

DIE NATUR DER PHYSIKALISCHEN WELT

VON SIR ARTHUR EDDINGTON



DIE GIFFORD VORLESUNGEN 1927
IN DEUTSCH

Der englische Astronom und Mathematiker **Sir Arthur Stanley Eddington** ist berühmt für seine Arbeiten zur Relativitätstheorie. Er ist auch als Wissenschaftsphilosoph und Popularisierer der Wissenschaft bekannt.

Über das Buch:

In diesen Vorlesungen erörtert der Autor Eddington einige der Ergebnisse des modernen Studiums der physikalischen Welt, die dem philosophischen Denken am meisten Nahrung geben. Dazu gehören neue Konzepte in der Wissenschaft und auch neue Erkenntnisse. In beiderlei Hinsicht werden wir dazu veranlasst, das materielle Universum auf eine Weise zu denken, die sich stark von derjenigen unterscheidet, die in der klassischen Physik vorherrscht.

Bei diesem Buch handelt es sich im Wesentlichen um die Gifford-Vorlesungen, die der Autor Eddington von Januar bis März 1927 an der Universität von Edinburgh gehalten hat. Es behandelt die philosophischen Folgen der großen Veränderungen des wissenschaftlichen Denkens. Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie haben zu merkwürdigen neuen Auffassungen von der physikalischen Welt geführt; der Fortschritt der Prinzipien der Thermodynamik hat einen allmählicheren, aber nicht weniger tiefgreifenden Wandel bewirkt.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT

EINLEITUNG

Kapitel I DER UNTERGANG DER KLASSISCHEN PHYSIK

Die Struktur des Atoms.

Die FitzGerald-Kontraktion.

Die Folgen der Kontraktion.

Der Rahmen des Raums.

Einwände des "gesunden Menschenverstands".

Kapitel II RELATIVITÄT

Das Einsteinsche Prinzip.

Relative und absolute Quantitäten.

Der Strukturplan der Natur.

Geschwindigkeit durch den Äther.

Ist die FitzGerald-Kontraktion real?

Kapitel III ZEIT

Die Zeit des "Astronomer Royal".

Ort der Ereignisse.

Absolute Vergangenheit und Zukunft.

Die absolute Unterscheidung von Raum und Zeit.

Die vierdimensionale Welt.

Die Geschwindigkeit des Lichts.

Praktische Anwendungen.

Kapitel IV DER UNTERGANG DES UNIVERSUMS

Schlurfen.

Der Pfeil der Zeit.

Koinzidenzen.

Das primäre und das sekundäre Gesetz.

Thermodynamisches Gleichgewicht.

Sind Raum und Zeit unendlich?

Kapitel V "WERDEN"

Verknüpfung von Entropie und Werden.

Die dynamische Qualität der Außenwelt.

Die Objektivität des Werdens.

Unsere doppelte Wahrnehmung der Zeit.

Die wissenschaftliche Reaktion auf die mikroskopische Analyse.

Unzulänglichkeit des Primärgesetzes.

Kapitel VI GRAVITATION - DAS GESETZ

Der Mann im Aufzug.

Ein neues Gesetz der Gravitation.

Das Gesetz der Bewegung.

Relativität der Beschleunigung.

Geometrie der Zeit.

Geometrie und Mechanik.

Kapitel VII GRAVITATION-DIE ERKLÄRUNG

Das Gesetz der Krümmung.

Relativität der Länge.

Vorhersagen aus dem Gesetz.

Nicht leerer Raum.

Nicht-euklidische Geometrie.

Kapitel VIII DER PLATZ DES MENSCHEN IM UNIVERSUM

Das siderische Universum.

Die Skala der Zeit.

Pluralität der Welten.

Entstehung von Planetensystemen.

Kapitel IX DIE QUANTENTHEORIE

Der Ursprung des Problems.

Das Atom der Aktion.

Konflikt mit der Wellentheorie des Lichts.

Die Theorie des Atoms.

Beziehung zwischen den klassischen Gesetzen
und den Quantengesetzen.

Kapitel X DIE NEUE QUANTENTHEORIE

Die Wellentheorie der Materie.

Übergang zu einer neuen Theorie.

Die Entwicklung der Neuen Quantentheorie.

Skizze von Schrödingers Theorie.

Das Prinzip der Unbestimmtheit.

Eine neue Erkenntnistheorie.

Kapitel XI DER AUFBAU DER WELT

Beziehungsstruktur.

Symmetrische Koeffizienten (10).

Antisymmetrische Koeffizienten (6).

Selektive Beeinflussung des Geistes.

Drei Arten von Gesetzen.

Kapitel XII ABLESEN VON ZEIGERN

Vertraute Begriffe und wissenschaftliche Symbole

Das Wesen der exakten Wissenschaft.

Die zyklische Methode der Physik.

Die Wirklichkeit

"Was ist Mr. X?"

Kapitel XIII REALITÄT

Das Reale und das Konkrete.

Geistige Dinge.

Die Definition der Wirklichkeit.

Physikalische Illustrationen.

Kapitel XIV VERURSACHUNG

Verursachung und der Pfeil der Zeit.

Vorhersagbarkeit von Ereignissen.

Der neue erkenntnistheoretische Ausblick.

Das Prinzip der Unbestimmtheit.

Natürliches und Übernatürliches.

Die Freiwilligkeit.

Beeinflussung der statistischen Gesetze.

Kapitel XV WISSENSCHAFT UND MYSTIK

Symbolisches Wissen und intimes Wissen.

Verteidigung des Mystizismus.

Realität und Mystik.

Bedeutung und Werte.

Überzeugung.

Mystische Religion.

SCHLUSSFOLGERUNG

Stichwortverzeichnis

Buchtipps

VORWORT

Dieses Buch ist im Wesentlichen die Folge der Gifford-Vorlesungen, die ich von Januar bis März 1927 an der Universität Edinburgh gehalten habe. Es behandelt die philosophischen Folgen der großen Veränderungen des wissenschaftlichen Denkens, die sich in letzter Zeit vollzogen haben. Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie haben zu merkwürdigen neuen Auffassungen von der physikalischen Welt geführt; der Fortschritt der Prinzipien der Thermodynamik hat einen allmählicheren, aber nicht weniger tiefgreifenden Wandel bewirkt. Die ersten elf Kapitel befassen sich größtenteils mit den neuen physikalischen Theorien, mit den Gründen, die zu ihrer Annahme geführt haben, und insbesondere mit den Vorstellungen, die ihnen zugrunde zu liegen scheinen. Ziel ist es, das wissenschaftliche Weltbild, wie es sich heute darstellt, zu verdeutlichen und dort, wo es unvollständig ist, zu beurteilen, in welche Richtung die modernen Ideen zu tendieren scheinen. In den letzten vier Kapiteln befaße ich mich mit der Position, die diese wissenschaftliche Sichtweise in Bezug auf die weiteren Aspekte der menschlichen Erfahrung, einschließlich der Religion, einnehmen sollte. Der allgemeine Geist der in den Vorlesungen verfolgten Untersuchung wird im letzten Absatz der Einleitung dargelegt.

Ich hoffe, dass die wissenschaftlichen Kapitel auch unabhängig von den späteren Anwendungen des Buches mit Interesse gelesen werden können; allerdings sind sie nicht ganz so geschrieben, wie es der Fall gewesen wäre, wenn sie völlig unabhängig gewesen wären. Es würde meinem Zweck nicht dienen, eine einfache Einführung in die

Grundlagen der Relativitäts- und Quantentheorien zu geben; es war unerlässlich, zu den späteren und abgründigeren Entwicklungen zu gelangen, in denen die Konzepte von größter philosophischer Bedeutung zu finden sind. Während ein großer Teil des Buches relativ leicht zu lesen sein dürfte, müssen Argumente von beträchtlichem Schwierigkeitsgrad nacheinander angegangen werden.

Mein Hauptziel war es, zu zeigen, dass diese wissenschaftlichen Entwicklungen neues Material für den Philosophen liefern. Ich bin jedoch darüber hinausgegangen und habe aufgezeigt, wie ich selbst denke, dass das Material genutzt werden könnte. Ich bin mir darüber im Klaren, dass die hier dargelegten philosophischen Ansichten nur insoweit Beachtung finden können, als sie das unmittelbare Ergebnis des Studiums und des Verständnisses der modernen wissenschaftlichen Arbeit sind. Allgemeine Vorstellungen von der Natur der Dinge, die ich mir abgesehen von dieser besonderen Anregung durch die Wissenschaft gebildet haben mag, sind nur für mich von Bedeutung. Aber obwohl die beiden Ideenquellen in meinem Kopf ziemlich klar voneinander getrennt waren, als ich mit der Vorbereitung dieser Vorlesungen begann, haben sie sich in dem Bemühen, zu einer kohärenten Sichtweise zu gelangen und diese gegen wahrscheinliche Kritik zu verteidigen, untrennbar miteinander verbunden. Aus diesem Grund möchte ich daran erinnern, dass die idealistische Färbung meiner Vorstellung von der physischen Welt aus den mathematischen Forschungen zur Relativitätstheorie hervorgegangen ist. Soweit ich früher philosophische Ansichten hatte, waren sie von ganz anderer Natur.

Von Anfang an war ich skeptisch, ob es für einen Wissenschaftler wünschenswert ist, sich so weit in außerwissenschaftliches Gebiet vorzuwagen. Die primäre Rechtfertigung für eine solche Expedition besteht darin,

dass sie einen besseren Blick auf sein eigenes wissenschaftliches Gebiet ermöglichen kann. In den mündlichen Vorträgen schien es keine große Indiskretion zu sein, frei über die verschiedenen Vorschläge zu sprechen, die ich anzubieten hatte. Aber es war schwierig zu entscheiden, ob sie dauerhaft aufgezeichnet werden und ein fertigeres Aussehen erhalten sollten. Ich habe viel zu befürchten von den sachkundigen philosophischen Kritikern, aber ich bin noch mehr besorgt bei dem Gedanken an die Leser, die nachsehen könnten, ob das Buch "auf der Seite der Engel" steht und seine Vertrauenswürdigkeit dementsprechend beurteilen. Während des Jahres, das seit der Ablieferung der Vorlesungen verstrichen ist, habe ich viele Anstrengungen unternommen, diesen und andere Teile des Buches zu etwas zu formen, mit dem ich mich besser zufrieden fühlen könnte. Ich gebe es jetzt mit größerer Zurückhaltung heraus, als ich es bei früheren Büchern getan habe.

Der Konversationsstil des Hörsaals wird allgemein als eher ungeeignet für ein langes Buch angesehen, aber ich habe beschlossen, ihn nicht zu ändern. Wenn ein wissenschaftlicher Autor auf die mathematischen Formeln verzichtet, die sein natürliches und klarstes Ausdrucksmittel sind, kann er im Gegenzug vielleicht ein gewisses Zugeständnis vom Leser verlangen. Viele Teile des Themas sind von Natur aus so schwierig, dass meine einzige Hoffnung, verstanden zu werden, darin besteht, die Punkte so zu erklären, wie ich es tun würde, wenn ich einem Fragesteller gegenüberstünde.

Es mag notwendig sein, den amerikanischen Leser daran zu erinnern, dass sich unsere Nomenklatur für große Zahlen von der seinen unterscheidet, so dass eine Milliarde hier eine Million bedeutet.

A. S. E.

August 1928

EINLEITUNG

Ich habe mich an die Aufgabe gemacht, diese Vorlesungen zu schreiben, und habe meine Stühle an meine beiden Tische gerückt. Zwei Tische! Ja, ich habe von jedem Gegenstand zwei Exemplare um mich herum - zwei Tische, zwei Stühle, zwei Stifte.

Das ist kein besonders tiefgründiger Beginn eines Kurses, der die transzendenten Ebenen der wissenschaftlichen Philosophie erreichen soll. Aber wir können den Grundstein nicht sofort berühren; wir müssen zuerst ein wenig an der Oberfläche der Dinge kratzen. Und wann immer ich anfangen zu kratzen, stoße ich als erstes auf meine beiden Tische.

Einer von ihnen ist mir seit frühester Kindheit vertraut. Es ist ein alltäglicher Gegenstand aus der Umgebung, die ich Welt nenne. Wie soll ich es beschreiben? Er hat Ausmaße, er ist relativ beständig, er ist farbig und vor allem ist er substantiell. Mit substantiell meine ich nicht nur, dass er nicht zusammenbricht, wenn ich mich auf ihn stütze; ich meine, dass er aus "Substanz" besteht, und mit diesem Wort versuche ich, Ihnen eine Vorstellung von seiner eigentlichen Natur zu vermitteln. Es ist ein Ding, nicht wie der Raum, der eine bloße Negation ist, und auch nicht wie die Zeit, die - weiß der Himmel was - ist. Aber das wird Ihnen nicht helfen, mich zu verstehen, denn es ist das charakteristische Merkmal eines "Dings", diese Substantialität zu haben, und ich glaube nicht, dass man Substantialität besser beschreiben kann, als wenn man sagt, dass es die Art von Natur ist, die ein gewöhnlicher Tisch verkörpert. Und so drehen wir uns im Kreis.^ Denn wenn Sie ein einfacher, vernünftiger Mensch sind, der sich

nicht allzu sehr um wissenschaftliche Skrupel schert, werden Sie sicher sein, dass Sie das Wesen eines gewöhnlichen Tisches verstehen. Ich habe sogar schon von einfachen Menschen gehört, die die Idee hatten, dass sie das Geheimnis ihrer eigenen Natur besser verstehen könnten, wenn Wissenschaftler einen Weg finden würden, es mit Hilfe der leicht verständlichen Natur einer Tabelle zu erklären.

Tabelle Nr. 2 ist meine wissenschaftliche Tabelle. Ich habe sie erst vor kurzem kennengelernt und fühle mich nicht so vertraut mit ihr. Er gehört nicht zu der bereits erwähnten Welt - jener Welt, die spontan um mich herum erscheint, wenn ich die Augen öffne, obwohl ich hier nicht berücksichtige, wie viel davon objektiv und wie viel subjektiv ist. Es ist Teil einer Welt, die sich meiner Aufmerksamkeit auf hinterhältigere Weise aufgedrängt hat. Mein wissenschaftlicher Tisch besteht hauptsächlich aus Leere. In dieser Leere sind¹ zahlreiche elektrische Ladungen verstreut, die mit großer Geschwindigkeit umher eilen; aber ihre Gesamtmasse beträgt weniger als ein Milliardstel der Masse des Tisches selbst. Trotz seiner merkwürdigen Konstruktion erweist sich der Tisch als äußerst effizient. Er stützt mein Schreibpapier genauso zufriedenstellend wie Tisch Nr. 1; denn wenn ich das Papier darauf lege, treffen die kleinen elektrischen Teilchen mit ihrer rasenden Geschwindigkeit immer wieder auf die Unterseite, so dass das Papier in Federballmanier in einer fast gleichmäßigen Höhe gehalten wird. Wenn ich mich auf diesen Tisch stütze, werde ich nicht durchgehen; oder, um genau zu sein, ist die Wahrscheinlichkeit, dass mein wissenschaftlicher Ellenbogen durch meinen wissenschaftlichen Tisch geht, so gering, dass man sie im praktischen Leben vernachlässigen kann. Wenn man die Eigenschaften der beiden Tische einzeln betrachtet, scheint es für gewöhnliche Zwecke keinen Grund zu geben, sich für einen der beiden Tische zu entscheiden; aber wenn

außergewöhnliche Umstände eintreten, ist mein wissenschaftlicher Tisch im Vorteil. Wenn das Haus Feuer fängt, wird sich mein wissenschaftlicher Tisch ganz natürlich in wissenschaftlichen Rauch auflösen, während mein vertrauter Tisch eine Metamorphose seiner substanziellen Natur erfährt, die ich nur als wundersam bezeichnen kann.

An meinem zweiten Tisch ist nichts Substantielles. Es ist fast nur leerer Raum - ein Raum, der zwar von Kraftfeldern durchdrungen ist, die aber der Kategorie der "Einflüsse" und nicht der "Dinge" zugeordnet werden. Selbst auf den winzigen Teil, der nicht leer ist, dürfen wir nicht den alten Begriff der Substanz übertragen. Indem wir die Materie in elektrische Ladungen zerlegen, haben wir uns weit von dem Bild entfernt, aus dem der Begriff der Substanz ursprünglich hervorging, und die Bedeutung dieses Begriffs - wenn er denn je eine hatte - ist auf dem Weg verloren gegangen. Die gesamte Tendenz der modernen wissenschaftlichen Ansichten geht dahin, die getrennten Kategorien "Dinge", "Einflüsse", "Formen" usw. aufzulösen und durch einen gemeinsamen Hintergrund aller Erfahrungen zu ersetzen. Ob wir nun ein materielles Objekt, ein magnetisches Feld, eine geometrische Figur oder eine Zeitspanne untersuchen, unsere wissenschaftlichen Informationen werden in Maßen zusammengefasst; weder der Messapparat noch die Art und Weise, wie er verwendet wird, lassen darauf schließen, dass es bei diesen Problemen etwas wesentlich anderes gibt. Die Maße selbst bieten keinen Grund für eine Klassifizierung nach Kategorien. Wir halten es für notwendig, den Maßen einen gewissen Hintergrund zuzugestehen - eine äußere Welt; aber die Eigenschaften dieser Welt, außer in dem Maße, wie sie sich in den Maßen widerspiegeln, entziehen sich einer wissenschaftlichen Untersuchung. Die Wissenschaft hat sich endlich dagegen gewehrt, das genaue Wissen, das in diesen Messungen enthalten ist, an eine traditionelle Bildergalerie von Vorstellungen zu knüpfen, die

keine authentischen Informationen über den Hintergrund vermitteln und Irrelevantes in das Schema des Wissens einfügen.

Ich werde die Nicht-Substanzialität der Elektronen hier nicht weiter betonen, da sie für den vorliegenden Gedankengang kaum notwendig ist. Stellen Sie sie sich so substanziiell vor, wie Sie wollen, es besteht ein gewaltiger Unterschied zwischen meiner wissenschaftlichen Tabelle mit ihrer Substanz (wenn überhaupt), die dünn in Flecken in einer größtenteils leeren Region verstreut ist, und der Tabelle der alltäglichen Vorstellung, die wir als den Typus einer soliden Realität betrachten - ein leibhaftiger Protest gegen den Berkle'schen Subjektivismus. Es macht einen großen Unterschied, ob das Papier vor mir auf einem Fliegenschwarm balanciert und von einer Reihe winziger Schläge des darunter befindlichen Schwarms gestützt wird, oder ob es gestützt wird, weil sich darunter eine Substanz befindet, denn es liegt in der Natur der Substanz, den Raum unter Ausschluss anderer Substanz einzunehmen; ein großer Unterschied zumindest in der Vorstellung, aber kein Unterschied für meine praktische Aufgabe, auf das Papier zu schreiben.

Ich brauche Ihnen nicht zu sagen, dass die moderne Physik mir durch heikle Tests und unerbittliche Logik versichert hat, dass meine zweite wissenschaftliche Tabelle die einzige ist, die wirklich da ist - wo immer "da" auch sein mag. Andererseits brauche ich Ihnen nicht zu sagen, dass es der modernen Physik niemals gelingen wird, die erste Tabelle - eine seltsame Mischung aus äußerer Natur, geistigen Vorstellungen und ererbten Vorurteilen - zu vertreiben, die für meine Augen sichtbar und für mich greifbar ist. Wir müssen uns vorerst von ihr verabschieden, denn wir sind dabei, uns von der vertrauten Welt der wissenschaftlichen Welt zuzuwenden, die die Physik

offenbart. Diese Welt ist eine ganz und gar äußere Welt, oder soll es zumindest sein.

"Sie sprechen paradoxerweise von zwei Welten. Sind das nicht eigentlich zwei Aspekte oder zwei Interpretationen ein und derselben Welt?"

Ja, zweifellos sind sie letztendlich auf irgendeine Weise zu identifizieren. Aber der Prozess, durch den die äußere Welt der Physik in eine Welt verwandelt wird, die dem menschlichen Bewusstsein vertraut ist, liegt außerhalb des Bereichs der Physik. Und so bleibt die Welt, "die mit den Methoden der Physik untersucht wird, von der dem Bewusstsein vertrauten Welt getrennt, bis der Physiker seine Arbeit an ihr beendet hat. Vorläufig betrachten wir daher die Tabelle, die Gegenstand der physikalischen Forschung ist, als völlig getrennt von der vertrauten Tabelle, ohne der Frage ihrer endgültigen Identifizierung vorzugreifen. Es stimmt, dass die gesamte wissenschaftliche Untersuchung von der vertrauten Welt ausgeht und am Ende zur vertrauten Welt zurückkehren muss; aber der Teil der Reise, für den der Physiker verantwortlich ist, liegt auf fremdem Gebiet.

Bis vor kurzem gab es noch eine viel engere Verbindung. Der Physiker entlieh das Rohmaterial für seine Welt aus der vertrauten Welt, aber das tut er nicht mehr. Seine Rohstoffe sind Äther, Elektronen, Quanten, Potenziale, Hamilton-Funktionen usw., und er ist heutzutage peinlich genau darauf bedacht, diese vor Verunreinigungen durch Konzepte aus der anderen Welt zu schützen. Es gibt eine vertraute Tabelle parallel zur wissenschaftlichen Tabelle, aber es gibt kein vertrautes Elektron, Quantum oder Potential parallel zum wissenschaftlichen Elektron, Quantum oder Potential. Wir haben nicht einmal den Wunsch, ein vertrautes Gegenstück zu diesen Dingen zu schaffen oder, wie wir gemeinhin sagen würden, das Elektron zu "erklären".

Nachdem der Physiker seine Welterschaffung abgeschlossen hat, ist eine Verknüpfung oder Identifizierung erlaubt; aber verfrühte Versuche einer Verknüpfung haben sich als völlig unheilvoll erwiesen.

Die Wissenschaft zielt darauf ab, eine Welt zu erschaffen, die symbolisch für die Welt der alltäglichen Erfahrung ist. Es ist keineswegs notwendig, dass jedes einzelne Symbol, das verwendet wird, etwas aus der allgemeinen Erfahrung repräsentiert oder sogar etwas, das aus der allgemeinen Erfahrung heraus erklärbar ist. Der Mann auf der Straße verlangt immer nach einer konkreten Erklärung für die Dinge, auf die sich die Wissenschaft bezieht; aber er muss zwangsläufig enttäuscht werden. Es ist wie unsere Erfahrung beim Lesenlernen. Das, was in einem Buch steht, ist ein Symbol für eine Geschichte im wirklichen Leben. Die ganze Absicht des Buches besteht darin, dass der Leser letztendlich ein Symbol, z.B. BROT, mit einer der Vorstellungen des vertrauten Lebens identifiziert. Aber es ist boshaft, solche Identifizierungen vorschnell zu versuchen, bevor die Buchstaben zu Wörtern und die Wörter zu Sätzen aneinandergereiht sind. Das Symbol A ist nicht das Gegenstück zu irgendetwas im vertrauten Leben. Dem Kind würde der Buchstabe A furchtbar abstrakt vorkommen; also geben wir ihm eine vertraute Vorstellung mit auf den Weg. "A war ein Bogenschütze, der auf einen Frosch schoss." Damit ist seine unmittelbare Schwierigkeit behoben, aber er kann keine ernsthaften Fortschritte bei der Wortbildung machen, solange Bogenschützen, Metzger, Kapitäne um die Buchstaben herumtanzen. Die Buchstaben sind abstrakt, und früher oder später muss er es begreifen. In der Physik sind wir über die Definitionen von Bogenschützen und Apfelkuchen für die grundlegenden Symbole hinausgewachsen. Auf die Frage, was ein Elektron eigentlich sein soll, können wir nur antworten: "Es ist ein Teil des A B C der Physik".

Die äußere Welt der Physik ist damit zu einer Welt der Schatten geworden. Indem wir unsere Illusionen beseitigt haben, haben wir die Substanz beseitigt, denn wir haben ja gesehen, dass die Substanz eine der größten unserer Illusionen ist. Später werden wir uns vielleicht fragen, ob wir in unserem Eifer, alles Unwirkliche herauszuschneiden, das Messer nicht zu rücksichtslos eingesetzt haben. Vielleicht ist die Realität tatsächlich ein Kind, das ohne seine Amme nicht überleben kann. Aber wenn dem so ist, ist das für den Wissenschaftler von geringer Bedeutung. Er hat gute und ausreichende Gründe, seine Untersuchungen in der Welt der Schatten fortzusetzen und begnügt sich damit, die Bestimmung ihres genauen Status in Bezug auf die Realität dem Philosophen zu überlassen. In der Welt der Physik beobachten wir eine schattenhafte Aufführung des Dramas des vertrauten Lebens. Der Schatten meines Ellbogens ruht auf dem Schattentisch, während die Schattentinte über das Schattenpapier fließt. Es ist alles symbolisch, und als Symbol belässt es der Physiker. Dann kommt der Alchemist Mind, der die Symbole umwandelt. Die spärlich verteilten Kerne der elektrischen Kraft werden zu einem greifbaren Festkörper; ihre rastlose Unruhe wird zur Wärme des Sommers; die Oktave der ätherischen Schwingungen wird zu einem prächtigen Regenbogen. Und auch die Alchemie hört hier nicht auf. In der umgewandelten Welt entstehen neue Bedeutungen, die in der Welt der Symbole kaum zu finden sind, so dass es eine Welt der Schönheit und des Sinns wird - und leider auch des Leidens und des Bösen.

Die freimütige Erkenntnis, dass sich die physikalische Wissenschaft mit einer Welt der Schatten befasst, ist einer der bedeutendsten Fortschritte der letzten Zeit. Damit will ich nicht sagen, dass sich die Physiker in irgendeiner Weise mit den philosophischen Implikationen dieser Erkenntnis befassen. Aus ihrer Sicht ist es nicht so sehr eine Rücknahme unhaltbarer Behauptungen als vielmehr eine

Behauptung der Freiheit zur autonomen Entwicklung. Im Moment betone ich den schattenhaften und symbolischen Charakter der Welt der Physik nicht, weil er sich auf die Philosophie auswirkt, sondern weil die Distanz zu vertrauten Vorstellungen in den wissenschaftlichen Theorien, die ich beschreiben muss, deutlich wird. Wenn Sie auf diese Distanz nicht vorbereitet sind, werden Sie wahrscheinlich kein Verständnis für die modernen wissenschaftlichen Theorien aufbringen und sie vielleicht sogar für lächerlich halten - so wie es viele Menschen tun, wage ich zu behaupten.

Es ist schwierig, uns beizubringen, die physische Welt als rein symbolisch zu betrachten. Wir werden immer wieder rückfällig und vermischen mit den Symbolen unpassende Vorstellungen aus der Welt des Bewusstseins. Unbelehrt durch lange Erfahrung strecken wir die Hand aus, um den Schatten zu fassen, anstatt seine schattenhafte Natur zu akzeptieren. Wenn wir uns nicht gänzlich auf die mathematische Symbolik beschränken, ist es in der Tat schwer zu vermeiden, dass wir unsere Symbole in ein trügerisches Gewand kleiden. Wenn ich an ein Elektron denke, kommt mir eine harte, rote, winzige Kugel in den Sinn; das Proton ist in ähnlicher Weise neutral grau. Natürlich ist die Farbe absurd - vielleicht nicht absurder als der Rest des Konzepts - aber ich bin unverbesserlich. Ich kann gut verstehen, dass die Jüngeren diese Bilder zu konkret finden und danach streben, die Welt aus Hamiltonschen Funktionen und Symbolen zu konstruieren, die so weit von der menschlichen Vorstellungskraft entfernt sind, dass sie nicht einmal den Gesetzen der orthodoxen Arithmetik gehorchen. Ich selbst habe einige Schwierigkeiten, mich auf diese Ebene des Denkens zu begeben, aber ich bin überzeugt, dass es kommen muss.

In diesen Vorlesungen möchte ich einige der Ergebnisse der modernen Erforschung der physischen Welt erörtern, die

den meisten Anlass zum philosophischen Nachdenken geben. Dazu gehören neue Konzepte in der Wissenschaft und auch neue Erkenntnisse. In beiderlei Hinsicht werden wir dazu veranlasst, das materielle Universum auf eine ganz andere Weise zu denken als noch Ende des letzten Jahrhunderts. Ich möchte den Hintergedanken, den ein Gifford Lecturer haben muss, nicht aus den Augen lassen: das Problem, diese rein physikalischen Entdeckungen mit den umfassenderen Aspekten und Interessen unserer menschlichen Natur in Verbindung zu bringen. Diese Beziehungen haben sich zwangsläufig verändert, da sich unsere gesamte Auffassung von der physischen Welt radikal gewandelt hat. Ich bin davon überzeugt, dass eine gerechte Würdigung der physischen Welt, wie sie heute verstanden wird, ein Gefühl der Aufgeschlossenheit gegenüber einer umfassenderen Bedeutung mit sich bringt, die über die wissenschaftliche Messung hinausgeht und die vor einer Generation vielleicht unlogisch erschienen wäre. Aber ich wäre der Wissenschaft gegenüber untreu, wenn ich nicht darauf bestehen würde, dass ihr Studium ein Selbstzweck ist. Der Weg der Wissenschaft muss um seiner selbst willen beschritten werden, unabhängig von den Aussichten, die er auf eine umfassendere Landschaft bieten mag; in diesem Sinne müssen wir dem Weg folgen, ob er nun auf den Hügel der Vision oder in den Tunnel der Finsternis führt. Bis zur letzten Etappe des Weges müssen Sie sich also damit begnügen, mit mir den ausgetretenen Pfaden der Wissenschaft zu folgen, und mich nicht zu sehr dafür schelten, dass ich mich zwischen ihren Blüten am Wegesrand herumtreibe. Das soll die Abmachung zwischen uns sein. Sollen wir beginnen?

Kapitel I

DER UNTERGANG DER KLASSISCHEN PHYSIK

Die Struktur des Atoms.

Zwischen 1905 und 1908 haben Einstein und Minkowski unsere Vorstellungen von Zeit und Raum grundlegend verändert. Im Jahr 1911 führte Rutherford die größte Veränderung unserer Vorstellung von Materie seit der Zeit von Demokrit ein. Die Rezeption dieser beiden Veränderungen war merkwürdig unterschiedlich. Die neuen Vorstellungen von Raum und Zeit wurden von allen Seiten als revolutionär angesehen; sie wurden von den einen mit größter Begeisterung und von den anderen mit schärfstem Widerstand aufgenommen. Die neue Vorstellung von der Materie durchlief die übliche Erfahrung wissenschaftlicher Entdeckungen; sie bewies allmählich ihren Wert, und als die Beweise überwältigend überzeugend wurden, verdrängte sie in aller Ruhe die früheren Theorien. Es gab keinen großen Schock. Und doch, wenn ich heute Proteste gegen den Bolschewismus der modernen Wissenschaft und das Bedauern über die alte Ordnung höre, bin ich geneigt zu glauben, dass Rutherford und nicht Einstein der wahre Schurke ist. Wenn wir das Universum, wie es jetzt sein soll, mit dem Universum vergleichen, wie wir es uns normalerweise vorgestellt hatten, ist die verblüffendste Veränderung nicht die Neuordnung von Raum und Zeit durch Einstein, sondern die Auflösung all dessen, was wir als äußerst solide betrachten, in winzige Flecken, die im Nichts schweben. Das versetzt all jenen, die glauben, dass die Dinge mehr oder weniger das sind, was sie zu sein

scheinen, einen herben Dämpfer. Die Enthüllung der Leere im Inneren des Atoms durch die moderne Physik ist beunruhigender als die Enthüllung der immensen Leere des interstellaren Raums durch die Astronomie.

Das Atom ist so porös wie das Sonnensystem. Wenn wir den gesamten ungefüllten Raum im Körper eines Menschen eliminieren und seine Protonen und Elektronen zu einer Masse zusammenfassen würden, würde der Mensch auf einen Fleck reduziert, der nur noch mit einer Lupe sichtbar ist.

Diese Porosität der Materie wurde in der Atomtheorie nicht vorausgesagt. Sicherlich war bekannt, dass in einem Gas wie Luft die Atome weit voneinander entfernt sind und viel leeren Raum hinterlassen. Aber es war zu erwarten, dass eine Materie mit den Eigenschaften der Luft relativ wenig Substanz haben würde, und "luftiges Nichts" ist ein gängiger Ausdruck für das Substanzlose. In Festkörpern sind die Atome dicht gepackt, so dass die alte Atomtheorie mit unseren Vorurteilen übereinstimmte, indem sie feste Körper als hauptsächlich substanzvoll ohne große Zwischenräume betrachtete.

Die elektrische Theorie der Materie, die gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts aufkam, änderte diese Ansicht zunächst nicht. Man wusste, dass die negative Elektrizität in Ladungseinheiten von sehr geringem Volumen konzentriert war, aber den anderen Bestandteil der Materie, die positive Elektrizität, stellte man sich als eine Geleekugel mit denselben Abmessungen wie das Atom vor, in die die winzigen negativen Ladungen eingebettet waren. Auf diese Weise war der Raum im Inneren eines Festkörpers immer noch größtenteils gut ausgefüllt.

Aber 1911 zeigte Rutherford, dass auch die positive Elektrizität in winzigen Flecken konzentriert war. Seine

Streuexperimente bewiesen, dass das Atom in der Lage war, große elektrische Kräfte auszuüben, was unmöglich wäre, wenn die positive Ladung nicht als hochkonzentrierte Anziehungsquelle fungieren würde; sie muss in einem Kern enthalten sein, der im Vergleich zu den Abmessungen des Atoms winzig ist. So wurde zum ersten Mal das Hauptvolumen des Atoms vollständig evakuiert und ein Atom vom Typ "Sonnensystem" wurde durch eine große "Billardkugel" ersetzt. Zwei Jahre später entwickelte Niels Bohr seine berühmte Theorie auf der Grundlage des Rutherford-Atoms, und seither wurden rasante Fortschritte erzielt. Unabhängig davon, welche weiteren Veränderungen sich abzeichnen, ist eine Rückkehr zu den alten substanzialen Atomen nicht denkbar.

Die heute akzeptierte Schlussfolgerung ist, dass alle Arten von Materie letztlich aus zwei elementaren Bestandteilen zusammengesetzt sind - Protonen und Elektronen. Elektrisch gesehen sind sie genau entgegengesetzt, denn das Proton hat eine positive elektrische Ladung und das Elektron eine negative elektrische Ladung. Aber in anderer Hinsicht sind ihre Eigenschaften sehr unterschiedlich. Das Proton hat die 1840-fache Masse des Elektrons, so dass fast die gesamte Masse der Materie auf die Protonen zurückzuführen ist, aus denen es besteht. Das Proton kommt nur im Wasserstoff vor, der die primitivste Form der Materie zu sein scheint, da sein Atom aus einem Proton und einem Elektron besteht. In anderen Atomen sind eine Reihe von Protonen und eine geringere Anzahl von Elektronen zu einem Kern zusammengekittet; die Elektronen, die zum Ausgleich benötigt werden, sind wie entfernte Satelliten des Kerns verstreut und können sogar aus dem Atom entweichen und frei durch das Material wandern. Der Durchmesser eines Elektrons beträgt etwa 1/50.000 des Durchmessers eines Atoms; der des Kerns ist nicht sehr viel größer; ein isoliertes Proton soll noch viel kleiner sein.

Vor dreißig Jahren gab es eine heftige Debatte über die Frage, ob die Erde, die sich um die Sonne bewegt, den Äther mit sich reißt. Damals wurde die Festigkeit des Atoms nicht in Frage gestellt, und es war schwer zu glauben, dass sich die Materie durch den Äther schieben könnte, ohne ihn zu stören. Es war überraschend und verwirrend, als man bei Experimenten feststellte, dass keine Konvektion des Äthers stattfand. Aber jetzt wissen wir, dass der Äther durch die Atome genauso leicht hindurchschlüpfen kann wie durch das Sonnensystem, und unsere Erwartung geht in die andere Richtung.

Wir werden in späteren Kapiteln auf das "Sonnensystem"-Atom zurückkommen. Im Moment sind die beiden Dinge, die uns interessieren, (1) seine extreme Leere und (2) die Tatsache, dass es aus elektrischen Ladungen besteht.

Rutherfords Kerntheorie des Atoms wird gewöhnlich nicht zu den wissenschaftlichen Revolutionen dieses Jahrhunderts gezählt. Es war eine weitreichende Entdeckung, aber eine Entdeckung, die in das klassische Schema der Physik fällt. Das Wesen und die Bedeutung der Entdeckung lassen sich in einfachen Worten ausdrücken, d.h. in Form von Konzepten, die in der Wissenschaft bereits vorherrschten. Das Prädikat "revolutionär" wird gewöhnlich für zwei große moderne Entwicklungen reserviert - die Relativitätstheorie und die Quantentheorie. Dabei handelt es sich nicht nur um neue Entdeckungen in Bezug auf den Inhalt der Welt, sondern auch um Veränderungen in unserer Denkweise über die Welt. Sie lassen sich nicht sofort in einfachen Worten ausdrücken, denn wir müssen zunächst neue Konzepte begreifen, die im klassischen Schema der Physik ungeahnt waren.

Ich bin mir nicht sicher, ob der Begriff "klassische Physik" jemals genau definiert worden ist. Aber die allgemeine Idee ist, dass das von Newton in den Principia entwickelte

Schema der Naturgesetze ein pattern lieferte, von dem man erwarten konnte, dass alle nachfolgenden Entwicklungen ihm folgen würden. Innerhalb der vier Ecken des Schemas waren große Veränderungen der Sichtweise möglich; die Wellentheorie des Lichts löste die Korpuskular-Theorie ab; Wärme wurde von der Substanz (kalorisch) zur Bewegungsenergie; Elektrizität von einer kontinuierlichen Flüssigkeit zu Spannungskernen im Äther. Aber all dies wurde in der Elastizität des ursprünglichen Schemas berücksichtigt. Wellen, kinetische Energie und Dehnung hatten bereits ihren Platz in dem Schema; und die Anwendung derselben Konzepte zur Erklärung einer breiteren Palette von Phänomenen war ein Tribut an die Umfassendheit von Newtons ursprünglicher Perspektive.

Wir müssen nun sehen, wie das klassische Schema zusammenbrach.

Die FitzGerald-Kontraktion.

Wir können am besten von der folgenden Tatsache ausgehen. Nehmen wir an, Sie haben einen Stab, der sich mit sehr hoher Geschwindigkeit bewegt. Lassen Sie ihn zunächst quer zu seiner Bewegungsrichtung zeigen. Drehen Sie ihn nun um einen rechten Winkel, so dass er sich entlang der Bewegungslinie befindet. Der Stab zieht sich zusammen. Er ist kürzer, wenn er entlang der Bewegungslinie liegt, als wenn er quer zur Bewegungslinie liegt.

Diese Kontraktion, die so genannte FitzGerald-Kontraktion, ist unter allen gewöhnlichen Umständen äußerst gering. Sie hängt überhaupt nicht vom Material des Stabes ab, sondern nur von der Geschwindigkeit. Wenn die Geschwindigkeit beispielsweise 19 Meilen pro Sekunde beträgt - die

Geschwindigkeit der Erde um die Sonne -, beträgt die Längenkontraktion 1 Teil in 200.000.000 oder $2\frac{1}{2}$ Zoll im Durchmesser der Erde.

Das älteste und bekannteste ist das Michelson-Morley-Experiment aus dem Jahr 1887, das von Morley und Miller im Jahr 1905 mit größerer Genauigkeit wiederholt und in den letzten ein oder zwei Jahren von mehreren Beobachtern wiederholt wurde. Ich werde diese Experimente nicht beschreiben, sondern nur darauf hinweisen, dass die bequemste Art, Ihrem Stab eine große Geschwindigkeit zu verleihen, darin besteht, ihn auf der Erde zu tragen, die sich mit hoher Geschwindigkeit um die Sonne bewegt. Ich werde hier auch nicht darauf eingehen, wie vollständig der Beweis ist, den diese Experimente liefern. Viel wichtiger ist es, dass Sie erkennen, dass die Kontraktion genau das ist, was man nach unserem heutigen Wissen über einen materiellen Stab erwarten würde.

Sie sind überrascht, dass sich die Dimensionen eines sich bewegenden Stabes allein dadurch verändern lassen, dass man ihn in verschiedene Richtungen lenkt. Sie erwarten, dass sie unverändert bleiben. Aber an welchen Stab denken Sie? (Sie erinnern sich an meine beiden Tabellen.) Wenn Sie an eine kontinuierliche Substanz denken, die sich im Raum ausdehnt, weil es in der Natur der Substanz liegt, Raum einzunehmen, dann scheint es keinen triftigen Grund für eine Veränderung der Dimensionen zu geben. Aber der wissenschaftliche Stab ist ein Schwarm elektrischer Teilchen, die umherschwirren und weit voneinander entfernt sind. Das Erstaunliche ist, dass ein solcher Schwarm dazu neigt, eine bestimmte Ausdehnung beizubehalten. Die Teilchen halten jedoch einen bestimmten durchschnittlichen Abstand ein, so dass das gesamte Volumen praktisch konstant bleibt. Sie üben elektrische Kräfte aufeinander aus, und das Volumen, das sie füllen, entspricht einem

Gleichgewicht zwischen den Kräften, die sie zusammenziehen, und den verschiedenen Bewegungen, die sie auseinander treiben. Wenn der Stab in Bewegung gesetzt wird, ändern sich diese elektrischen Kräfte. Elektrizität in Bewegung ist ein elektrischer Strom. Elektrische Ströme erzeugen jedoch Kräfte, die sich von denen der ruhenden Elektrizität unterscheiden, nämlich die magnetischen Kräfte. Außerdem sind diese Kräfte, die durch die Bewegung elektrischer Ladungen entstehen, natürlich in den Richtungen entlang und quer zur Bewegungslinie unterschiedlich stark.

Indem wir den Stab mit all den darin enthaltenen kleinen elektrischen Ladungen in Bewegung setzen, führen wir neue magnetische Kräfte zwischen den Teilchen ein. Natürlich wird das ursprüngliche Gleichgewicht gestört, und der durchschnittliche Abstand zwischen den Teilchen muss sich ändern, bis ein neues Gleichgewicht gefunden ist. Und so ändert sich die Ausdehnung des Teilchenschwarms - die Länge des Stabs -.

An der Fitz-Gerald-Kontraktion ist wirklich nichts Geheimnisvolles. Es wäre eine unnatürliche Eigenschaft eines Stabes, den man sich auf die alte Weise als kontinuierliche Substanz vorstellt, die aufgrund ihrer Substantialität den Raum einnimmt; aber es ist eine ganz natürliche Eigenschaft eines Schwarmes von Teilchen, der von elektromagnetischen Kräften in einem empfindlichen Gleichgewicht gehalten wird und den Raum einnimmt, indem er alles, was einzudringen versucht, wegstößt. Sie können es auch so sehen: Ihre Erwartung, dass der Stab seine ursprüngliche Länge beibehält, setzt natürlich voraus, dass er fair behandelt wird und keinen neuen Belastungen ausgesetzt ist. Aber ein sich bewegender Stab ist einer neuen magnetischen Belastung ausgesetzt, die nicht durch unfaire Eingriffe von außen entsteht, sondern eine

notwendige Folge seiner eigenen elektrischen Konstitution ist; und unter dieser Belastung kommt es zur Kontraktion. Sie werden vielleicht denken, dass der Stab, wenn er starr genug wäre, in der Lage sein könnte, der komprimierenden Kraft zu widerstehen. Dem ist nicht so. Die FitzGerald-Kontraktion ist für einen Stahlstab und für einen Stab aus Kautschuk gleich; die Steifigkeit und die Druckspannung sind so mit der Konstitution verbunden, dass, wenn das eine groß ist, auch das andere groß ist. Wir müssen uns von der Vorstellung befreien, dass dieses Unvermögen, eine konstante Länge zu halten, eine Unvollkommenheit des Stabes ist. Es ist nur unvollkommen im Vergleich zu einem imaginären "Etwas", das nicht diese elektrische Beschaffenheit hat und daher überhaupt nicht materiell ist. Die FitzGerald-Kontraktion ist keine Unvollkommenheit, sondern eine feste und charakteristische Eigenschaft der Materie, wie die Trägheit.

Wir haben hier eine qualitative Schlussfolgerung aus der elektrischen Struktur der Materie gezogen; wir müssen es dem Mathematiker überlassen, den quantitativen Effekt zu berechnen. Das Problem wurde von Lorentz und Larmor um 1900 gelöst. Sie berechneten die Änderung des durchschnittlichen Abstands der Teilchen, die erforderlich ist, um das Gleichgewicht wiederherzustellen, nachdem es durch die neuen Kräfte aufgrund der veränderten Bewegung der Ladungen gestört worden war. Diese Berechnung ergab genau die FitzGerald-Kontraktion, d.h. den Betrag, der sich bereits aus den oben erwähnten Experimenten ergab.

Wir können uns also auf zwei Beine stützen. Einige werden es vorziehen, den Ergebnissen zu vertrauen, weil sie durch Experimente gut abgesichert zu sein scheinen; andere werden leichter zu überzeugen sein, wenn sie wissen, dass die FitzGerald-Kontraktion eine notwendige Konsequenz des Schemas der elektromagnetischen Gesetze ist, die seit der

Zeit von Maxwell allgemein anerkannt sind. Sowohl Experimente als auch Theorien gehen manchmal schief; daher ist es gut, beide Alternativen zu haben.

Die Folgen der Kontraktion.

Dieses Ergebnis allein, auch wenn es Sie vielleicht nicht ganz zur Relativitätstheorie führt, sollte Sie an der klassischen Physik zweifeln lassen. Wenn ein Physiker eine Länge messen will - und ohne Längenmessung kommt er in keinem Experiment weit - nimmt er einen Maßstab und dreht ihn in die gewünschte Richtung. Es ist ihm nie in den Sinn gekommen, dass der Maßstab trotz aller Vorsichtsmaßnahmen seine Länge verändern würde, wenn er dies tut; aber wenn die Erde nicht zufällig ruht, muss eine Veränderung eintreten. Die Konstanz einer Messskala ist der Fels, auf dem die gesamte Struktur der Physik errichtet wurde; und dieser Fels ist weggebröckelt. Sie werden vielleicht denken, dass diese Annahme den Physiker nicht sehr betrogen haben kann; die Längenänderungen können nicht gravierend sein, sonst wären sie bemerkt worden. Warten Sie es ab.

Schauen wir uns einige der Konsequenzen der FitzGerald-Kontraktion an. Nehmen wir zunächst einen scheinbar recht fantastischen Fall. Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich auf einem Planeten, der sich sehr schnell bewegt, sagen wir 161.000 Meilen pro Sekunde. Bei dieser Geschwindigkeit ist die Kontraktion halb so groß. Jeder Festkörper schrumpft auf die Hälfte seiner ursprünglichen Länge, wenn er von der Quer- in die Längsrichtung der Bewegungslinie gedreht wird. Eine Eisenbahnfahrt zwischen zwei Städten, die mittags 100 Meilen lang war, verkürzt sich um 18 Uhr auf 50 Meilen, wenn sich der Planet um einen rechten Winkel gedreht hat.