichung dargestellt sei. Aber er wird wahrscheinlich taktvoll genug sein, diese Ansicht nicht auf sein häusliches Leben übertragen zu wollen. Wenn wir schon empfinden, daß diese Art, eine gewöhnliche persönliche Verwandtschaftsbeziehung wissenschaftlich zu zergliedern, dem Wesen dieser Beziehung nicht gemäß ist, um wieviel mehr ist dann diese Zergliederung unangebracht bei der persönlichsten

aller Beziehungen — der zwischen der menschlichen Seele und dem göttlichen Geist.

Wir sind ängstlich bemüht, nur vollkommene Wahrheit anzuerkennen, aber es ist schwer zu sagen, in welcher Form vollkommene Wahrheit gefunden werden soll. Ich kann es nicht recht glauben, daß dies in Form eines Inventars geschehen sollte. Wenn sie wirklich vollkommen ist, so müßte auch irgendwie das in ihr seinen Ausdruck finden, was wir als „Sinn für das Gemäße“ erachten. Der Physiker ist sich keines Verrates an der Wahrheit bewußt, wenn sein „Sinn für das Gemäße“ ihn veranlaßt, ein Brett als zusammenhängenden Stoff anzusehen, obgleich er wohl weiß, daß es „in Wirklichkeit“ leerer Raum ist, der spärlich verstreute elektrische Ladungen enthält. Ebenso mögen uns die tiefsten philosophischen Untersuchungen über die Natur der Gottheit eine Auffassung vermitteln, die in keiner Weise dem täglichen Leben gemäß ist, so daß wir uns lieber an die Auffassung halten, die uns vor fast 2000 Jahren offenbart wurde.

Ich stehe auf der Türschwelle, im Begriffe, ein Zimmer zu betreten. Das ist ein kompliziertes Unternehmen. Erstens muß ich gegen die Atmosphäre ankämpfen, die mit einer Kraft von 1 Kilogramm auf jedes Quadratcentimeter meines Körpers drückt. Ferner muß ich auf einem Brett zu landen versuchen, das mit einer Geschwindigkeit von 30 Kilometer in der Sekunde um die Sonne fliegt; nur den Bruchteil einer Sekunde Verspätung, und das Brett ist bereits meilenweit entfernt. Und dieses Kunststück muß fertiggebracht werden, während ich an einem kugelförmigen Planeten hänge, mit dem Kopf nach außen in den Raum hinein, und ein Ätherwind von Gott weiß welcher Geschwindigkeit durch alle Poren meines Körpers bläst. Auch hat das Brett keine feste Substanz. Darauftreten heißt auf einen Fliegenschwarm treten. Werde ich nicht hindurchfallen? Nein, denn wenn ich es wage und darauftrete, so trifft mich eine der Fliegen und gibt mir einen Stoß nach oben, ich falle wieder und werde von einer anderen Fliege nach oben geworfen, und so geht es fort. Ich darf also hoffen, das Gesamtergebnis werde sein, daß ich dauernd ungefähr auf gleicher Höhe bleibe. Sollte ich aber unglücklicherweise trotzdem durch den Fußboden hindurchfallen oder so heftig emporgestoßen werden, daß ich bis zur Decke fliege, so würde dieser Unfall keine Verletzung der Naturgesetze, sondern nur ein außerordentlich unwahrscheinliches Zusammentreffen von Zufällen sein.

Aber dies sind nur einige von den geringeren Schwierigkeiten, die mich erwarten. Eigentlich müßte ich das Problem vierdimensional betrachten, denn es betrifft den Schnittpunkt meiner Weltlinie mit der des Brettes. Ferner würde es notwendig sein, zu bestimmen, in welcher Richtung die Entropie der Welt zunimmt, um sicherzustellen, daß mein Überschreiten der Schwelle einen Eintritt und kein Hinausgehen bedeutet.

Wahrlich, es ist leichter, daß ein Kamel durch ein Nadelöhr gehe, denn daß ein Physiker eine Türschwelle überschreite. Handle es sich um ein Scheunentor oder eine Kirchentüre, vielleicht wäre es weiser, er fände sich damit ab, nur ein gewöhnlicher Mensch zu sein, und ginge einfach hindurch, anstatt zu warten, bis alle Schwierigkeiten sich gelöst haben, die mit einem wissenschaftlich einwandfreien Eintritt verbunden sind.

SCHLUSSWORT

Eine Flut von Empörung hat sich in der Brust des Tatsachen-Wissenschaftlers aufgehäuft, und ist im Begriff, gegen uns losgelassen zu werden. So lassen Sie uns nochmals unsere Verteidigungsmöglichkeiten abschätzen.

Die am schwersten wiegende Beschuldigung wird wohl sein, daß ich etwas geredet habe, von dem ich im Grunde genau wissen müßte, daß es nichts als eine harmlose Art von Unsinn sei. Ich kann Ihnen versichern, der wissenschaftliche Teil in mir hat während der letzten Kapitel oft genug diese Kritik vorbringen wollen. Doch soll damit nicht gesagt sein, daß ich nur halb überzeugt bin. Ich konnte nur ein gewisses Heimweh nach den geordneten Pfaden der Physik nicht unterdrücken, wo mehr oder weniger deutliche Wegweiser einen vor den ärgsten und törichtsten Abwegen bewahren. Aber wie oft ich mich auch versucht gefühlt habe, diesen Teil meiner Untersuchungen wegzulassen und mich auf meinen eigentlichen Beruf, das Jonglieren mit Zeigerablesungen, zu beschränken, ich kann in der Hauptsache nicht von den Prinzipien loskommen, die ich dort vertreten habe. Ausgehend vom Äther, von Elektronen und anderem physikalischen Rüstzeug werden wir niemals zum bewußten Menschen vordringen und darüber Rechenschaft ablegen können, was sein Bewußtsein erfaßt. Vielleicht gelangen wir zu einer menschlichen Maschine, die durch Reflexe auf ihre Umgebung reagiert, niemals aber kommen wir dem mit Vernunft begabten Menschen nahe, der sich moralisch verantwortlich fühlt, die Wahrheit zu suchen, sei es die Wahrheit über den Äther, über Elektronen oder über Religion. Vielleicht schein ich gar zu schweres Geschütz aufzufahren, wenn ich die letzten Feinheiten der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik heraufbeschwöre, um Ihnen dann diese Weisheit zu erzählen. Aber so liegt es doch nicht ganz. Wir sind den Gedankengängen dieser Theorien gefolgt, weil sie die Grundanschauungen der modernen

Naturwissenschaft enthalten. Es handelte sich dabei nicht darum, den Glauben zu verfechten, daß die Naturwissenschaft letztlich mit einer idealistischen Weltauffassung vereinbar sein muß, sondern darum, zu untersuchen, wie sich die moderne Naturwissenschaft in Wirklichkeit dazu verhält. Gern würde ich die ausführlichen Beweisführungen der letzten Kapitel opfern (die vielleicht sowieso durch dialektische Unzulänglichkeiten entstellt sind), wenn ich Ihnen auf andere Weise die Bedeutung der großen Wandlungen klarmachen könnte, die unser wissenschaftliches Ideal in der letzten Zeit erfahren hat. Der Physiker sieht heute seine eigene Außenwelt in einer Weise an, die ich bei all ihrer Exaktheit und praktischen Eignung ungleich mystischer nennen muß als die Anschauungen, die noch vor nicht viel Jahren vorherrschend gewesen sind, als nur das für wahr gehalten wurde, wovon Ingenieure ein Modell anfertigen konnten. Es gab eine Zeit, da man jene Wechselbeziehung des Selbst mit seiner Umgebung, aus der die Erfahrung besteht, einer Physik unterworfen glaubte, die weit starrer an ihre ehernen Gesetze gebunden war, als es bei der modernen Physik der Fall ist. Diese Phase der Selbstüberhebung, wo man zuerst die Physik um Erlaubnis fragen mußte, ob man seine eigene Seele auch wirklich sein eigen nennen dürfe, ist vorbei. Und diese große Veränderung in unseren physikalischen Anschauungen gibt zu Gedanken Anlaß, die weiter verfolgt werden sollten. Mögen wir auch, was den Aufbau der Welt anbetrifft, nicht zu genügender Klarheit vordringen können, so erkennen wir doch, daß gewisse Vorurteile, gewisse Erwartungen und Befürchtungen, die wir bisher gehegt haben, nicht länger am Platze sind.

Ist es nun wirklich eine harmlose Art von Unsinn für den Physiker, wenn er die Notwendigkeit, über die Grenzen der Physik hinauszublicken, bejaht? Es ist schlimmerer Unsinn, diese Notwendigkeit zu leugnen. Oder wie Carrolls hartnäckige Relativistin, die rote Königin⁴, es ausdrückt: „Du nennst es Unsinn, aber ich habe schon Unsinn vernommen, mit dem verglichen dies so sinnvoll wäre wie ein Konversationslexikon.“

Denn wenn diejenigen, die für alles auf der Welt eine physikalische Grundlage fordern, diese mystischen Anschauungen für Unsinn halten, so könnte man fragen: Was ist denn die physikalische Grundlage dieses Unsinn? Das „Problem des Unsinn“ berührt den Wissenschaftler weit

näher als jedes andere geistige Problem. Er mag immerhin behaupten, der Unterschied zwischen Gut und Böse stehe in keinerlei Beziehung zu seinem eigentlichen Gebiet, aber der Unterschied zwischen Sinn und Unsinn, zwischen richtigen und falschen Schlüssen muß zu Anfang jeder wissenschaftlichen Untersuchung anerkannt werden. Wir können also die Untersuchung dieses Unterschiedes sehr wohl als Schul- und Prüfbeispiel wählen.

Wenn das Gehirn eine physikalische Basis für den Unsinn enthält, den es denkt, so müßte dies eine Art Konfiguration physikalischer Größen sein — nicht gerade ein chemisches Sekret, aber doch irgend etwas nicht wesentlich davon Verschiedenes. Gewissermaßen so, als wenn die Maschinerie meines Gehirnes bei dem Gedanken 7 mal 8 ist 56 Zucker produzieren würde, wenn ich aber sage 7 mal 8 ist 65, dann würde die Maschine den falschen Weg laufen und statt Zucker Kalk ausscheiden. Wer aber sagt uns denn, daß die Maschine falsch gearbeitet hat? Als physikalische Maschine hat das Gehirn gemäß den unverletzlichen Gesetzen der Physik funktioniert. Warum also sollten wir sein Verhalten als falsch kennzeichnen? Eine solche Unterscheidung von chemischen Produkten in richtige und falsche besitzt kein Analogon in der ganzen übrigen Chemie. Wir können nicht Denkgesetze wie Naturgesetze behandeln, denn sie sind Gesetze, die man befolgen soll, nicht aber solche, die befolgt werden müssen, und der Physiker muß die Gesetze des Denkens anerkennen, bevor er die Naturgesetze anerkennen kann. Das Wörtchen „soll“ führt uns über die Grenzen der Chemie und der Physik hinaus. Es betrifft etwas, das Zucker fordert oder als wertvoll anerkennt, nicht aber Kalk, Sinn, nicht aber Unsinn. Eine physikalische Maschine jedoch kann nichts fordern noch anerkennen. Sie nimmt auf, was wir hineintun, und wandelt es gemäß ihrem physikalischen Mechanismus. Das, was in der physikalischen Welt als Schattenbild dem Unsinn im Geiste entsprechen könnte, kann niemals einen Grund für seine Verwerfung liefern. Es ist möglich, daß wir in einer Welt des Äthers und der Elektronen auf Unsinn stoßen, niemals aber auf „verdammten Unsinn“.

Eine einleuchtende physikalische Theorie des richtigen Denkens könnte vielleicht folgendermaßen lauten: Wir sind manchmal imstande, durch logisches Denken Ereignisse vorherzusagen, die nachträglich durch die Beobachtung be-

stätigt werden. Die geistigen Prozesse des Denkens bilden eine Folge, die in einer Vorstellung endet, welche eine spätere Wahrnehmung vorwegnimmt. Wir wollen eine solche Folge von geistigen Zuständen „erfolgreiches Denken“ nennen — worunter wir aber eine rein technische Klassifikation ohne jegliche moralische das leidige Wörtchen „soll“ enthaltende Beimengung verstehen wollen. Wir können nun untersuchen, welche charakteristischen Eigenschaften den verschiedenen Prozessen erfolgreichen Denkens gemeinsam sind. Wenn wir diese Analyse auf die geistige Seite des Denkens anwenden, erhalten wir die Gesetze der Logik; aber wahrscheinlich läßt sich das Verfahren auch auf die physikalischen Bestandteile des Gehirnes anwenden. Es ist durchaus denkbar, daß man dann bestimmte charakteristische Eigenschaften der physikalischen Prozesse in den Gehirnzellen finden würde, die mit erfolgreichem Denken Hand in Hand gehen, und diese würden dann „die physikalische Basis des Erfolges“ bilden.

Nun benutzen wir aber unsere Denkkraft nicht nur zur Voraussage beobachtbarer Ereignisse, und so erhebt sich auch nicht immer die Frage nach dem Erfolg unseres Denkens in dem oben definierten Sinne. Doch könnten wir natürlich auch dieses andere Denken, falls die begleitenden Prozesse in den Gehirnzellen die charakteristischen Eigenschaften zeigen, die wir als „physikalische Basis des Erfolges“ bezeichnet haben, dem erfolgreichen Denken gleichsetzen.

Wenn ich also meinen materialistisch eingestellten Gegner dazu überreden will, den Ausdruck „verdammter Unsinn“ als unvereinbar mit seinen eigenen Prinzipien zurückzuziehen, so könnte er immer noch behaupten, daß mein Gehirn bei der Entwicklung dieser Ideen nicht die physikalische Basis des Erfolges enthalten habe. Ich möchte unsere beiderseitigen Standpunkte nochmals klarlegen, da die Gefahr besteht, daß sie miteinander vermengt werden:

a) Hätte ich den Standpunkt meines Gegners, so würde mich sein Einwand, daß die physikalische Basis des Erfolges bei meinem Denken gefehlt habe, wenig kümmern, da es mir nicht einleuchten würde, warum man eine solche überhaupt fordern sollte, sobald es sich nicht um beobachtbare Voraussagen handelt.

b) Da ich jedoch seinen Standpunkt nicht teile, so bin ich durch seine Behauptung schwer beunruhigt, denn ich

sollte sie eigentlich als ein äußeres Zeichen dafür ansehen, daß der stärkere (und mit meinen Anschauungen durchaus vereinbare) Ausdruck „verdammter Unsinn“ anwendbar ist.

Diese „Erfolg“=Theorie des Denkens wird wohl kaum die Billigung des reinen Mathematikers finden. Für ihn ist Denken eine gottgesandte Fähigkeit, deren man sich abseits von dem störenden Treiben der Außenwelt erfreuen sollte. Es ist Ketzerei anzunehmen, daß die Beschaffenheit mathematischer Beweisführungen von der Tatsache abhängen soll, daß ein Physiker dann und wann mit Erfolg Resultate vor aussagt, die in Übereinstimmung mit der Beobachtung stehen. Mag sich die Außenwelt so vernunftwidrig verhalten wie sie will, es wird immer ein kleines Wissensgebiet bleiben, wo er ungestört nach den Wurzeln der Riemannschen Zeta-Funktion jagen kann. Für den Physiker rechtfertigt sich die Erfolg=Theorie natürlich durch sich selbst. Er bedient sich der ihr entsprechenden Art der Gehirntätigkeit, denn diese führt ihn zu dem, was er braucht — zu einer verifizierbaren Voraussage über die Außenwelt — und aus diesem Grunde schätzt er sie. Warum soll dann der Theologe sich nicht ebensogut eines jener geistigen Prozesse bedienen dürfen, die mit Vernunft nichts zu tun haben, und ihn besonders schätzen, wenn dieser ihn zu dem führt, was wiederum er braucht — zur Verheißung einer künftigen Seligkeit oder einer Hölle, deren Schrecken zur Besserung zwingen? Verstehen Sie mich recht, ich ermutige keineswegs die Theologen, die Vernunft zu verachten. Ich sage nur, daß sie durchaus dazu berechtigt wären, wenn es keine bessere Rechtfertigung für vernunftgemäßes Denken gäbe als die „Erfolg“=Theorie.

Und so führen mich meine eigenen Bedenken, daß ich vielleicht Unsinn geredet habe, letztlich zu der Überzeugung, daß ich mit etwas zu rechnen habe, was unmöglich innerhalb der physikalischen Welt aufgezeigt werden kann.

Ferner könnte man vielleicht gegen diese Vorträge einwenden, daß sie bis zu einem gewissen Grade den Glauben an das Übernatürliche zulassen, der in den Augen von vielen gleichbedeutend mit Aberglauben ist. Insofern der Glaube an das Übernatürliche mit dem Leugnen strenger Kausalität verbunden ist (S. 301), so kann ich nur erwidern, daß es ja gerade dies ist, wohin uns die letzten Entwicklungen der Quantentheorie führen. Doch wird wahrscheinlich die Rolle, die wir dem Geist und dem Bewußtsein in unserem

System eingeräumt haben, noch weit stärkeren Widerspruch erregen. Ich nehme jedoch an, daß auch unser Gegner mit dem Bewußtsein als einer Tatsache rechnet und weiß, daß Wissenschaft überhaupt erst durch das Bewußtwerden der Wahrnehmungen möglich wird. Sieht er das Bewußtsein nun als etwas Übernatürliches an? Dann ist er es, der das Übernatürliche zuläßt. Oder sieht er es als Teil der Natur an? Das eben tun wir. Wir behandeln es als das, was es offenbar ist, als den einzigen Zugang zu der Realität und dem Sinn der Welt, so wie es auch den einzigen Zugang für jede wissenschaftliche Kenntnis der Welt bildet. Oder sieht er das Bewußtsein als etwas an, dessen Dasein zwar unglücklicherweise nicht abgeleugnet werden kann, das man aber lieber unerwähnt läßt? Auch das wollen wir ihm zugestehen. Wir haben das Bewußtsein einem Hintergrunde zugeordnet, der sich der physikalischen Beobachtung der Welt entzieht, und haben dem Physiker eine Domäne eingeräumt, wo er sich in seinen Zyklen bewegen kann, ohne jemals auf etwas stoßen zu müssen, das ihm die Schamröte ins Gesicht treibt. Damit ist ihm ein eigenes Reich der Naturgesetze gesichert, das alles das umfaßt, wovon er jemals wirklich Besitz ergriffen hat. In der Tat war es ebenso der Zweck dieser Betrachtungen, ein solches Reich der uneingeschränkten Geltung naturwissenschaftlicher Methoden abzugrenzen, wie uns mit dem Wesen des Teiles unserer Erfahrung auseinanderzusetzen, der jenseits dieses Gebietes liegt. Einen solchen Schutzbereich naturwissenschaftlicher Forschungsmethoden abzugrenzen, dürfte durchaus nicht überflüssig sein, denn es wird oft die Anschuldigung erhoben, daß die Physik durch Vernachlässigung derjenigen Seiten der menschlichen Erfahrung, die sich einem umfassender gebildeten Geiste öffnen, von einer Art Größenwahn ergriffen und auf böse Irrwege geraten sei. Es gehört mit zu unserer Aufgabe, festzustellen, daß es ein weites Forschungsgebiet gibt, wo die Methoden der Physik durchaus hinreichen und die Einführung anderer Gesichtspunkte vollkommen verfehlt wäre.

Es besteht für den, der als Wissenschaftler eine Verteidigung der Religion vorbringen will, die dauernde Versuchung, einige bei religiösen Betrachtungen übliche Ausdrücke zu nehmen und nach Beseitigung gewisser gedanklicher Unklarheiten (die bei allem, was sich auf die Alltagsnöte der Menschheit bezieht, unvermeidlich sind) den

eigentlichen Sinn derart zu verwässern, daß wenig übrig bleibt, was zur Naturwissenschaft oder überhaupt zu irgend etwas in Widerspruch stehen könnte. Wäre von Anfang an diese gemilderte Auffassung vorgebracht worden, so hätte dies kaum eine scharfe Kritik herausgefordert, aber sie hätte auch niemand zu großem geistigen Enthusiasmus aufgerüttelt. Der Versuchung zu widerstehen ist aber um so schwieriger, als bis zu einem gewissen Grade eine Verwässerung unvermeidlich ist, denn wenn wir aus den Lehren von hunderterlei verschiedenen Sekten einen zusammenhängenden Standpunkt herausdestillieren und dann vertreten sollen, so ist es klar, daß mindestens einige dabei dem Prozeß des Verwässerns unterliegen werden. Ich weiß nicht, wie weit der Leser mich davon freisprechen wird, dieser Versuchung an den Stellen, wo religiöse Fragen berührt sind, nachgegeben zu haben, doch war ich jedenfalls bemüht, dagegen anzukämpfen. Wenn mir trotzdem Fehler unterlaufen sind, so liegt dies wahrscheinlich an folgendem: Wir haben uns mit dem Grenzgebiet zwischen materieller und geistiger Welt beschäftigt, und zwar von der Seite der materiellen Welt her. Von dieser Seite aus gesehen muß aber alles, was wir über die geistige Welt aussagen können, notwendig unlebendig und schwach erscheinen, und es kann uns dadurch in keiner Weise verständlich werden, wie es möglich ist, daß die Theologie auch nur den leisesten praktischen Einfluß auf die innere Einstellung eines Menschen ausüben kann. Die geistige Welt aber, wie sie eine ernste Religion versteht, ist keineswegs so farblos und unlebendig. Wenn ich nun dieses Hinterland der Naturwissenschaft eine geistige Welt genannt habe, so erweckt es vielleicht den Anschein, als habe ich damit in einem wesentlichen Punkt eine *petitio principii* begangen. Es sollte jedoch damit nur eine vorläufige Identifizierung beabsichtigt sein. Um diese voll zu rechtfertigen, müßte man auch von der anderen, der geistigen Seite her diesem Grenzgebiet nahe zu kommen suchen. Ich will aber hier keineswegs den Amateurtheologen spielen und eine solche Annäherung im einzelnen untersuchen, sondern ich wollte nur darauf hinweisen, daß es der inneren Überzeugung eines jeden überlassen bleiben muß, dieses Gebiet mit einer religiösen Färbung zu umkleiden. Ich glaube, man darf Gültigkeit und Wert gewisser innerer Überzeugungen nicht leugnen, denn sie gehen parallel mit dem nicht auf Vernunft gegründeten Glauben

an die Vernunft, der Vorbedingung der Mathematik ist, mit einem angeborenen Sinn für die Gemäßheit der Dinge, der die Vorbedingung der Wissenschaft von der physikalischen Welt ist, und auch mit einem unwiderstehlichen Gefühl für das Nicht-Gemäße, das Vorbedingung für eine Rechtfertigung des Humors ist. Oder vielleicht handelt es sich nicht so sehr darum, daß wir Gültigkeit und Wert dieser Überzeugungen anerkennen, als daß wir erkennen, daß sie einen wesentlichen Teil unserer inneren Natur bilden. Wir verteidigen ja auch nicht erst unsere Empfänglichkeit für die Schönheit einer Landschaft, sondern nehmen diese Gabe dankbar als Tatsache hin.

Vielleicht wird man aus diesen, der modernen Physik entnommenen Argumenten den Schluß ziehen, daß Religion überhaupt erst seit 1927 für einen vernünftigen Wissenschaftler möglich geworden ist. Wenn wir schon auf diesen langweiligen Menschen, den unbeirrbar vernünftigen Mann, eingehen müssen, so könnte man sagen, daß sich für einen solchen Menschen nicht nur die Religion, sondern überhaupt fast alle Seiten des Lebens erst seit 1927 erschlossen haben. Gewisse allgemein verbreitete Äußerungen des Lebensgefühls (wie z. B. sich zu verlieben) sind ihm, glaube ich, auch heute noch verboten. Wenn tatsächlich im Jahre 1927 die Forderung strenger Kausalität durch Heisenberg, Bohr, Born und andere endgültig zu Fall gebracht wurde, so wird dieses Jahr sicherlich einen der wichtigsten Abschnitte in der Entwicklungsgeschichte der Philosophie bedeuten. Aber da wir sehen, daß die Menschen schließlich auch vor dieser lichtvollen Epoche irgendwie zu der Überzeugung gelangt sind, daß sie ungeachtet des Joches strenger Kausalität ihres eigenen Glückes Schmiede sein müssen, so kann man den gleichen Weg wohl auch in Fragen der Religion einschlagen.

Dies führt uns zur Erörterung der oft von kirchlicher Seite geäußerten Ansicht, daß es keinen Konflikt zwischen Wissenschaft und Religion geben könne, da sie beide ganz verschiedenen Reichen des Gedankens angehören. Damit will man sagen, daß solche Betrachtungen, wie wir sie eben angestellt haben, überflüssig seien. Meiner Ansicht nach aber fordert diese Behauptung erst recht eine Untersuchung heraus, wie es möglich ist, daß diese beiden Reiche des Denkens unabhängig voneinander so eng mit unserer Existenz verknüpft sein können. Jetzt aber, nachdem wir etwas von dem Wege gesehen haben, auf dem sich das Reich

naturwissenschaftlichen Denkens aus einem in sich geschlossenen zyklischen Schema heraus entwickelt hat, können wir vorsichtig zustimmen. Natürlich kann ein Konflikt nur dann vermieden werden, wenn sich jede Partei auf ihr ureigenes Gebiet beschränkt, und so sollte eine Diskussion, die uns zu einem besseren Verständnis der Grenzen beider Gebiete führt, nur zur Förderung des Friedenszustandes beitragen. Es gibt aber immer noch reichliche Gelegenheit für Grenzschwierigkeiten. Ich möchte dies an folgendem Beispiel zeigen:

Der Glaube, daß es eine künftige nichtmaterielle Existenz gibt, ist keineswegs auf die dogmengläubigen Anhänger der Religion beschränkt. Der Himmel ist nirgends im Raume, aber er ist in der Zeit. (Der ganze Sinn dieses Glaubens knüpft sich an das Wort Zukunft. Es liegt kein Trost in der Versicherung, daß wir in einem vergangenen Stadium unserer Existenz selig waren.) Andererseits sagt der Physiker, daß Raum und Zeit ein einziges Kontinuum bilden, und so steht die moderne Vorstellung eines Himmels in der Zeit, nicht aber im Raume in schärferem Gegensatz zur modernen Naturwissenschaft als die präkopernikanische Vorstellung eines Himmels über unseren Köpfen. Die Frage, um die es sich hier handelt, lautet nicht, ob der Theologe oder der Physiker recht hat, sondern wer mit seiner Behauptung in das Gebiet des anderen eindringt. Kann nicht die Theologie in einer nichtmateriellen Weise ihre Festsetzungen über das Geschick der menschlichen Seele treffen, ohne damit über die Grenzen des wissenschaftlichen Gebietes zu dringen? Und kann die Wissenschaft nicht ihre Schlußfolgerungen über die Geometrie des raumzeitlichen Kontinuums aufstellen, ohne die Grenzen des theologischen Gebietes zu verletzen? Gemäß obiger Behauptung können Wissenschaft und Theologie so viel Fehler machen, als ihnen beliebt, vorausgesetzt, daß sie sie auf ihrem eigenen Gebiet begehen. Sie können nicht miteinander in Konflikt geraten, wenn jeder sich innerhalb seiner eigenen Grenzen befindet. Doch wird eine sehr sorgfältige Grenzziehung notwendig sein, um an dieser Stelle die Möglichkeit eines Konfliktes zu verhindern*.

* Diese Schwierigkeit hängt offenbar mit der zweifachen Art zusammen, wie die Zeit in unsere Erfahrung treten kann, auf die ich so oft hinzuweisen Veranlassung hatte.

Die philosophische Richtung der modernen naturwissenschaftlichen Gedankengänge weicht merklich von den Anschauungen der letzten dreißig Jahre ab. Und wir können keineswegs garantieren, daß die nächsten dreißig Jahre nicht eine neue Revolution, oder vielleicht wieder eine völlige Reaktion bringen werden. Sicher stehen uns noch große Umwälzungen bevor und vieles wird uns dann in ganz anderem Lichte erscheinen. Dieser ständige Wechsel ist eine der großen Schwierigkeiten in dem Zusammenhang zwischen Philosophie und Naturwissenschaft. Er ist auch der Grund, warum der Physiker in der Regel so wenig auf die philosophischen Konsequenzen seiner eigenen Entdeckungen achtet. Wenn auch langsam und auf mühevollen Umwegen, so schreitet er doch voll hartnäckiger Ausdauer zu immer reinerer Wahrheit vor. Aber für die Außenstehenden scheint sein Weg oft hoffnungslos im Zickzack zu führen. Wissenschaftliche Entdeckungen sind wie das Eineinanderfügen der Teile eines großen Legespieles. Eine Revolution unserer physikalischen Denkweise bedeutet nicht, daß die Teile des Bildes, die schon zusammengefügt und miteinander verbunden sind, wieder zerstört werden müssen, sondern nur, daß wir beim Anfügen neuer Stücke die Auffassung, die wir bisher von dem zu erratenden Bild hatten, einer Revision unterziehen müssen. Sie fragen eines Tages den Physiker, wie er mit seinem Bilde vorwärtskommt, und er antwortet: „Recht gut. Ich habe diesen Teil des blauen Himmels schon fast fertiggestellt.“ Anderen Tages fragen Sie ihn wieder, wie er mit dem Himmel vorwärtskommt, und er sagt: „Ich habe noch ein Stück hinzugefügt, aber es war das Meer und nicht der Himmel. Ein Boot schwimmt oben drauf.“ Und das nächste Mal hat es sich vielleicht herausgestellt, daß es ein umgekehrter Sonnenschirm ist. Trotzdem ist unser Freund begeistert von seinen Fortschritten. Wohl hat der Physiker seine Vermutungen, wie das Bild schließlich aussehen wird und stützt sich auch weitgehend auf dieselben beim Aussuchen der weiteren Stücke, die er einfügen will. Doch von Zeit zu Zeit werden seine Vermutungen durch unvorhergesehene Entwicklungen beim fortschreitenden Einpassen der Teile wieder modifiziert. Aber wenn auch seine Ansicht über das endgültige Aussehen des Bildes immer wieder umgestoßen wird, so verliert er doch darum nicht den Glauben an seinen Beruf, denn er gewahrt, daß der schon fertige Teil seines Bildes ständig im Wachsen

begriffen ist. Wer ihm über die Schulter sieht und das im Augenblick gerade fertige Stück für außerwissenschaftliche Zwecke ausdeutet, tut dies auf eigene Gefahr.

Dieser Mangel an Abgeschlossenheit, der alle wissenschaftlichen Theorien kennzeichnet, würde eine wesentliche Einschränkung unserer Argumente bedeuten, wenn wir mit ihrer Dauer überhaupt gerechnet hätten. Der religiöse Leser wird durchaus zufrieden sein, daß ich ihm nicht einen durch die Quantentheorie offenbarten Gott geboten habe, bei dem man ja darauf gefaßt sein müßte, daß er durch die nächste wissenschaftliche Umwälzung wieder gestürzt würde. Den Philosophen aber interessiert nicht die spezielle Form, welche die modernen wissenschaftlichen Theorien angenommen haben — d. h. die Schlußfolgerungen, die wir bewiesen zu haben glauben —, sondern einzig der Gedankenfortschritt, der ihnen zugrunde liegt. Sind uns die Augen erst einmal aufgegangen, so können wir wohl zu einem neuen Ausblick gelangen, niemals aber zu der alten Weltauffassung zurückkehren.

Wenn das philosophische Schema, das wir auf der Basis der physikalischen Fortschritte von Einstein, Bohr, Rutherford und anderen errichtet haben, dazu bestimmt ist, in den nächsten dreißig Jahren wieder gestürzt zu werden, so kann man es nicht diesen Forschern zur Last legen, daß wir in die Irre gegangen sind. So wie die Zeit, da die Systeme Euklids, Ptolemäus' und Newtons ihre Aufgabe zu erfüllen hatten, abgelaufen ist, so werden vielleicht auch die Systeme Einsteins und Heisenbergs einem vollkommeneren Weltbild weichen müssen. Jede wissenschaftliche Revolution setzt nur neue Worte zu der alten Melodie, und was vorher galt, wird nicht zerstört, sondern nur unter anderem Gesichtswinkel betrachtet. Aber inmitten unseres fehlerhaften Ringens nach dem richtigen Ausdruck wächst stetig der Kern wissenschaftlicher Wahrheit. Und von dieser Wahrheit darf man sagen: Mag ihre Form auch noch so sehr sich ändern, die Wahrheit bleibt doch stets nur eine.

REGISTER

- ABC der Physik 6, 92.
Abgeplattete Gestalt des Milchstraßensystems 165.
Ablauf des Weltgeschehens 67, 87.
Ablenkung der Lichtstrahlen im Gravitationsfeld 125.
Absolut 30, 60.
Absolutes Anderswo 53, 54, 128.
— Futurum exaktum 301.
Absolute Vergangenheit und Zukunft 52, 61, 289.
— Wertung 282, 323.
Absorption von Licht 184, 186, 189.
Abstraktion 57.
Ähnlichkeitsbeziehungen 229.
Äther 37, 140, 245.
Ätherwind 11.
Affenähnliche Vorfahren 23, 85, 268.
Allgemeine Relativitätstheorie 114, 132.
Alter der Sonne 169.
Anderswo 47.
Anfang der Zeit 87.
Anordnung (Konstellation), ihre Subjektivität 98, 108, 239.
Anthropomorpher Gottesbegriff 277, 330, 334.
Antipoden (des sphärischen Raumes) 283.
Antisymmetrische Eigenschaften der Welt 233.
Apfel Newtons 114—119.
A priori-Wahrscheinlichkeit 81, 241, 298.
Atomistik, ihre Gesetze 234, 242.
Atomkern 11.
Atomstruktur 9, 190, 198, 222.
Augenblicke, weltweite 48.
Außenwelt 279, 281.
Ballast beim Weltbauen 233, 240.
Baumaterial 228.
Bauplan der Natur 33.
Bedeutung 111, 322.
Beharren, als Forderung des Geistes 238.
Bekehrung 329.
Benachbartsein von Relationen 230.
Beobachter, auf dem Nebel 17, 21.
—, Eigenschaften 22, 330.
Berkeley 3, 320.
Bescheidener Beobachter 22.
Beschleunigtes Bezugssystem 116.
Beschleunigung, Relativität 132.
Beta (β) - Teilchen 63.
Betrachtung von innen 147, 315, 323.
Beugung von Elektronen 202.
Bewegungsgesetz 126.
Beweis und Wahrscheinlichkeit 329.
Bezugssysteme, falsche 119 Anmerkung.
—, raumzeitliche 65, 115, 156.
Bilanzaufstellung 39.
Bild der Gravitation 118, 141, 158.
Bild und Farbpartikelchen 109.
Billardball-Atom 10, 255.
Bohr, Niels 10, 185, 191, 195, 219, 299.
Boltzmann, L. 67.
Bombardement der Moleküle 116, 134.
Born, M. 206, 208.
Bose, S. N. 203.
Bragg, W. H. 194.
Broad, C. D. 161.
de Broglie 201, 202.
Cepheiden 166.
Chancen 296, s. Wahrscheinlichkeit.
Chiffrierte Botschaften 272.

- Clifford, W. K. 273.
Code (Schlüsselsystem) 59, 85, 232.
- Dämon, Gravitations- 121, 303.
Darwin, G. H. 172.
Dauer, als Forderung des Geistes 239, 323.
Definitionsprinzip 251, 280.
Denken 254.
Denkender Mechanismus 255.
Denkgesetze 338.
Determinismus 80, 226, 266, 288, 297, 303.
Dichte, große Dichte der Materie in Zwergsternen 203.
Differentialgleichungen 276, 322, 333.
Dimensionen, vier 56, 229.
—, mehr als vier 123, 160, 218.
Dirac, P. A. M. 206, 218, 266.
Doppelsterne 176, 253 Anmerkung.
Doppler-Effekt 50, 167, 185.
Dreiecke in Raum und Zeit 136.
Durchschnittsergebnisse 294.
Dynamischer Charakter von Zeit und Welt 72, 94, 96, 100, 256.
- Ebene Welt 121, 141.
Ego 101, 309; das Selbst 277.
Egozentrischer Standpunkt des Beobachters 22, 65, 115.
Eigenlänge 32.
Eigenmarke 229.
Eigenzeit, gelebte Zeit 45.
Einblick, innere Einsicht 93, 94, 264, 272, 305, 332.
Einstein, A. 9, 57, 114, 185, 203.
Einsteins Bewegungsgesetz 127.
— Gravitationsgesetz 123, 142, 153, 257.
— Theorie 27, 114.
Elefant, Problem vom Elefanten 248.
Elektrische Theorie der Materie 10, 14.
Elektromagnetismus 233.
Elektron 11.
—, Ausdehnung in der Zeit 149.
—, im Atom 190, 199, 222.
—, Masse 63.
—, Natur 273, 285.
— und Proton 331.
Elliptischer Raum 284.
- Emission des Lichtes 184, 191, 215.
Endlicher, doch unbegrenzter Raum 84, 142, 167, 283.
Entfernung, ihre Relativität 30.
—, ihre unerforschte Natur 85.
—, ihr makroskopischer Charakter 157, 201.
Entgeschehen 111.
Entropie 78, 107, 110.
Entropieänderung und Werden 92.
Entropieuhr 104.
Entwerden 97.
Entwicklung, Nichtumkehrbarkeit 95.
— des Sternsystems 168, 176.
Ereignisse, ihre Einordnung 46.
—, Punktereignisse 54.
Erfahrung, als Selbst und Umgebung 282, 321.
Erfolg-Theorie des Denkens 338, 340.
Ergsekunden 180.
Erhaltungssätze 234, 238.
Erkennbar für den Geist 260.
Erkenntnis, Natur der physikalischen 253, 297.
Erklärung, Ideal einer wissenschaftlichen 5, 141, 208, 245, 271.
Erregungsgebiet einer Wellengruppe 210, 217.
Euklidische Geometrie 161.
Exakte Wissenschaft 247.
Existenz 280, 319.
Extensive Abstraktion, Methode 246.
- Fachstandpunkt des Physikers 281, 327 Anmerkung.
Farbenklecks 109.
Farbe und Wellenlänge 92, 98, 322, 327, 333.
Faserstruktur der Welt 52, 59, 60, 94.
Feld 155.
Feldgesetze 234.
Feldphysik 234.
Fernvergleiche 144, 230.
Fiktive Längen 26.
Finsternisse, Voraussagung 150, 292.
Fitz Gerald-Kontraktion 12, 15, 31.
—, ihre Realität 38, 57.
Fowler, R. H. 204.
Frage nach dem Absoluten 32, 125.
— der Wissenschaft 113, 281.
— nach Wirklichkeit 320.

- Franck, J. 193.
 Freier Wille 288, 303.
 Futurum exaktum 301.
- Gabelpunkt der Welt 233.
 Galaktisches System 165.
 Ganze Zahlen 218, 243.
 Gehirn 256, 264, 273, 305, 316.
 Geist, selektiver Einfluß 237, 241, 260.
 — und Materie 254, 264, 274.
 Geistige Welt 276, 282, 317, 342.
 Geistiger Zustand 274.
 Geist-Stoff 270.
 Geologie 328.
 Gemäßheit, Sinn für 334.
 Geodätische Linien 127.
 Geometrie 135, 159, 163.
 Geometrisierung der Physik 139.
 Gerichteter Radius 143.
 Geschwindigkeit, ihre Relativität 17.
 —, obere Grenze 60.
 — des Lichtes 50, 58.
 — durch den Äther 36, 38.
 Gesetze erster Art 71, 79, 101.
 — — —, System 80, 132, 289.
 — — —, Unzulänglichkeit 110.
 —, transzendente 242.
 — zweiter Art 79, 83, 102.
 Gesunder Menschenverstand 23.
 Gleichförmigkeit, Basis der 148.
 Gleichzeitigkeit 53, 65.
 Glittige Tobs 285.
 Gravitation, relative und absolute
 Eigenschaften 117.
 — als Zugkraft 118, 126.
 — als Krümmung 122.
 —, Bild 118, 141, 158.
 —, Erklärung 141, 146.
 —, Gesetz 123, 142.
 —, vollständige Erklärung 257.
 Grenzen physikalischer Erkenntnis
 253.
 Grönland 120.
 Gruppengeschwindigkeit 212.
- h* 180, 184, 221.
 Hamilton, W. R. 182.
 Hamiltonsche Differentiation 238.
 — Funktionen 5.
 Handelsvertrag der Materie 129.
 Häufung von Zufällen 75.
- Hauptkrümmung 123, 142.
 Haupttreffer-Theorie 187, 190.
 Hegel 150.
 Heiligenschein der Wirklichkeit 277,
 280, 284.
 Heisenberg, W. 206, 219, 227, 299.
 Hertz, G. 193.
 Hier-Jetzt 47.
 Himmel 344.
 Hintergrund von Zeigerablesungen
 140, 252, 256, 263, 323, 331.
 Hubble, E. P. 168.
 Humor 315, 328.
 Humpty-Dumpty 68.
 Huxley, T. H. 174.
 Hydrodynamik 239, 310.
 Hyperbolische Geometrie 138.
 Hypersphäre 84, 159.
- i* (Quadratwurzel aus -1) 138, 149,
 207.
- Ich und Du 47, 57, 130.
 Ideale, physikalische des 19. Jahr-
 hunderts 208, 255.
 Identische Gesetze 234.
 Identität an Stelle von Ursächlichkeit
 158.
 Illusionen 313.
 Impressionismus in der Physik 106.
 Impuls 157, 207, 221, 237, 258.
 Infrarot-Photographie 173.
 Ingenieur, abgelöst durch den Mathe-
 matiker 107, 209.
 Innere und symbolische Erkenntnis
 315.
 Inneres Licht 321.
 Inseluniversum 166.
 Intervalle 257.
 Invarianten 29.
 Inventar-Methode 106, 109, 275, 334.
 Isotropie der gerichteten Krümmung
 147.
- Jeans, J. H. 177, 187.
 Jetztlinien 48, 51, 53, 185.
 Jetzt-Geschenlinien 49, 52.
 Johnson, Dr. 320.
 Jordan, P. 206, 208.
- Kant 176.
 Kategorien 2.
 Kauderwelsch 285, 286.

- Kausalität 290.
 Kausation 290.
 Klassische Gesetze und Quantengesetze 193, 195.
 — Physik 12, 301.
 Koinzidenzen 249.
 Kompensation von Fehlern 20.
 Konfigurationsraum 218.
 Konkret 269.
 Kontraktion, Fitz Gerald's, Lorentz's 12, 31.
 —, ihre Realität 38, 57.
 Koordinaten 207, 229.
 Kopenhagener Schule 195.
 Korrespondenzprinzip 195.
 Kraft 126, 131, 140, 157, 258.
 Kreidestück, Berechnung seiner Bewegung 110.
 Krümmung der Raum-Zeit 122, 129, 158.
 Krümmungskoeffizienten 123, 157.

 Lagebestimmung 21, 46.
 Länge 13, 161.
 —, Eigenlänge 32.
 —, einem Hohlspiegel zugeordnete 143.
 —, fiktive 26.
 —, siehe Entfernung.
 Längster Weg 128, 138, 150.
 Laplace 176.
 Laputaner 333.
 Larmor, J. 15.
 Laune der Natur 154.
 —, das Planetensystem als 177.
 Leben auf anderen Planeten 170.
 Lebensversicherungsgesellschaft 293.
 Leere des Atoms 9, 10.
 — des Raumes 21, 140.
 Leitgesetze 234, 241, 242, 325.
 Lenard, P. 132.
 Lichtabsorption 184, 186, 189, 191.
 Lichtemission 184, 191, 215.
 Lichtgeschwindigkeit 50, 58.
 Lift, Mann im 114.
 Logos 331.
 Lorentz, H. A. 15.
 Lowell, P. 175.

 Makroskopische Betrachtung 156, 225, 293, 298.
 Mars 172.

 Masse, Zunahme mit der Geschwindigkeit 44, 54, 63.
 Maßstab 19, 25, 30, 137, 144.
 Materie 9, 37, 158, 203, 245, 255.
 Mathematiker 107, 163, 209, 329, 340.
 Matrix 208.
 Maxwell, J. C. 15, 64, 162, 234.
 Mechanik und Geometrie 139.
 Mechanische Modelle 208.
 Mendelismus 247.
 Mensch 164, 170, 178.
 Menschen-Jahre 181.
 Metrik 145, 155.
 Metrische und nichtmetrische Eigenschaften 270.
 Michelson-Morley-Experiment 13, 19.
 Mikroskopische Betrachtungsweise, Reaktion dagegen 106.
 Milchstraße 164.
 Miller, D. C. 13.
 Minkowski, H. 40, 57.
 Mischen 67, 96, 185.
 Modelle 198, 208, 337.
 Molekülbombardement 116, 134.
 Mond, Entstehung 171, 172.
 Morley, E. W. 13, 19.
 Multiplikationist und Evolutionist 90.
 Mystische Religionen 330.
 Mystizismus, Verteidigung 316.

 Naturgesetze 235, 241.
 — und Denkgesetze 338.
 Nautischer Almanach 152.
 Nebel 166.
 Nebelphysiker 17, 21.
 Neptun 53.
 Neue Quantentheorie 200, 206.
 Neutrale Zone 53.
 Neutralstoff 274.
 Newton 12, 114, 124, 201.
 Newtonsches Gesetzsschema 12, 25, 128.
 Nichteuklidische Geometrie 158.
 Nichtleerer Raum 130, 155, 236.
 Normalmeter 144.

 Objektivität des Werdens 97.
 — eines Bildes 109.
 Operator 208.
 Ordnen 97.
 Organisation 72, 74, 106, 108.
 —, vollkommene 87.

- p 's und q 's 207, 221, 320.
 Partikel, materielles Teilchen 201, 210.
 —, Energie 211.
 —, Lage und Geschwindigkeit 219.
 Pedanterie 333, 334.
 Persönliche Auffassung der geistigen Welt 330.
 Pfeil der Zeit 72, 82, 91, 288.
 Pfund Sterling, seine Relativität 33.
 Phönixgedanke 89.
 Photoelektrischer Effekt 188.
 Photon 190.
 Plan und Zufall 81.
 Planck, M. 185.
 Ponderomotorische Kraft 234 Anmerkung.
 Potential, Gravitations 257.
 Potentialgradient 99.
 Potentielle Energie 212.
 Prädestination 287, 297.
 Prinzip der Umkehrbarkeit molekularer Vorgänge 83.
 — der Unbestimmtheit 219, 300.
 Proton 11, 190, 331.
 Psi (ψ Schrödingers) 215, 299.

 q -Zahlen 208, 266 Anmerkung.
 Quästor 235.
 Qualifikation 280.
 Quantengesetze 193.
 Quantensprünge der Elektronen 192, 196, 204, 214, 294, 305.
 Quantenzahlen 191, 205 Anmerkung.
 Quantum, räumliche Größe 200.
 —, Wirkungs 184.

 Raum 21, 23, 54, 84, 140.
 —, endlicher und unbegrenzter 84.
 —, Maß seiner Erfülltheit 155.
 —, Selbstvergleichung des Raumes 148.
 Raumgerüst 19, 27, 40.
 Raum-Zeitgerüst 65, 115, 156.
 Räumliche Beziehungen 55.
 Realität, Bedeutung des Wortes 277, 319.
 Rektifikation von Kurven 128 Anmerkung.
 Relata und Relationen 228.
 Relativität der Beschleunigung 132.
 Relativität der Entfernung 31.
 — — Geschwindigkeit 17, 58, 63, 65.
 — — Jetztlinien und der Gleichzeitigkeit 50, 65.
 — — Richtung 32.
 — des magnetischen Feldes 29.
 — — Normalmeters 146.
 — — Pfund Sterling 33.
 — von Raumgerüsten 28.
 Religion 195, 276, 282, 316, 317, 319, 326, 341.
 Retrospektive Symbole 301, 302.
 Revolutionen im wissenschaftlichen Denken 12, 345.
 Richtige Raumgerüste 25, 27.
 Richtung, Relativität 32.
 Römer, O. 48.
 Rotierende Massen, ihre Aufspaltung 176.
 Rückgängigmachen 69.
 Russell, B. 161, 272, 273.
 Rutherford, E. 10, 320.

 Sammelbüchsen-Theorie 187, 193.
 Sanduhrfiguren 52.
 Sauerstoff und Vegetation 174.
 Schattenwelt 6, 112.
 Schlüsselatome 307.
 Schlüsselssystem, Code 59, 85, 232.
 Schlußkette 265, 282, 292.
 Schönheit 107, 263, 343.
 Schrödingers Theorie 199, 210, 215, 223, 299.
 Schwebungen 214.
 Selbstvergleichung des Raumes 148.
 Selektiver Einfluß des Geistes 237, 241, 260, 323.
 Selige Götter, Hegel 150, 157.
 Signalgeschwindigkeit 61.
 Singularitäten 130.
 Sinnesorgane 55, 99, 262, 322.
 Siriusbegleiter 203.
 de Sitter, W. 168 Anmerkung.
 Soll 338.
 Sonne, Alter 169.
 — als Stern 165.
 Sonnensystem, Entstehung 177.
 Sonnensystematom 10, 190.
 Spektrallinien 204, 215.
 —, Verschiebung 124 Anmerkung, 167.
 Sphärische Krümmung, Radius 142.

- Sphärischer Raum 84, 168, 283.
 — —, Radius 168.
 Spiegel, Verzerrung des Bildes in einem bewegten 18.
 Spiralnebel 166.
 Staatliche Sternwarte, Zeit 42.
 Standpunkte 96, 278.
 Statistik 201, 293, 296.
 Statistische Gesetze 241.
 — —, Einwirkung des Geistes darauf 307.
 Sterne, Doppelsterne 176.
 —, Entwicklung 176.
 —, weiße Zwerge 203.
 —, Zahl 164.
 Sternbegegnungen 177.
 Sternwelt 164.
 Sternzählung 164.
 Stiller Ozean 171.
 Strahl des Glücks 190.
 Strahlungsdruck 62.
 Struktur 232, 272 Anmerkung.
 Strukturmaße 232, 237, 264.
 Subäther 210, 218.
 Subjektives Element in der Physik 98, 238.
 Substanz 1, 268, 312.
 Substanzhaftigkeit 1, 323.
 Symbolismus in der Wissenschaft 6, 208, 244, 265, 317.
 Synthetische Methode der Physik 246.

 Tatsächlichkeit 260, 325.
 Temperatur 75.
 Tensor 233 Anmerkung, 254.
 Tensorkalkül 182.
 Thermodynamik, 2. Hauptsatz der 71, 78, 89.
 Thermodynamisches Gleichgewicht 81.
 Thermometer als Entropieuhr 102, 104.
 Tobs 285.
 Trägheit 127.
 Transzendente Gesetze 242.
 Tür, wissenschaftlich einwandfreier Eintritt durch diese 335.

 Überlagerung 215.
 Übernatürlich 302, 340.
 Überzeugung 325, 342.

 Uhren 102, 137, 156.
 Umkehrbarkeit molekularer Vorgänge 83.
 Unbestimmtheitsprinzip 219, 300.
 Und, Erforschung des 106.
 Unendlichkeit 84.
 Unerkennbare Dinge 220, 301.
 Universitätsquästor 235.
 Unmöglichkeit und Unwahrscheinlichkeit 79.
 Unsinn, Problem des 337.
 Ursache und Wirkung 288.
 Utopia 261.

 Vegetation auf dem Mars 174.
 Venus 171.
 Vererbungslehre 247.
 Vergangenheit, relative und absolute 53.
 Vergleichbarkeit von Relationen 230, 240.
 Verknüpfung (Identifizierung) der wissenschaftlichen Welt und der Welt des täglichen Lebens 5, 92, 157, 237, 246.
 Verursachung 287, 288, 290.
 Vielheit von Raum-Zeitgerüsten 27, 40, 65.
 — der Welten 170.
 Vollständige Beschreibung 224.
 Voraussagung von Ereignissen 149, 226, 292, 301.

 Wahrnehmbarkeit 263.
 Wahrnehmen, Gewährwerden 23, 327.
 Wahrscheinlichkeit 76, 81, 108, 190, 215, 294, 308, 329.
 Wasserdichte Abteilungen 194.
 Wasserstoff 11.
 Weiße Zwerge 203.
 Wellen, Erzeugung durch Wind 310.
 Wellengruppe 212, 216, 223.
 Wellenlänge, Messung 31.
 Wellenmechanik 210.
 Wellentheorie der Materie 202.
 Wellikel 201.
 Wells, H. G. 71.
 Welt, der Schatten 6, 112.
 —, ebene 121, 141.
 —, geistige 276, 282, 317, 342.
 —, geschichtete 51.

- Welt, vertraute und wissenschaftliche 2, 244, 318.
Weltbauen 228.
Weltgerüst 65.
Weltinsel, Inseluniversum 166.
Weltlinien, ihr Schnittpunkt 249, 335.
Weltraumreisender, seine gelebte Zeit 44, 129, 137.
Weltschlauch 253.
Weltweite Augenblicke 48.
Werden 72, 91.
Wert, Wertung 240, 282, 323.
Wesentliche Eigenschaften 145.
Whitehead, A. N. 148, 246.
Whittaker, E. T. 182.
Wiederverjüngungstheorie 88, 170.
Willensfreiheit 288, 303.
Wirklich wahr 39.
Wirkung 181, 238.
Wirkungsatom 183.
Wirkungsquantum 184, 200.
Wissenschaftslehre 223, 297.
Wright, W. H. 173.
Wurm, vierdimensionaler 47, 91, 96.
- X, Herr 258, 263, 267.
- Zeigerablesungen (Zeigerstellungen) 248.
Zeit 21, 54, 84, 105.
—, Anfang der 87.
—, Ausdehnung und Fortschreiten 82, 102.
— der Staatlichen Sternwarte (physikalische Zeit) 42.
—, gelebte (Eigenzeit) 45.
—, Realität 269.
—, Unendlichkeit 84.
—, zweifache Erfahrung der 55, 95, 102, 327, 344.
- Zeitdreiecke 136.
Zeitliche Beziehungen 55.
Zeitpfeil 73, 82, 91, 288, 331.
Zeitskala (in der Astronomie) 168.
Zitate von
Boswell 320.
Brooke, Rupert 311.
Clifford, W. K. 273.
Hegel 150.
Huxley, T. H. 174.
Kinder- und Volksversen 68, 74, 258.
Kronecker, L. 243.
Lamb, H. 310.
Lewis Carroll 34, 285, 337.
Milton (übersetzt von A. Böttger) 168.
Newton 114.
Omar Khajjam 69, 287.
O' Shaughnessy, A. 319.
Russell, Bertrand 161, 273.
Shakespeare 45, 86, 286, 323.
Swift 333.
Whitehead, A. N. 148.
- Zufallelement 68.
—, Messung 78.
Zufallsgebilde von Atomen 81, 248.
Zukunft 47.
—, absolute 52.
— als zukünftiges Leben 344, s. Voraussetzung.
Zustände 197, 295.
Zweck 108.
Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 71, 78, 89.
Zwergsterne 203.
Zyklische Methode der Physik 257, 271, 341.
Zylindrische Krümmung 142.

ANMERKUNGEN DER ÜBERSETZER

¹⁾ (zu S. 10). Den ersten Nachweis von der geringen Substanzerfülltheit der Atome hat bereits 1903 Leñard durch seine Versuche über die Absorption der Kathodenstrahlen gebracht. Er gelangte allerdings noch nicht zu der Form des Planetensystem-Atommodells, zu der Rutherford durch seine Versuche mit α -Strahlen geführt wurde und die sich später so außerordentlich fruchtbringend erwies. Mit aller Deutlichkeit aber sagte er:

„Die Ausbreitungsweise der Kathodenstrahlen in der Materie wirft ein eigentümliches Licht auf die Raumerfüllung der letzteren.“ ... „Beispielsweise ist danach der Raum, in welchem ein Kubikmeter festes Platin sich findet, leer in dem Sinne, wie etwa der von Licht durchzogene Himmelsraum leer ist, bis auf höchstenfalls ein Kubikmillimeter als gesamtes wahres Dynamidenvolumen.“ [Annalen der Physik (IV) 12, 736 und 739, 1903.]

Daß diese Worte so wenig die allgemeine Aufmerksamkeit auf sich lenkten und kaum über den Kreis der deutschen Physiker hinausdrangen, ist ein schlagender Beweis für das, was Eddington auf S. 9 über die Langsamkeit sagt, mit der die hier bereits ausgesprochene Idee zum Siege gelangte.

²⁾ (zu S. 12). Anstatt „Fitz Gerald-Kontraktion“ pflegt man in Deutschland „Lorentz-Kontraktion“ zu sagen nach dem holländischen Physiker H. A. Lorentz, der bei der Entwicklung seiner Elektronentheorie“ den gleichen Gedanken wie Fitz Gerald ausführte. Vgl. auch S. 15 und Arch. Neerl. 25, 363, 1892.

³⁾ (zu S. 21). Was hier „Raumgerüst“ genannt wird, pflegt man in Deutschland in abstrakterer Weise als „Koordinatensystem“ oder „Bezugssystem“ zu bezeichnen. Man stelle sich aber zunächst ein solches Raumgerüst als wirkliches, aus bestem Material (etwa Holz oder Stahl) gefertigtes Gerüst vor, an dem von einem Punkte ausgehend drei senkrecht aufeinanderstehende Maßstäbe von einiger Länge und außerdem Theodoliten angebracht sind, mit denen man die Lage jedes Körpers im Raum relativ zu dem Gerüst bestimmen kann. Die Abstraktion der drei aufeinander senkrechten Maßstäbe liefert das „Koordinaten- oder Bezugssystem“. Man erkennt dann sofort, daß bei einem bewegten Raumgerüst die Lorentz-Kontraktion wie bei jedem andern Körper eintritt.

Um das Raumgerüst zu einem „vierdimensionalen Raum-Zeitgerüst“ oder „Weltgerüst“ (vgl. S. 46) zu machen, braucht man außer den Maßstäben und Theodoliten nur noch Uhren anzubringen. Natürlich müssen

alle Messungen mit den Theodoliten wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit korrigiert werden (vgl. S. 49). Die Abstraktion liefert das vierdimensionale Raum-Zeit-Koordinatensystem.

⁴ (zu S. 34). Der weiße Ritter ist eine Märchenfigur aus „Through the Looking-Glass“, der Fortsetzung von „Alice in Wonderland“, einer in England allgemein bekannten Kindergeschichte, die von dem englischen Mathematiker Dodgson verfaßt und unter dem Pseudonym Lewis Carroll herausgegeben wurde.

Derselben Märchenerzählung, in der wie im Spiegel alles verkehrt ist, entstammen auch die „Kauderwelsch-Verse“ von S. 285 und die Figur der roten Königin von S. 337, die alles „relativ“ nimmt. Die Gestalten des Märchens sind lebendig gewordene Schachfiguren.

⁵ (zu S. 45). Die Folgerung aus der Relativitätstheorie, daß eine von ihrem Standort fortbewegte und wieder zurückgebrachte Uhr gegen eine am Platz gelassene zurückgeblieben sein muß, ist zuerst als Einwand gegen die Relativitätstheorie vorgebracht und besonders in Deutschland eine Zeit lang viel umstritten und als „Uhrenparadoxon“ bekannt geworden. Man meinte, daß nach dem Grundsatz der Relativität von jeder der beiden Uhren mit gleichem Recht behauptet werden könne, sie sei in Ruhe geblieben und die andere sei bewegt. Daher müsse beim Zusammentreffen jede mehr Pendelschläge gemacht haben, als die andere, so daß die Relativitätstheorie zu einem Widerspruch führe. Einstein deckte den Fehler in dieser Überlegung auf, indem er darauf hinwies, daß die Gleichberechtigung nur bei gleichförmiger Relativgeschwindigkeit gilt. Wenn dagegen durch Einwirkung äußerer Kräfte eine Beschleunigung herbeigeführt und ein Wiederzusammentreffen erzwungen wird (vgl. dazu S. 129), so gilt die Gleichberechtigung nicht mehr. Die Uhr, auf welche die äußeren Kräfte eingewirkt haben, während die andere eine freie Bewegung vollführte, hat weniger Pendelschläge gemacht. Das allgemeine Relativitätsprinzip besagt dann nur, daß man das Ereignis von beiden Bezugssystemen aus nach den gleichen Gesetzen beschreiben kann und selbstverständlich mit demselben Ergebnis. Man vergleiche darüber den Aufsatz von A. Einstein: Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie in der Zeitschrift „Die Naturwissenschaften“, Band 6, S. 697, 1918.

⁶ (zu S. 60). Man wird verstehen, daß hier unter „verschiedenen Maßsystemen“ solche gemeint sind, die sich auf verschiedene raumzeitliche Gerüste beziehen, nicht etwa solche, die sich durch die Wahl der Einheiten (z. B. Meter und Fuß) unterscheiden, woran man bei dem deutschen Ausdruck „Maßsystem“ zunächst zu denken gewohnt ist.

⁷ (zu S. 62). Über die Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit vgl. auch S. 129 und Anm. 9.

⁸ (zu S. 68). Der Vers ist ein bekanntes gleichfalls in „Through the Looking-Glass“ verwandtes englisches Kinderrätsel mit der Lösung, daß Humpty Dumpty ein Ei ist.

⁹ (zu S. 129). Hiernach kann man als Ergänzung der Ausführungen von S. 58 bis 62 über die Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit leicht erkennen, daß die Lichtgeschwindigkeit die Rolle einer Grenzgeschwin-

digkeit spielt in demselben Sinne, wie dies eine unendlich große Geschwindigkeit tut. Wer sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegte, würde sich in der Tat unendlich schnell bewegen, denn er würde jede beliebige Entfernung zurücklegen können, ohne daß ihm auch nur der kleinste Bruchteil einer Sekunde verstreicht. Er wäre ein Ahasverus, der bei seiner Wiederkehr die Welt um 500 Jahre gealtert fände, ohne selbst dem Tode näher gekommen zu sein. Aber er hätte auch auf seiner Reise nichts erlebt. Die 500 Erdenjahre wären für sein Bewußtsein wie verschlafen. Blicke er ständig auf Reisen, so würde er die Ewigkeit in einem Augenblick erleben, wenn er nicht auch eine Ewigkeit gebrauchte, um einen einzigen Gedanken zu fassen. Die Zeit existierte für ihn nicht. Und auch unser Raum würde für ihn nicht existieren, denn die Entfernung zwischen zwei Sternen, an denen er vorübereilte, würde zu Null zusammenschrumpfen. In Wahrheit ist es natürlich der Reisende mit Lichtgeschwindigkeit, der nicht existiert oder wenigstens nur ein Schattendasein als Grenzbegriff führt.

¹⁰ (zu S. 157). Hier zeigt sich wieder, wie vorteilhaft der Begriff eines materiellen Raumgerüsts ist (vgl. Anm. 3). Man erkennt ohne weiteres, daß es sinnlos ist, damit im Innern eines Atoms Messungen vornehmen zu wollen.

¹¹ (zu S. 167). Bis zur Zeit der Herausgabe dieser Übersetzung sind auf der Mount Wilson-Sternwarte durch Spektralmessungen an schwachen Nebeln bereits weit größere Geschwindigkeiten bis über 10 000 km/sec festgestellt, und zwar stets von uns fortgerichtete.

¹² (zu S. 227). In seiner grundlegenden Arbeit vom März 1927 sagt Heisenberg: „An der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes ‚Wenn wir die Gegenwart kennen, können wir die Zukunft berechnen‘ ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungsstücken prinzipiell nicht kennen lernen.“