

633 Leopold Infeld: Albert Einstein. Sein Werk und sein Einfluß auf unsere Welt (aus dem Englischen übersetzt von *Engelbert Broda*), Schönbrunn Verlag, Wien 1953, 174 S. (Lizenzausgabe: Akademie-Verlag, Berlin 1956).

*Digitalisiert mit freundlicher Genehmigung des Verlages.*





38-4



**6613**

LEOPOLD INFELD

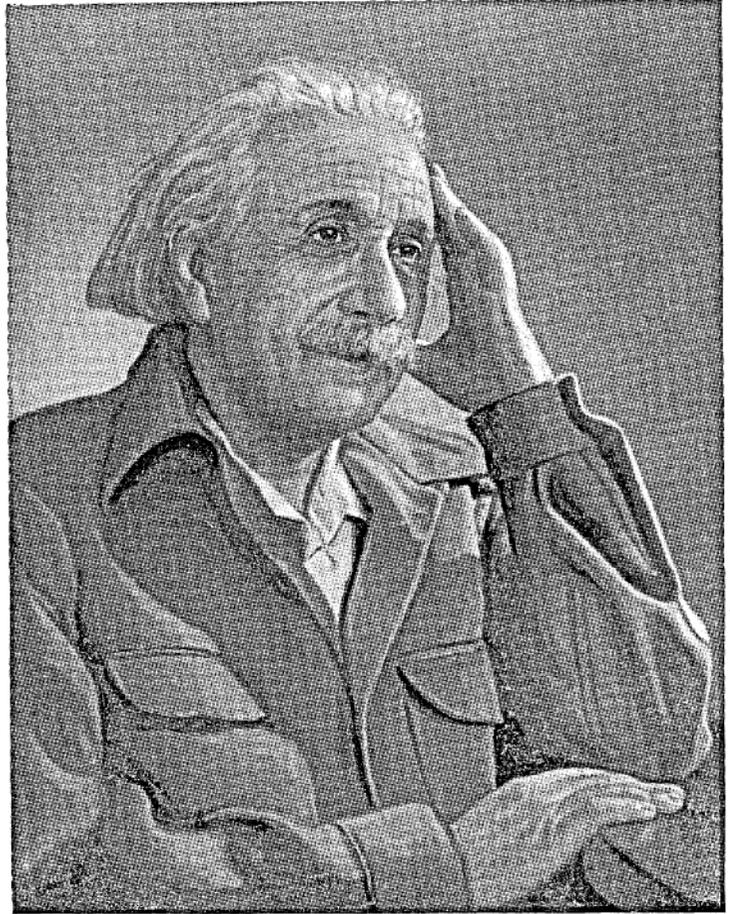
ALBERT EINSTEIN



6613



**6613**



LEOPOLD INFELD

# Albert Einstein

*Sein Werk und sein Einfluß  
auf unsere Welt*



1953



6613

SCHÖNBRUNN-VERLAG WIEN

**Titel des englischen Originals:**

**„Albert Einstein. His Work and its Influence on our World“**

**Ins Deutsche übertragen von Univ.-Dozent Dr. Engelbert Broda**

**Alle Rechte vorbehalten**

**Copyright 1953 bei Schönbrunn-Verlag Wien**

**Druck: Globus II, Wien VI**

## INHALT

	Seite
Vorwort zur deutschen Ausgabe . . . . .	7
1. Vorurteile werden überwunden . . . . .	9
2. Das physikalische Weltbild vor Einstein . . . . .	17
Der Ursprung des Ätherbegriffs	
Das Versagen des Ätherbegriffs	
3. Die erste Umwälzung des physikalischen Weltbildes durch Einstein (Spezielle Relativitätstheorie) . . . . .	35
Eins und zwei, aber nicht drei	
Die bewegte Uhr	
Galilei und Lorentz	
Ein Prinzip statt zweier	
„Ein Paradoxon? Ein höchst geniales Paradoxon!“	
4. Die zweite Umwälzung des physikalischen Weltbildes durch Einstein (Allgemeine Relativitätstheorie) . . . . .	65
Der fallende Aufzug	
Drei Themen	
Das Weltall	

	Seite
5. Einsteins Anteil an der unvollendeten Umwälzung des physikalischen Weltbildes (Quantentheorie) . . . . .	114
Die Geburt der Quantentheorie	
Quanten	
Photonen	
6. Jenseits der Umwälzungen? . . . . .	145
Die Suche nach der Einheit	
Die zwei Sünden	
Am Ziel der Suche?	
Einstein, der Mensch und Philosoph	
Ereignisse im Leben Einsteins . . . . .	173

### Verzeichnis der Abbildungen

Albert Einstein . . . . .	Titelbild
Bahn des Merkur . . . . .	95
Nebel im Offenen Weltall . . . . .	111
Energieverteilung im Spektrum bei etwa 5000 <sup>0</sup> Celsius . . . . .	123
Energieverteilung im Spektrum bei verschiedenen Temperaturen . . . . .	125
Faksimile eines Originalmanuskriptes von Einstein . . . . .	151

## Vorwort zur deutschen Ausgabe

Ich begrüße die deutsche Ausgabe meines kleinen Buches, dessen Original in Amerika veröffentlicht wurde, und hoffe, daß sie dazu beitragen wird, das Werk Albert Einsteins, das unser physikalisches Weltbild von Grund auf umgewandelt hat, den deutschsprachigen Lesern näherzubringen. Diese Ausgabe unterscheidet sich von der ursprünglichen Fassung durch kleine Änderungen und einige Beifügungen, vorwiegend im letzten Kapitel und im Abschnitt über das Weltall.

Der Sinn dieser Beifügungen ist, das Buch auf den heutigen Stand zu bringen und — wenigstens in bescheidenem Ausmaß — die gegenwärtigen lebhaften Diskussionen über die philosophischen Grundlagen der Physik, insbesondere der Relativitätstheorie, zu berücksichtigen. Diese Diskussionen sind noch lange nicht abgeschlossen, und die völlige Klarstellung von Einsteins Einfluß auf unsere Welt muß der Zukunft vorbehalten bleiben.

Schließlich möchte ich dem Übersetzer Dr. E. Broda sowie Dr. W. Frank für viele anregende Gespräche danken, und dem Verleger für die Sorgfalt, die er an dieses Buch gewandt hat.

L. I.

Institut für theoretische Physik  
der Warschauer Universität

August 1952



## Vorurteile werden überwunden

Im Jahr 1955 wird die Relativitätstheorie ein halbes Jahrhundert alt sein. Heute wird sie von den Physikern bereits als eine klassische Theorie betrachtet, und die Zeiten, in denen sie bestritten und angegriffen wurde, scheinen längst vergangen. Und doch schrieb noch 1921 der hervorragende Physiker von Laue im Vorwort zu seinem Werk „Die Relativitätstheorie“:

„Bewundert viel und viel gescholten — so steht die allgemeine Relativitätstheorie heute da. Die lautesten Schreier auf beiden Seiten haben dabei gemeinsam, daß sie von ihr herzlich wenig verstehen.“

Das Geschrei hat seither nachgelassen, die Relativitätstheorie ist „salonfähig“ geworden und hat ihren Platz als ein Eckpfeiler des Gebäudes der modernen Physik eingenommen. Ihr Schöpfer wird als „größter lebender Wissenschaftler“ bezeichnet und sein Ruhm reicht weiter als der von Königen und Präsidenten. Es ist an der Zeit, einen Blick zurück zu tun, die von Einstein hervorgerufenen Umwälzungen in ihrer Entwicklung zu betrachten und nachzuprüfen, wie sie sich auf unser Zeitalter ausgewirkt haben.

Versuchen wir zunächst, uns von Vorurteilen zu befreien, die tausende Male von Mund zu Mund, durch das Radio und durch die Presse verbreitet worden sind!

Ein solches Schlagwort behauptet, daß gewöhnliche Menschen Einsteins Gedanken unmöglich begreifen können. Er sei der Hohe-

priester mathematischer Gelehrsamkeit und es gebe nur ein Dutzend Menschen, die ihn wirklich verstünden.

Es ist nicht leicht, Vorurteile zu bekämpfen. Ich kann nicht einmal sagen, daß die Behauptung, nur zwölf Menschen verstünden die Relativitätstheorie, falsch ist. Diese Behauptung ist ebenso sinnlos wie die Behauptung: „Nur zwölf Menschen verstehen wirklich Beethoven.“

Wie die Musik sind Mathematik und mathematische Physik künstlerische Schöpfungen. Wie in der Musik sollten wir zwischen der *Technik* und den *Ideen* unterscheiden. Niemand kann Beethoven gut spielen und niemand kann eine wissenschaftliche Arbeit über die Relativitätstheorie schreiben, ohne die entsprechende Technik zu beherrschen. Und doch kann man — ebenso wie ein der Spieltechnik Unkundiger beim Anhören Beethovens tiefe Empfindungen erleben kann — eine tiefe Freude empfinden, wenn man die grundlegenden Ideen der Relativitätstheorie, auch ohne Kenntnis der mathematischen Technik, erfaßt.

Tatsächlich gibt es nicht nur *eine* Art des Verständnisses der Wissenschaft — das Verständnis kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Wir können vielleicht eine so hohe Ebene wählen, daß nur wenige Menschen sie zu erreichen vermögen. Aber wie wenige Menschen? Einer meiner Kollegen — ein hervorragender Mathematiker — hat ernsthafte Zweifel geäußert, ob Einstein einer der drei Menschen ist, die Einstein am besten verstehen.

Gewöhnlich nimmt man an, daß ein Mensch Mathematik kann oder nicht kann. Die Wahrheit ist aber, daß es verschiedene Ebenen der mathematischen Technik gibt. Diese bestimmen die gedankliche Ebene, die von verschiedenen die Relativitätstheorie studierenden Menschen erreicht werden kann.

Man unterscheidet gewöhnlich auch zwischen der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Kenntnis der Allgemeinen Relativitätstheorie erfordert größeres mathematisches Wissen als die Kenntnis der Speziellen Relativitätstheorie. Aber die Technik kann

erlernt werden. Mit der Zeit wird die Zahl derer zunehmen, die in die Feinheiten der mathematischen Relativität eingeweiht sind.

Auf der Ebene der Wissenschaft gibt es Hunderte, die Arbeiten über die Relativitätstheorie oder engverwandte Themen verfaßt haben. Sie ist — wie jedes andere Gebiet der Wissenschaft — ein offenes Buch. Obwohl die Zahl der neuen Beiträge hier viel kleiner ist als in der Quantentheorie, ist sie noch immer sehr beträchtlich. Auf der Ebene des Unterrichts bringt jede gute Universität alljährlich neue Studenten hervor, die die Grundsätze und das wesentliche mathematische Rüstzeug der Relativitätstheorie verstehen. In meiner Studienzeit war die Relativitätstheorie kein Teil des Lehrplanes. Heutzutage lernen zumindest an einigen Universitäten die Studenten im dritten Jahr die Grundgleichungen der Speziellen Relativitätstheorie und im vierten Jahr die mathematische Theorie der Relativität.

Mir erscheint der Gesichtspunkt, den ich hier darzulegen suche, besonders wichtig. Einstein hätte nicht einer von jenen werden können, die unser Jahrhundert am stärksten beeinflußt haben, wenn seine Ideen nur von wenigen Menschen verstanden worden wären. Irgendwann in der Zukunft werden die Grundlagen der Relativitätstheorie vielleicht sogar in der Mittelschule unterrichtet werden. Die ihr zugrunde liegenden Ideen sind sowohl einfach als auch wesentlich, obwohl es Zeit erfordert, ihre Ergebnisse in die Alltagssprache zu übersetzen. Die Zahl der Menschen, die einige der Grundgedanken der Relativitätstheorie begriffen haben, nimmt zu und wird noch lange zunehmen. Das ist der Grund, warum Einstein unsere moderne Kultur beeinflußt hat. Die Relativitätstheorie ist nicht nur für die Hohepriester der Gelehrsamkeit da. Wir werden später sehen, wie dieses abstrakte Gedankengewebe unser ganzes Leben beeinflußt hat. Allerdings gab es eine Zeit, da nur wenige Menschen die Relativitätstheorie vollkommen verstanden. Um diese Zeit (1917) bemerkte ein Physiker zu Professor Eddington: „Sie sind einer der drei Männer, die die Relativitätstheorie verstehen.“ Als auf Eddingtons Gesicht ein zwei-

felnder Ausdruck erschien, sagte der Physiker: „Herr Professor Eddington, Sie sollten nicht verlegen werden; Sie sind zu bescheiden.“ Prof. Arthur Eddington antwortete: „Nein, ich bin nicht verlegen; ich denke nur nach, wer der dritte ist.“

Wie alle Wissenschaften ist die Relativitätstheorie auf Annahmen aufgebaut, die mit Experimenten im Einklang stehen. Von diesen Annahmen leiten wir ab, und die Mathematik ist das Werkzeug für diese Ableitungen. Wenn die letzten Entwicklungen dieses Werkzeugs dem Leser unbekannt sind, wie wir voraussetzen werden, dann müssen wir auf die meisten Ableitungen verzichten. Dennoch können wir einige der Grundgedanken und einige der Ergebnisse erfassen, selbst wenn wir die Gedankenkette auslassen müssen, die von den grundlegenden Annahmen zu den letzten, experimentell nachprüfbaren, Schlüssen führt. Wir werden mit Hilfe von Analogien und Bildern einige der Annahmen und Ergebnisse aus der abstrakten Sprache der Mathematik in unsere Alltagssprache zu übersetzen haben.

Dies alles bedeutet „Popularisierung“. Wenn wir nun zum Problem der Popularisierung der Relativitätstheorie kommen, so begegnen wir einem anderen, tief eingewurzelten Vorurteil, das eine Diskussion lohnt.

Viele Leute glauben, die Relativitätstheorie lehre uns, daß es im Weltall wie bei „Alice im Wunderland“ zugeht; daß dies durch den Mathematiker Einstein ausfindig gemacht wurde, der entdeckt hat, daß es eine vierte Dimension gibt, daß Gegenstände sich verkürzen oder verlängern, daß unsere Welt wie ein Ballon einschrumpft oder sich ausdehnt; kurz, daß alles relativ und geheimnisvoll ist. Daß nicht Ihr Zug bei Ihrem Reiseziel halt macht, sondern Ihr Reiseziel bei Ihrem Zug. Und aus dieser phantastischen relativen Welt, die Einstein schuf, erschien plötzlich die Atombombe.

Wissenschaftliche Denkmethode erscheinen von denen unseres Alltagslebens so verschieden, weil sie feiner, komplizierter und subtiler sind. Dennoch sind sie im wesentlichen die gleichen. Wenn wir

die Straße nicht überqueren, weil ein Auto sich nähert, benützen wir Theorien, Schlußfolgerungen und Ableitungen. Die Schlußkette ist in diesem Fall so kurz, daß sie fast als Instinkt bezeichnet werden kann. In der Wissenschaft ist die Kette unvergleichlich länger. Sie ist in der Relativitätstheorie viel länger als in der klassischen Mechanik. Mit dem Fortschritt der Wissenschaft wird diese Kette länger und länger und deshalb schwerer und schwerer zu erfassen. Aber der Baum der Wissenschaft wächst aus dem Boden unserer Erfahrungen. Das gilt auch für die Relativitätstheorie.

Wie entstand also das Vorurteil von dem geheimnisvollen, relativen Alice-im-Wunderland-Weltall?

Im Jahr 1916, als die Relativitätstheorie hauptsächlich unter deutschen Physikern und Mathematikern bekannt, aber einem breiteren Publikum fast fremd war, schrieb Einstein ein kleines populäres Buch über die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie. Hier folgen einige Auszüge aus seinem Vorwort; es drückt fast dieselben Gedanken aus, die ich als Einleitung zu diesem Buch festhalten möchte:

„Das vorliegende Büchlein soll solchen eine möglichst exakte Einsicht in die Relativitätstheorie vermitteln, die sich vom allgemeinen wissenschaftlichen, philosophischen Standpunkt für die Theorie interessieren, ohne den mathematischen Apparat der theoretischen Physik zu beherrschen. Die Lektüre setzt etwa Maturitätsbildung und ziemlich viel Geduld und Willenskraft beim Leser voraus. Der Verfasser hat sich die größte Mühe gegeben, die Hauptgedanken möglichst deutlich und einfach vorzubringen . . . Im Interesse der Deutlichkeit schien es mir unvermeidlich, mich oft zu wiederholen, ohne auf die Eleganz der Darstellung die geringste Rücksicht zu nehmen; ich hielt mich gewissenhaft an die Vorschrift des genialen Theoretikers L. Boltzmann, man solle die Eleganz Sache der Schneider und Schuster sein lassen.“ (*„Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, 1917.“*)

Einsteins kleines Buch wurde klassisch. Später, um das Jahr 1920, als der Ruhm der Relativität und ihres Schöpfers sich über die ganze

Welt verbreitet hatte, wurden hunderte Bücher, Broschüren, Zeitschriften- und Zeitungartikel über Einstein und die Relativität gedruckt. Damit begann die Ära der verflachenden Vulgarisierung der Wissenschaft.

Bald fand man, daß Bücher, die den Leser erregen, indem sie die Wissenschaft mit Mystik und Sensation vermengen, eine stärkere Zugkraft haben als solche Bücher, wie sie Einstein schrieb, in denen die Grundgedanken sachlich, geradlinig und fast farblos dargestellt werden. So wurden die von Einstein eingeführten Beispiele von anderen immer wieder vorgebracht, aber dabei mit unnötigem Beiwerk versehen; alles Erdenkliche wurde getan, um in einer wirkungsvollen Szenerie den Wissenschaftler als einen teuflisch schlaunen Kerl darzustellen, der die Geheimnisse erhascht, die die Natur listig vor ihm zu verbergen sucht. Diese Bücher erzeugten metaphysisches Gruseln; man konnte sie mit Erregung und dramatischer Spannung lesen, ohne das mindeste zu verstehen. Einige der Popularisatoren schrieben mit großem künstlerischen Geschick. Ein neuer Stil der Popularisierung (der anscheinend jetzt ausstirbt) wurde entwickelt — und dieser war es, der das Vorurteil über die Geheimnisse des Weltalls und der Wissenschaft erzeugt hat.

Die Wissenschaft ist ein mit Vernunft errichtetes Gebäude; das größte Vergnügen bei ihrem Studium ist das Verstehen. Ohne Verstehen hat Wissen wenig Bedeutung. Die Existenz der Wissenschaft und ihr Fortschritt beruhen auf der Überzeugung, daß das Weltall nicht launenhaft und geheimnisvoll ist. Der große Mathematiker Poincaré (der, nebenbei bemerkt, selbst beinahe die Spezielle Relativitätstheorie entdeckt hätte) meinte, das größte Wunder bestehe darin, daß keine Wunder geschehen.

Der Zweck unserer Schlußfolgerungen ist im Leben wie in der Wissenschaft der gleiche: Ereignisse zu ordnen und vorherzusagen; die Welt unserer Sinnesempfindungen zu verstehen. Die in der Relativitätstheorie enthaltenen Schwierigkeiten bestehen überall in der

modernen Physik. In dieser befassen wir uns nicht mit Dingen, die so vertraut und greifbar sind wie die Siedetemperatur des Wassers oder die Bewegung eines Pendels oder der Druck in einem Kessel. Aber auch diese einfachen Erscheinungen wirkten auf den gewöhnlichen Menschen zu ihrer Entdeckungszeit ebenso abstrakt und schwer begreiflich wie heute die Rotverschiebung der Spektrallinien oder die Ablenkung von Lichtstrahlen.

Die Erscheinungen, die von der modernen Physik erklärt werden, sind im wesentlichen die in den modernen Laboratorien mit ihren Zyklotronen, Massenspektographen und Geiger-Zählrohren hervorgehobenen; oder astronomische Erscheinungen wie die Ablenkung der Lichtstrahlen von den Sternen, wenn sie während einer Finsternis am Sonnenrand vorbeilaufen; oder das Auftreten von neuen Teilchen, die durch kosmische Strahlen erzeugt werden. Selbst die im Laboratorium des Weltalls auftretenden Erscheinungen werden durch die empfindlichsten Geräte, die je von Menschen ersonnen wurden, eingefangen, gemessen und gedeutet. Jede wissenschaftliche Theorie, auch wenn sie ihrer Natur nach spekulativ ist, hat nur dann einen Sinn, wenn sie experimentell nachgeprüft werden kann. Sie stirbt, wenn sie bei solcher Nachprüfung versagt.

So werden wir Einsteins Theorie als das Gebäude der Vernunft betrachten, das sie vorstellt: zum Teil zwar philosophisch und spekulativ, aber doch experimenteller Bestätigung fähig. Sie ist weder metaphysisch noch mysteriös.

Vor zehn Jahren erschien die Relativitätstheorie als ein abstraktes Netz von Gedanken, weit entfernt von den Erscheinungen, die Menschen beobachten oder erleben können. Das ist heute anders. Seit 80000 Menschen in Hiroshima starben, ist es anders. Die relativistische Beziehung zwischen Masse und Energie, die Einstein im Jahr 1905 fand, ist nicht mehr eine seltsame Laboratoriumserscheinung. Sie ist für uns alle eine Frage von Leben und Tod geworden.

Die Relativität wurde nicht nur durch das Genie Einsteins ge-

boren. Doch Einstein bewirkte die Umwälzung, für die die Wissenschaft reif geworden war. Obwohl dazu auserwählt, diese Umwälzung zu führen, war er selbst der denkbar stillste Mensch. Er war Außenseiter, er gehörte nicht einmal zum Stand der Hochschullehrer. Damals, im Jahr 1905, war er ein junger Doktor der Philosophie, 26 Jahre alt, frisch verheiratet und Angestellter des Eidgenössischen Patentamtes in Bern. Er war schüchtern, gütig und liebenswürdig. Er studierte wenig, aber er dachte viel; er hatte eine große Fähigkeit: zu staunen und Fragen zu stellen; er nahm von niemandem ein Dogma an. Ich glaube nicht, daß er jemals die Voraussetzungen für einen guten Angestellten hatte, aber die Schweiz stieß ihn nicht aus dem Staatsdienst aus. Man erlaubte ihm, zu denken und zu träumen und Abhandlungen zu schreiben, die das Antlitz der Wissenschaft verändern sollten.

## Das physikalische Weltbild vor Einstein

### Der Ursprung des Ätherbegriffs

Umwälzungen in der Wissenschaft treten, ebenso wie alle großen geschichtlichen Umwälzungen, ein, sobald die Zeit für sie reif ist. Um zu verstehen, was sie bedeuten und warum sie erfolgen, muß man die Epochen, aus denen sie hervorgehen, untersuchen.

Die erste Einsteinsche Umwälzung erfolgte frühzeitig, weil Einstein lebte. Und dennoch finden wir in der Physik gegen Ende des 19. Jahrhunderts die Samen, aus denen Einsteins großes Klärungswerk wuchs. Um seine Leistung zu verstehen, müssen wir den Stand der Physik um die Jahrhundertwende prüfen. Wir werden sie von den durch die moderne Wissenschaft erreichten Höhen aus betrachten. Das Bild muß natürlich verschwommen bleiben, denn wir werden ein weites Land überblicken, in dem Einzelheiten unscharf erscheinen müssen. Vor diesem allgemeinen Hintergrund werden wir einige isolierte Punkte, die später Brennpunkte der Umwälzung wurden, untersuchen. Sie schienen viel weniger wichtig, bevor die Relativitätstheorie formuliert wurde, denn erst die Relativitätstheorie beleuchtete diese Punkte und führte zu einem Verständnis der ernststen Schwierigkeiten, die in der klassischen Physik enthalten sind.

Wir beginnen daher mit einem sehr allgemeinen Bild der Physik des 19. Jahrhunderts. Konkret gesprochen, werden wir sie unter dem

Gesichtspunkt von zwei Hauptzweigen betrachten. Wir werden sie kurz die *mechanische* Theorie und die *Feldtheorie* nennen.

Jeden dieser Zweige werden wir mit dem Namen eines Mannes verknüpfen. Darin liegt eine derartige Vereinfachung, daß das ganze Bild dadurch fast verfälscht wird; denn wenn wir den Zweig der Mechanik *Newton-Physik* nennen, pflanzen wir nur die Illusion fort, daß ein Lehrgebäude in vollständiger Form dem Kopf eines einzelnen Menschen entspringen kann. Tatsächlich liegen die Grundlagen der Newtonschen Theorie im Werke Galileis. Wenn auch die Glieder der historischen Kette in dem Maße schwächer werden, als wir tiefer in die Vergangenheit zurückgehen, so gibt es nichtsdestoweniger noch Verbindungen mit der Vergangenheit. Wenn wir uns aber dieser wichtigen geschichtlichen Kontinuität in der Wissenschaft bewußt bleiben, dann ist es zulässig, die mechanistische Physik mit dem Namen Newtons zu verbinden, dessen berühmtes Werk *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie; 1687) in der Formulierung der mechanischen Weltauffassung Epoche machte.

In gleicher Weise werden wir die Feldtheorie mit dem Namen *Maxwells* verbinden, obwohl Maxwells Ideen sich auf die Arbeiten Faradays stützten und später experimentell von Hertz bestätigt wurden. James Clerk Maxwell starb im Jahre 1879, dem Geburtsjahr Albert Einsteins.

Die verschiedenen Elemente der mechanischen und der Feldauffassung können bis zu den Philosophen des Altertums zurückverfolgt werden. Doch war es erst die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts, die die beiden Auffassungen in ihrer ganzen mathematischen Schönheit voll entwickelte. Die beiden nebeneinander bestehenden Zweige der Physik stellten das Endergebnis einer langen und bewegten Entwicklung dar.

Man kann leicht zwischen der mechanischen und der Feldauffassung unterscheiden. Heutzutage sind diese beiden Aspekte der

Wissenschaft sogar in unsere Alltagssprache eingedrungen. Wenn wir über unsere Umwelt sprechen, beschreiben wir ihre Teile entweder in der Terminologie der mechanischen oder der Feldtheorie.

So verwenden wir die Newtonsche Auffassung, die Sprache der Mechanik, wenn wir davon sprechen, daß die Erde sich infolge der Schwerkraft in einer ellipsenförmigen Bahn um die Sonne bewegt. Eine solche Aussage mag zur Zeit Newtons kompliziert erschienen sein, stellt aber heute einen Gemeinplatz dar. Um es genau auszudrücken: wir zeichnen einen Punkt, nämlich die Sonne, in den Brennpunkt einer Ellipse, und einen zweiten Punkt, die Erde, an deren Peripherie. Die zwei Körper — Erde und Sonne — werden durch diese beiden sich gegenseitig mittels der Schwerkraft anziehenden Punkte dargestellt. Dies sind die charakteristischen Kennzeichen der mechanischen oder Newtonschen Auffassung: *Körper und einfache Kräfte, die zwischen ihnen wirken*. Diese Auffassung setzte sich auf dem Gebiet der Mechanik und Astronomie am erfolgreichsten durch und drang später in andere Zweige der Physik ein.

Es kann nicht überraschen, daß das 19. Jahrhundert eine mechanische Deutung auf alle Bereiche der Naturerscheinungen anzuwenden trachtete. Zu Newtons Zeit war die Mechanik der älteste, vertrauteste und erfolgreichste Zweig der Wissenschaft. Daher mußte man ein geeignetes mechanisches Bild erfinden, wenn man die Erscheinungen der Wärme, des Lichtes und der bewegten Flüssigkeiten erklären wollte. Das ist die Bedeutung der Behauptung, daß die mechanische Auffassung die Physik regierte. Bis ins 19. Jahrhundert stellte sich niemand vor, daß diese Herrschaft der Mechanik gestürzt werden könnte. Die Entwicklung der Wissenschaft schien damals für alle Zukunft unserer Zivilisation in mechanistischen Bahnen verlaufen zu müssen. Der berühmte Mathematiker Lagrange, der Anfang des 19. Jahrhunderts starb, meinte, daß Newton nicht nur der größte, sondern auch der glücklichste unter den Wissenschaftlern gewesen sei; denn die Wissenschaft von unserer Welt könne nur einmal geschaffen werden, und dies

habe Newton getan. Von unserem gegenwärtigen Beobachtungsposten aus ist es klar, daß die Grundlagen der Wissenschaft geschaffen und wiedergeschaffen wurden und daß Newtons große Leistung bloß das erste Glied einer Kette wissenschaftlicher Umwälzungen lieferte. Dennoch verbreitete und vertiefte sich die mechanische Auffassung zu Lebzeiten Lagranges und auch später — fast während der ganzen ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts —, bis sie den Rang eines philosophischen Dogmas annahm. Laplace und später Helmholtz formulierten sie mit viel Phantasie, so daß sie weit über die Grenzen der bekannten und durchforschten Gebiete hinausreichte.

Zu jener Zeit nahmen die Wissenschaftler an, daß unser ganzes Weltall — und wir in ihm — eine gigantische, komplizierte Maschine bilde, die den Gesetzen Newtons gehorche. Ihre Ansicht war: Wenn wir den gegenwärtigen Zustand eines mechanischen Systems kennen, also die Lagen und Geschwindigkeiten aller Körper, und wenn wir auch noch die zwischen diesen Körpern wirkenden Kräfte kennen, dann können wir die Zukunft eines solchen Systems voraussagen und seine Vergangenheit aufdecken. Gerade darin besteht die Lösung eines mechanischen Problems. Wenn daher das Weltall selbst eine gigantische, komplizierte Maschine ist, dann könnten wir — sofern uns sein Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt und die Natur aller Kräfte bekannt wären — die Zukunft dieses Weltalls bis in die kleinsten Einheiten und bis zu einem beliebig fernen Augenblick vorhersagen. Ebenso könnten wir durch die Einsetzung anderer Zeitwerte in die von uns erhaltenen Formeln die Vergangenheit aufdecken.

Der Wissenschaftler des 19. Jahrhunderts begriff, daß er von einem solchen Endziel weit entfernt war. Es war ihm klar, daß er nur wenig über den Zustand unseres Weltalls wußte, wenig über die Gesetze, die die Materie beherrschen, und noch viel weniger über die Gesetze, die das Leben und Denken beherrschen. Doch schien es nichts zu geben, das einer immer breiter werdenden Anwendung der mechanischen Auffassung im Wege stand. Daher betrachtete man den Gedanken, alle

Erscheinungen in der Natur schließlich durch die Newtonsche Physik erklären zu können, als ein theoretisch erreichbares Ziel.

Was nun den anderen Zweig der Physik, die *Feldtheorie* betrifft, so führte ihre Entwicklung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu ausschlaggebenden Erkenntnissen, die schließlich einen Niedergang der mechanischen Auffassung mit sich brachten.

Auch der Feldbegriff ist in unsere Alltagssprache eingedrungen. So verwenden wir bis zu einem gewissen Grad die Sprache der Feldtheorie, wenn wir sagen, daß sich elektromagnetische Wellen von einer Antenne ausbreiten und auf Radioapparate einwirken. Ein solcher Satz, der heute allgemein begriffen wird, hätte für die Physiker zu Anfang des 19. Jahrhunderts keinen Sinn gehabt.

Die Theorie Maxwells, die für elektrische und optische Erscheinungen gilt, ist eine *Feldtheorie*, denn ihr Wesenselement ist die Beschreibung von *Veränderungen*, die sich stetig in der *Zeit* durch den *Raum* fortpflanzen. Damit steht der Begriff des Feldes im Gegensatz zu dem Begriff der einfachen Körper nach der mechanischen Auffassung. (Die Unterschiede zwischen den beiden Theorien wirken sich auch mathematisch aus: die Gleichungen der Mechanik sind gewöhnliche Differentialgleichungen, während die Gleichungen des Feldes partielle Differentialgleichungen sind.)

Eine Antenne sendet elektromagnetische Wellen aus, auf die unser Radioempfänger anspricht. Die Atome in der Sonne oder in einer Neonröhre oder in einer Glühlampe senden Licht aus, auf das unser Auge anspricht. Wie ungleich diese beiden Bilder sind! In dem einen haben wir eine Antenne und einen Radioapparat, in dem anderen sendet das Atom — selbst eine kleine Antenne — elektromagnetische Wellen aus, und der Empfangsapparat — unser Auge — löst sie auf und entdeckt dabei die Farben und Formen der sichtbaren Welt. Aber diese zwei verschiedenen Erscheinungen werden beide durch dieselben Gesetze bestimmt: durch Maxwells Gleichungen. Sowohl die von einer Antenne als auch die von einem Atom ausgesendeten Wellen sind

elektromagnetische Wellen, die sich mit einer Geschwindigkeit von 300000 Kilometer in der Sekunde ausbreiten. Ein wichtiger Fortschritt der Wissenschaft kann hier auf die Entdeckung unerwarteter Ähnlichkeiten und sogar Gleichheiten unter der Oberfläche äußerer Verschiedenheiten zurückgeführt werden.

Die Feldauffassung erwies sich auf dem Gebiet der elektrischen und optischen Erscheinungen als ebenso erfolgreich, wie es die mechanische Auffassung auf astronomischem Gebiet gewesen war. Von den Röntgenstrahlen bis zu den Radiowellen, einschließlich der Wellen des sichtbaren Lichtes, ist die ganze reiche und weite Welt der Strahlungen durch Feldgesetze bestimmt, die mit den mechanischen Auffassungen wenig gemein zu haben scheinen.

Kein rechtgläubiger Physiker des 19. Jahrhunderts hätte einer solchen Deutung zugestimmt. Die Vorstellung von zwei verschiedenen Physiken, zwei alternativen Methoden des Denkens, wäre für ihn unannehmbar gewesen. Er hätte darauf bestanden, daß sich die Feldauffassung im wesentlichen von der mechanischen Auffassung nicht unterscheide und daß für die elektromagnetischen Erscheinungen eine zusammenhängende und vollkommen befriedigende mechanische Erklärung gefunden werden könne. Er hätte argumentiert:

„Die Theorie Maxwells beschreibt elektromagnetische Wellen und die Gesetze ihrer Fortpflanzung. Dieser Satz allein zeigt, daß die Erklärung mechanischer Natur ist. Was ist eine Welle? Man denke an eine Schallwelle: sie wird durch die Teilchen der Luft erzeugt. So haben wir in einer Schallwelle das mechanische Bild von Teilchen und ihrer Bewegung. Man denke an Wellen des Wassers. Die Wasserteilchen schwingen, wodurch sie benachbarte Teilchen zwingen, dasselbe zu tun. So pflanzen sich Wellen fort, oder vielmehr: so scheinen sie sich fortzupflanzen. Dem aber liegt eine mechanische Realität von sich bewegenden Körpern und den zwischen ihnen wirkenden Kräften zugrunde. Das gleiche gilt für Lichtwellen oder elektromagnetische Wellen. Jede einfache elektromagnetische Welle kann — ebenso wie

in dem Fall der Wasserwellen — durch eine Wellenlänge gekennzeichnet werden. Unter Wellenlänge versteht man den Abstand — zu einem gegebenen Zeitpunkt — von einem Wellenberg zum nächsten. Die Wellenlänge von sichtbarer Strahlung, das heißt von Licht, ist gering im Vergleich zu den Wellenlängen der Radiowellen, selbst der Kurzwellen. Aber sowohl für Radio- als auch Lichtwellen besteht die Möglichkeit eines mechanischen Bildes von schwingenden Teilchen und eines Mediums — der stofflichen Grundlage, durch die sich die Wellen fortpflanzen.“

Nehmen wir an, daß unser imaginärer Physiker des 19. Jahrhunderts seine Schlußfolge in diesem günstigen Moment beendet. Wir stellen ihm nun eine Frage, die ernsthafte Schwierigkeiten aufdecken muß.

Wir argumentieren: „Du sagtest, das Bild der Welle trage mechanischen Charakter, weil es immer einen Stoff, ein materielles Medium geben muß, durch welches die Wellen fortgepflanzt werden. Worin besteht nun aber der Stoff, durch den sich elektromagnetische Wellen fortpflanzen? Natürlich nicht aus Luft wie bei den Schallwellen. Es gibt zwischen den Sternen und unserer Erde überhaupt keine Luft. Pumpe die Luft aus diesem Zimmer, und ich werde von außen durch die Fenster genau das gleiche sehen wie zuvor. Luft, Wasser oder irgend ein anderer materieller Stoff ist an der Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen nicht beteiligt. Im Gegensatz zu allen anderen Wellen benötigen sie kein materielles Medium. Gerade das ist das charakteristische Merkmal, das sie von allen anderen Wellen unterscheidet. Wo ist also deine mechanische Grundlage, wenn es kein materielles Medium gibt, in dem sich die Wellen fortpflanzen?“

Natürlich würden diese Argumente die Diskussion zu keinem Ende bringen. Unser Physiker des 19. Jahrhunderts würde seinen Standpunkt verteidigen, und während einer solchen Diskussion würde ein geschichtlich bedeutsames Wort erscheinen: *Äther* — ein für das Verständnis der modernen Physik gänzlich überflüssiger Begriff, der

jedoch zum Verständnis ihrer Geschichte unentbehrlich ist. Denn sein Versagen führte zu der Geburt der Relativitätstheorie Einsteins.

Der Physiker des 19. Jahrhunderts argumentierte, daß ein materielles Medium existieren müsse, durch welches sich elektromagnetische Wellen fortpflanzen, weil mechanische Wellen (und für ihn gab es keine anderen Wellen) sich nur in einem materiellen Medium ausbreiten können. Das Medium nannte er Äther und nahm an, daß unser ganzes Weltall in diese gewichtlose Substanz getaucht sei, von der zumindest eine Eigenschaft bekannt wäre: die Fähigkeit, elektromagnetische Wellen weiterzuleiten. Der gleiche Physiker hätte uns versichert, daß mit der Zeit andere Eigenschaften des Äthers entdeckt würden und daß der Äther ebenso real werden würde wie jeder materielle Gegenstand. Er hatte die Vorstellung von zwei Hauptzweigen der Physik, aber mit dem Verbindungsglied des Ätherbegriffes, der die Feldtheorie mit der mechanischen Theorie verknüpft und das hochgehaltene Prinzip der Einheit rettet.

Erinnern wir uns an dieses Bild und bleiben wir uns dessen bewußt, wieviel Mühe es kostete, den Ätherbegriff zu bilden, zu vervollkommen und zu rechtfertigen. Denn nur dann werden wir die Umwälzung verstehen, die das ganze theoretische Gebäude zerstört hat — die Umwälzung, die begann, als ein junger Angestellter im Schweizerischen Patentamt zu Anfang unseres Jahrhunderts einen Aufsatz veröffentlichte.

## Das Versagen des Ätherbegriffs

In jeder Darstellung der Relativitätstheorie betrachtet man Bezugssysteme oder Koordinatensysteme oder, wie wir kurz sagen werden, *Systeme*. Solche verschiedene Systeme werden sowohl in den Problemen der Mechanik als auch in Feldproblemen diskutiert. Aber erst der Ätherbegriff und später die Relativitätstheorie lenkten die ganze

Aufmerksamkeit auf ihre Wichtigkeit. Viele der Ätherprobleme und später viele der relativistischen Probleme betreffen zwei oder mehr Systeme.

So ist es in Darstellungen für Nichtfachleute von Nutzen, Experimente auszudenken, die auf dem Erdboden durchgeführt werden, sowie Experimente, die zum Beispiel in einem bewegten Zug angestellt werden. In diesen Beispielen bildet unsere Erde mit allen auf ihr befindlichen unbewegten Gegenständen ein System, und der Zug bildet ein anderes System. Die zwei Systeme bewegen sich in bezug auf einander und jedes System hat seine eigenen Beobachter. So wird es eine Anzahl Menschen geben — so viele wir brauchen —, die auf dem Erdboden Experimente machen, und andere, die im Zug Experimente machen. Diese zwei Gruppen von Beobachtern in den beiden Systemen können nötigenfalls ihre Feststellungen vergleichen und werden sich über deren Ergebnisse aussprechen. Einige unserer Argumente werden sich aus solchen Diskussionen ergeben. Tatsächlich ist dies — wenn wir den weiteren Verlauf vorwegnehmen dürfen — eine der wichtigen Schlußmethoden der Relativitätstheorie. Die beiden Systeme bewegen sich in bezug auf einander; die Beobachter in den beiden Systemen werden Ergebnisse erhalten, die in bezug auf ihre eigenen Systeme, also *relativ* zu ihnen, Geltung haben; daher der Name Relativitätstheorie.

Wir werden nun Galileis Relativitätsprinzip formulieren.

Man stelle sich zwei Systeme in gleichförmiger Bewegung relativ zueinander vor; das heißt, mit gleichförmiger, unbeschleunigter Geschwindigkeit und entlang einer geraden Linie. Wenn man sich die Bewegung als die eines Zuges vorstellen will, muß man sich einen Zug denken, in dem die Koffer nicht umfallen und in dem die Fahrgäste nicht aneinander stoßen, oder ein Schiff, das mit solch wunderbarer Gleichmäßigkeit fährt, daß selbst die empfindlichsten Passagiere nicht seekrank werden. Wir nehmen gleichförmige Bewegung an!

Jetzt fragen wir: gelten die Gesetze der Mechanik für die Be-

obachter in beiden Systemen, wenn sie in einem von ihnen gelten? Die Antwort liegt auf der Hand: ja, sie gelten. Genau das ist unter völlig gleichmäßiger Bewegung zu verstehen. Verhängt man die Fenster, so gibt es keine Möglichkeit, solche gleichförmige Bewegung festzustellen. Wenn also unsere Beobachter das Ergebnis ihrer physikalischen Experimente in den zwei Systemen vergleichen, so werden sie finden, daß sie identische Gesetze formuliert haben.

Das ist ein einfacher Gedanke. Wenn wir ihn verstehen, dann verstehen wir auch die Bedeutung des Relativitätsprinzips Galileis. Es lautet:

*Wenn die Gesetze der Mechanik in irgendeinem System gültig sind, dann gelten sie auch in jedem anderen System, das sich relativ zu dem ursprünglichen System in gleichförmiger Bewegung befindet.*

Jedes dieser gleichförmig bewegten Systeme ist für physikalische Experimente ebenso geeignet wie jedes andere, und jedes kann als Bezugssystem dienen, wenn man Bewegungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen oder Kräfte beschreibt.

Der wesentliche Punkt ist nicht, daß wir zwei oder mehr Systeme mit den dazugehörenden Beobachtern haben, sondern daß wir die Beschreibung von einem System auf ein anderes übertragen können. All dies ist einfach, aber Einfachheit täuscht. Wir werden nämlich bald herausfinden, daß hinter diesen anscheinend banalen Gedanken gängen tiefe Schwierigkeiten verborgen liegen.

Ein Mann sagt mir, daß sein Wagen achtzig Kilometer in der Stunde fährt. Wenn ich pedantisch sein will, kann ich fragen: „In bezug auf was? In bezug auf dein Haus und den Laternenpfahl oder in bezug auf den Mond und die Sonne?“ Fragen dieser Art sind lästig, weil der Mann, wenn er die Geschwindigkeit seines Wagens erwähnt, offensichtlich seine Geschwindigkeit in bezug auf die Erde meint oder in bezug auf Gegenstände (Haus, Laternenpfahl), die mit der Erde fest verbunden sind. Bewegung kann nur relativ zu einem Bezugssystem beschrieben werden. Mein Gesprächspartner ließ den Hin-

weis darauf nur deshalb aus, weil es klar war, welches System er meinte.

Wenn sich der Zug in Bewegung setzt und jemand ihm nachläuft, so ist dessen Geschwindigkeit in bezug auf den Bahnhof erheblich, während seine Geschwindigkeit in bezug auf den Zug fast null ist. Wenn man in einem Zug mit der Geschwindigkeit  $A$  läuft und der Zug mit der Geschwindigkeit  $B$  fährt, dann ist die Geschwindigkeit des Läufers in bezug auf die Schienen  $A+B$  oder  $A-B$ , je nachdem, in welche Richtung man läuft.

Wir werden nun das Ergebnis in einer abstrakteren Weise formulieren. Wir haben zwei Systeme:  $O$  (den Erdboden) und  $O'$  (den Zug). Das System  $O'$  bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $A$  relativ zu  $O$ . Ein Körper bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $B$  relativ zum System  $O'$ . Um die Geschwindigkeit dieses Körpers in bezug auf das System  $O$  zu finden, muß man die beiden Geschwindigkeiten zusammenzählen, wenn der Körper sich in der gleichen Richtung wie  $O'$  (relativ zu  $O$ ) bewegt, und sie subtrahieren, wenn er sich in der entgegengesetzten Richtung bewegt.

Diese Regel, die das Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung in zwei Systemen verknüpft, ist ebenso einfach wie naheliegend. Sie ist so naheliegend, daß es kaum der Mühe wert scheint, sie experimentell nachzuprüfen. Doch wenn wir wollen, können wir es tun, und können ein solches Experiment so oft wir wollen wiederholen. So haben wir ein Gesetz, das wir in Zukunft als das *Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten* bezeichnen werden.

Wir haben gerade formuliert:

1. Galileis Relativitätsprinzip.
2. Das Gesetz der Addition von Geschwindigkeiten.

Noch ein Beispiel, bevor wir diese Grundsätze der mechanischen Auffassung verlassen: Man stelle sich vor, daß ein Mann in der Mitte eines langen Zuges einen Vortrag hält, oder, um es physikalisch auszudrücken, Schallwellen erzeugt. Wir werden nun einem Beobachter

im Zug und einem Beobachter außerhalb des Zuges folgende Frage stellen:

„Wie groß ist die Geschwindigkeit dieser Schallwellen in deinem System?“

Der Beobachter in dem Zug wird sagen:

„Die Geschwindigkeit der Schallwellen nach allen Richtungen ist die gleiche. Die gleichförmige Bewegung des Zuges in bezug auf den Bahnhof hat keinen Einfluß. Mein System ist ebenso gut wie das des Bahnhofvorstandes. Der Zug trägt seine eigene Luft mit sich. Deshalb pflanzen sich die Schallwellen mit der gleichen Geschwindigkeit nach allen Richtungen fort.“

Der Beobachter außerhalb des Zuges wird sagen:

„Die im Zug erzeugten Schallwellen bewegen sich relativ zu mir mit verschiedenen Geschwindigkeiten nach verschiedenen Richtungen. In der Richtung der Zugbewegung bewegen sie sich mit einer Geschwindigkeit, die die Geschwindigkeit des Schalls übertrifft. Im Einklang mit dem klassischen Gesetz — der Addition von Geschwindigkeiten — wird eine solche Geschwindigkeit die des Zuges plus der der Schallwellen sein. In der Richtung entgegen der Bewegung des Zuges verbreitet sich der Schall mit kleinerer Geschwindigkeit. Tatsächlich wird diese Geschwindigkeit in bezug auf mich um die Zuggeschwindigkeit verkleinert sein.“

Erinnern wir uns an diese Antworten, denn wir werden uns bald auf sie beziehen müssen.

Jetzt können wir die mechanische Theorie verlassen und unter der Führung des Physikers aus dem 19. Jahrhundert eine Reihe von Forschungen beginnen, um die Realität des Äthers sicherzustellen. Unser Führer ist zur Erhaltung des Ätherbegriffes entschlossen, durch den die mechanischen und Feldauffassungen vereinigt werden. Er würde wünschen, daß die elektromagnetischen Wellen ebenso wirklich und mechanisch sind wie Schallwellen.

Indem wir unserem Führer folgen, dessen Äthertheorie wir ver-

suchsweise annehmen, stellen wir uns Lichtwellen einfach als Ätherwellen vor. Um konkret zu sein, stellen wir uns vor, daß eine Lichtquelle, die Lichtsignale aussendet, auf- und abgedreht wird. Wenn wir es vorziehen, können wir statt dessen an Radiosignale denken, da Radio- und Lichtwellen sich mit derselben Geschwindigkeit durch den Äther fortpflanzen.

So führen wir ein Experiment aus, das dem zuvor beschriebenen Experiment mit Schallwellen ähnlich ist. Wir untersuchen Lichtsignale, die von der Mitte des langen Zuges ausgesendet werden, und befragen die Beobachter innerhalb und außerhalb des Zuges über die Geschwindigkeit des Lichtes in bezug auf ihre Systeme. Wir können uns natürlich vorstellen, daß wir diese Geschwindigkeit messen, aber wir wollen lieber unsere Frage stellen, bevor die Beobachter Gelegenheit zur Messung haben. Sie sollen die möglichen Antworten vorher-sagen!

Der Beobachter im Zug würde sagen:

„Offensichtlich ist mein System ebensogut wie das System des Bahnhofvorstandes. Die Fenster meines Zuges sind geschlossen, und es ist eine vernünftige Annahme, daß der Äther mit meinem System mitgeführt wird, ebenso wie die Luft im Fall der Schallwellen mitgeführt wurde. Auf diese Weise wird die Geschwindigkeit des Lichtes in meinem System noch immer 300000 Kilometer in der Sekunde betragen — überall und in jeder Richtung.“

Der Beobachter außerhalb des Zuges würde sagen:

„Die Geschwindigkeit dieses Lichtsignals wird in verschiedenen Richtungen verschieden sein. Sie wird in der Richtung des Zuges größer als normal sein, wenn er sich von mir fortbewegt. In dieser Richtung wird sie gleich der Summe der normalen Lichtgeschwindigkeit und der Zuggeschwindigkeit sein. In der entgegengesetzten Richtung wird sie gleich der normalen Lichtgeschwindigkeit weniger der Zuggeschwindigkeit sein.“

So haben die beiden Beobachter ihre Voraussagen gemacht, die

nun experimentell geprüft werden können. Gegen den Ausgang eines Experimentes kann es in der Wissenschaft keine weitere Berufung geben.

Würden wir dieses Experiment durchführen, so würde sich die Voraussage des *äußeren* Beobachters gegen unsere Erwartung als falsch erweisen. Zwar würde der Beobachter innerhalb des Zuges die gleiche Lichtgeschwindigkeit nach allen Richtungen finden und seine Voraussage würde sich als richtig erweisen. Aber der äußere Beobachter würde zweifellos unrecht haben. Er würde nämlich finden, daß auch für ihn die Geschwindigkeit des Lichtsignals nach allen Richtungen die gleiche ist, immer 300 000 Kilometer pro Sekunde, niemals weniger oder mehr. Er würde finden, daß für ihn das Licht sich verhält, als wären seine Quelle und der Äther im Zustand der Ruhe; und die Tatsache, daß sich die Lichtquelle mit dem Zug bewegt, erweist sich als völlig belanglos. (Das Ergebnis dieses Gedankenexperiments ist auf indirektem Weg, aber mit völliger Sicherheit, durch wissenschaftliche Beobachtungen bestätigt worden.) So fällt das Experiment sein Urteil: die Lichtgeschwindigkeit ist für den inneren und für den äußeren Beobachter die gleiche.

Also hat das Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten versagt. Welcher Vorteil liegt dann in der Annahme der Existenz eines Äthers, wenn er sich nicht so benimmt, wie ein richtiges Medium es sollte; wenn er, statt uns bei der Voraussage von Ereignissen zu helfen, uns in neue Schwierigkeiten stürzt? Der Äther, der die Feld- und mechanischen Theorien hätte verbinden sollen, hat die Mechanik durch die Verletzung des Gesetzes der Addition der Geschwindigkeiten durchbrochen.

Tiefsitzende Vorurteile haben ein zähes Leben. Der Physiker des 19. Jahrhunderts war nicht bereit, den Ätherbegriff zu opfern. Er konnte den Ausgang des Experimentes nicht bestreiten, aber er konnte seine Argumentation ändern. Er hatte in der Tat eine plausible Erklärung seines Versagens an der Hand. Er konnte sagen, und hat tat-

sächlich gesagt: „Der Zug führt den Äther nicht mit, wie er die Luft mit sich führt, sondern er schwebt durch das Äthermeer, wie ein Schiff durch ruhiges Wasser segelt; auch die Erde treibt bei ihrer Reise um die Sonne durch dieses ruhige Äthermeer. Unser früheres Bild war also falsch. Wir müssen das Experiment ganz neu beginnen und wieder unsere Beobachter darum ersuchen, die Ergebnisse vorherzusagen und ihre Vorhersagen mit den Experimenten zu vergleichen. Damit nähern wir uns dem springenden Punkt unserer Geschichte. Wieder gibt es zwei Beobachter — der eine außerhalb, in dem ruhenden Äthermeer, der andere durch das ruhende Äthermeer schwebend. Wieder merken wir uns die Vorhersagen, doch haben wir zum Zwecke größerer Folgerichtigkeit unser Bild ein wenig geändert. Wir stellen uns einen Beobachter vor, der nicht mit der Erde verbunden ist, sondern mit einem System — sagen wir, mit der Sonne oder mit den Sternen: jedenfalls mit dem System, in dem das Äthermeer ruht. Dieses System ist das einzige, in dem der Äther ruht, und alle anderen Körper bewegen sich in bezug auf dieses System. Der „Weltallbeobachter“ — das heißt, der Beobachter, für den der Äther ruht — würde sagen:

„Für mich ist die Lichtgeschwindigkeit nach allen Richtungen die gleiche, weil das Medium, durch welches sich die Lichtwellen bewegen, in Ruhe ist.“

Wie steht es nun mit dem Beobachter, der durch ein solches Äthermeer reist? Stellen wir uns vor, daß er es in einem bewegten System tut, etwa in einem Zug, und daß er so wie zuvor ein Signal in der Bewegungsrichtung und ein Signal in der entgegengesetzten Richtung aussendet. Er würde jetzt sagen:

„Wenn ich ein Signal, das heißt eine Lichtwelle, in die Richtung der Zugbewegung aussende, bewegt sich die Lichtwelle durch das unbewegte Äthermeer, aber die Wand, gegen die sich die Welle hinbewegt, läuft vor ihr davon, während die gegenüberliegende Wand sich auf die Welle zubewegt. Daher werden die beiden Wände durch Licht-

signale nicht gleichzeitig getroffen werden. Die fliehende Wand wird später getroffen werden; die gegenüberliegende Wand wird als erste durch die Lichtwellen getroffen werden. Daher wird die Geschwindigkeit des Lichtes nach beiden Richtungen nicht die gleiche sein. Sie wird in der Richtung der fliehenden Wand die normale Lichtgeschwindigkeit nicht erreichen, aber in der Richtung der entgegengesetzten Wand die normale Lichtgeschwindigkeit übertreffen. Nennen wir nun die normale Lichtgeschwindigkeit  $c$ ; der Wert von  $c$  ist also 300000 Kilometer in der Sekunde. Für mich wird die Geschwindigkeit des Lichtes in der Bewegungsrichtung kleiner als  $c$  sein und in der entgegengesetzten Richtung größer als  $c$ ." Das sind klare Vordersagen. Bevor wir sie experimentell prüfen, unterbrechen wir für einen Augenblick, um die Bedeutung des von uns entworfenen Bildes zu würdigen.

Nach diesem neuen Bild gibt es ein einziges System, in bezug auf welches der Äther ruht. Ein solches System unterscheidet sich von allen anderen. Es ist, wie wir gesagt haben, *das System schlechthin*. So haben wir uns in unserer eigenen Argumentation gefangen. Der Physiker, der den Ätherbegriff annimmt und versucht, einen die mechanischen und die Feldtheorien vereinigenden Ätherbegriff zu formulieren, ist gezwungen, die mechanische Theorie selbst ihres Bodens zu berauben. Er ist bereit, Galileis Relativitätsprinzip — einen Wesensbestandteil der mechanischen Auffassung — zu opfern. Denn Galileis Relativitätsprinzip legt fest, daß alle Systeme, die sich in bezug aufeinander in gleichförmiger Bewegung befinden, gleichberechtigt sind. Aber für den Physiker, der an den Äther glaubt, trifft dies nicht zu. Für ihn gibt es unter den Systemen eines, das sich von allen anderen unterscheidet, nämlich das System, in dem sich der Äther in Ruhe befindet — das einzige System, in dem die Lichtgeschwindigkeit  $c$  beträgt. Demnach kann Galileis Relativitätsprinzip nicht länger richtig sein. Der Äther ersetzt es durch eine Theorie des Absoluten. Im Versuch, die mechanische Auffassung zu retten, hat der Physiker des

19. Jahrhunderts sie in Gefahr gebracht, indem er ihr Grundprinzip der Relativität aufgegeben hat.

Was zeigen die Experimente? Aus allen unseren astronomischen Beobachtungen geht eindeutig hervor, daß unsere Erde in ihrer Reise um die Sonne sich relativ zum Äther bewegen würde, wenn es ein ruhendes Äthermeer gäbe. Ein Gegenstück zu unserem Beispiel von dem Zug, der sich durch den Äther bewegt, ist unsere Erde, die mit der Geschwindigkeit von ungefähr 30 Kilometern in der Sekunde um die Sonne kreist. Daher sollte auf unserer Erde die Lichtgeschwindigkeit in der Richtung der Erdbewegung ein wenig kleiner sein als in der entgegengesetzten Richtung. Das berühmte Michelson-Morley-Experiment, das im Jahre 1887 ausgeführt wurde, hatte die Entdeckung einer solchen Differenz zum Ziel. Das Ergebnis war negativ. Es bewies endgültig, daß es keine verschiedenen Lichtgeschwindigkeiten gibt! Sie sind nach allen Richtungen die gleichen und ihr Wert ist  $c$ , die Lichtgeschwindigkeit schlechthin, die sich merkwürdigerweise immer treu bleibt, immer unverändert, immer gleich.

Für den Mechanisten ist das Ergebnis eine Katastrophe. Der Ätherbegriff, der die mechanischen und Feldauffassungen zu vereinigen versprach, hat zu unvermeidlichen Widersprüchen geführt. Ein Äther, der sich weder bewegt noch ruht, der weder durch Körper mitgeführt wird noch den Körpern erlaubt, durch ihn hindurchzufließen, ist ein klägliches Fiasko. Alle Versuche, den Äther als das Medium für die Wellen zu betrachten, haben vollkommen versagt. Wir stehen wiederum zwei anscheinend widersprechenden Zweigen der Physik ohne einen vereinigenden Gedanken gegenüber.

Wie schon gesagt: wissenschaftliche Vorurteile haben ein zähes Leben. Der Wunsch nach der Erfindung eines Mediums für die Fortpflanzung von elektromagnetischen Wellen war so stark, daß selbst nach dem Beweis, daß Äther weder ruht noch sich bewegt, immer wieder Versuche gemacht wurden, durch Einführung neuer Annahmen den Ätherbegriff festzuhalten. Diese Annahmen machten das Gebäude

der theoretischen Physik komplizierter, künstlicher und weniger überzeugend.

Blicken wir nochmals auf den Stand der Physik oder vielmehr ihrer Grundlagen zu Beginn dieses Jahrhunderts.

Die mechanische Auffassung nahm an:

*Das Relativitätsprinzip Galileis und*

*Die Regel von der Addition von Geschwindigkeiten.*

Experimente an Licht- und elektromagnetischen Wellen haben uns zu dem Schluß geführt:

*Die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen oder des Lichtes ist immer die gleiche, unabhängig davon, ob sich die Quelle oder der Beobachter bewegt.*

Das letzte Ergebnis war mit dem Ätherbegriff unvereinbar. Außerdem stimmte es mit der Regel von der Addition der Geschwindigkeiten nicht überein. Wenn die Lichtgeschwindigkeit zu der Geschwindigkeit eines Systems addiert wird, ergibt sich die unveränderte Lichtgeschwindigkeit!

Nicht nur der Ätherbegriff brach zusammen, sondern die mechanischen und die Feldauffassungen widersprachen einander. Die Experimente hatten scheinbar unvermeidliche Widersprüche im wissenschaftlichen Bild der Außenwelt aufgedeckt.

Die Physik war für die Umwälzung Einsteins reif.

Was verstehen wir unter einer Umwälzung in der Physik? Wir verstehen darunter: eine plötzliche Klärung unserer Begriffe, das Entstehen eines neuen Bildes, eine unerwartete Auflösung von Widersprüchen und Schwierigkeiten. Es hat viele Umwälzungen in der Wissenschaft gegeben, aber die Umwälzung durch Einstein wurde zur berühmtesten. Unter ihren Ergebnissen befindet sich eines, das von nun an eine bedeutsame Rolle in der Gestaltung von Leben und Tod auf unserem Planeten spielen wird.

## Die erste Umwälzung des physikalischen Weltbildes durch Einstein

(Spezielle Relativitätstheorie)

### Eins und zwei, aber nicht drei

„Annalen der Physik“ heißt eine deutsche Zeitschrift in dicken Bänden voll wissenschaftlicher Artikel, die gewöhnlich sehr gelehrt, nur für Fachleute bestimmt und immer reichlich mit Fußnoten und Literaturhinweisen gepfeffert sind. Der 1905 gedruckte siebzehnte Band der „Annalen der Physik“ enthält Einsteins dreißigseitige Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. Der Titel klingt bescheiden, doch bemerken wir beim Lesen fast sogleich, daß der Aufsatz sich von anderen ähnlicher Art unterscheidet. Er enthält keine Literaturhinweise, keine Autoritäten werden zitiert, die wenigen Fußnoten tragen bloß erklärenden Charakter. Sein Stil ist einfach und ein großer Teil seines Inhalts kann ohne fortgeschrittene Fachkenntnisse verstanden werden. Aber sein völliges Verständnis erfordert eine Reife des Denkens und der Auffassung, die seltener und wertvoller ist als pedantisches Wissen. Denn Einsteins Arbeit befaßt sich mit den grundlegendsten Fragen; sie untersucht die Bedeutung von Begriffen, die zu einfach erscheinen könnten, um noch geprüft zu werden.

Als ich vor kurzem diese Abhandlung wieder las, war ich abermals von ihrer vollendeten Form gepackt. Auch heute haben ihre Dar-

stellungsweise und ihr Stil nichts von ihrer Frische verloren. Sie ist noch immer die beste Quelle zum Studium der Relativitätstheorie.

Im zweiten Abschnitt dieser Arbeit von Einstein lesen wir:

„1. Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden.

2. Jeder Lichtstrahl bewegt sich im ‚ruhenden‘ Koordinatensystem mit der bestimmten Geschwindigkeit  $c$ , unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist.“ („Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, *Annalen der Physik*, 17. Band, 1905.)

Dies sind die Grundlagen, auf denen die Relativitätstheorie errichtet ist. Es sind einfache Annahmen, die beide auf Erfahrung beruhen. Wie wir entdecken werden, gewinnen wir die Lösung unserer Schwierigkeiten, indem wir uns mit dem Unvermeidlichen abfinden. Wie in einem guten Reißer ist es die nächstliegende Lösung, die wir hartnäckig zurückgewiesen haben.

Aber wenn wir die Relativitätstheorie verstehen wollen, müssen wir diese Annahmen, auf denen sie beruht, vollkommen verstehen. Alles übrige sind logische Schlußfolgerungen, und in ihnen kann nicht mehr enthalten sein als in den Hypothesen, aus denen sie gezogen werden.

Die erste Annahme ist eine Neufassung von Galileis Relativitätsprinzip, das wir im vorigen Kapitel beschrieben haben. Es fordert, daß alle Naturgesetze in zwei gegeneinander gleichförmig bewegten Systemen die gleichen sind; daß wir weder durch mechanische noch durch elektromagnetische Erscheinungen, die wir nur innerhalb des Systems beobachten, gleichförmige Bewegung entdecken können. Der Physiker des 19. Jahrhunderts dachte, daß ein Äther existiere und daß das System, in welchem ein solcher Äther sich in Ruhe befindet, vor allen anderen ausgezeichnet sei. Aber diese Annahme befand sich in klarem Widerspruch mit dem Experiment, und Einstein

schlägt vor, daß wir ohne weitere Berufung das Urteil des Experimentes annehmen. Ob wir nun mechanische oder elektromagnetische Erscheinungen untersuchen — sie alle werden durch das Relativitätsprinzip beherrscht: es gibt kein Mittel, zwischen zwei Systemen zu unterscheiden, die sich relativ zueinander gleichförmig bewegen. Wenn dies aber zutrifft, dann läßt sich zeigen, daß der Ätherbegriff überflüssig ist. Er hat genug Verwirrung gestiftet, und es gibt keine Möglichkeit, das Vorhandensein des Äthers festzustellen. Der Ätherbegriff hat die Gesetze der elektromagnetischen Erscheinungen nicht in den theoretischen Rahmen der klassischen Mechanik eingefügt; seine Struktur erwies sich als allzu phantastisch und allzu erzwungen, um irgendeine wirkliche Verbindung zwischen diesen beiden Zweigen der Physik herstellen zu können.

Daher können wir Einsteins Leistung dadurch kennzeichnen, daß sie ein für allemal den Ätherbegriff zerstörte, den man erfunden hatte, um die Feldgesetze und die Gesetze der Mechanik zu vereinigen. Aber Einstein unterbrach damit nicht die Verbindung zwischen diesen beiden Bereichen der Physik; im Gegenteil — er brachte sie einander näher. Denn jetzt haben wir einen einigenden Begriff im physikalischen Inhalt von Galileis Relativitätsprinzip, das sowohl die mechanischen wie die Felderscheinungen beherrscht.

Wir wenden uns nun zur zweiten Grundannahme der Speziellen Relativitätstheorie. Sie ist ebenso einfach und behauptet nur ausdrücklich, daß die Lichtgeschwindigkeit immer die gleiche ist, unabhängig von dem System, in dem wir sie messen — also ob wir innerhalb oder außerhalb des Zuges messen.

Wir mögen hier ein Gefühl der Enttäuschung empfinden. Wo ist also die große Revolution Einsteins? Diese zwei Grundsätze sind nur eine Formulierung von Versuchsergebnissen, und alles, was Einstein getan zu haben scheint, ist nur, sich mit dem Unvermeidlichen abgefunden zu haben. Worin liegt dann die Originalität von Einsteins Theorie?

Der nächste Schritt in unserer Argumentation ist wichtig. Trotz der Einfachheit von Einsteins Grundannahmen sind sie revolutionär, wenn sie zusammengenommen werden. Bis in Einsteins Zeit schienen diese beiden Grundsätze einander zu widersprechen. Einstein beseitigte den Widerspruch, war aber, um dies tun zu können, zu einer Veränderung unserer grundlegenden Begriffe von Raum und Zeit gezwungen.

Die zwei Grundsätze schienen einander unvermeidlich zu widersprechen. Denn wie kann die Geschwindigkeit auch außerhalb eines bewegten Zuges  $c$  sein, wenn sie innerhalb des Zuges  $c$  ist? Sollte sie nicht in der Bewegungsrichtung des Zuges größer und in der entgegengesetzten Richtung kleiner sein? Oder, um die Argumentation umzudrehen: wenn die Lichtgeschwindigkeit für den Beobachter außerhalb des Zuges  $c$  ist, sollte sie dann nicht innerhalb des Zuges eine andere sein? Vor der Relativitätstheorie schien es unmöglich, einem solchen Schluß zu entrinnen, da er doch aus einem altehrwürdigen Kapitel der Mechanik über das Zusammenfügen von Geschwindigkeiten in zwei verschiedenen Systemen folgte. Der einfache Grundsatz einer konstanten Lichtgeschwindigkeit widerspricht dem ebenso einfachen Grundsatz der Addition oder Subtraktion von Geschwindigkeiten, des Zusammenfügens der Lichtgeschwindigkeit (oder irgend einer anderen Geschwindigkeit) mit der Geschwindigkeit des Systems.

Um der Klarheit willen wollen wir die drei Grundsätze aufschreiben:

- Eins: Relativitätsprinzip;
- Zwei: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit;
- Drei: Addition von Geschwindigkeiten.

Wir können sie nicht alle drei annehmen. Wir müssen Zwei ablehnen, wenn wir Eins und Drei annehmen wollen. Einsteins Lösung war: nimm Eins und Zwei an und ziehe deine eigenen Schlüsse. Du wirst sehen, daß Drei nicht als streng richtig angenommen werden kann, wenn dies geschehen soll. Drei ist daher nicht streng richtig,

und das Experiment wird dies beweisen. Wir müssen eine neue Physik aufbauen, die auf den Grundannahmen Eins und Zwei beruht. In der Tat kann eine solche Physik aufgebaut werden, eine Physik, die logisch folgerichtig ist und mit dem Experiment in Einklang steht; eine neue relativistische Physik, für die die alte Newtonsche Physik nur zu einer Näherung wird, brauchbar und gültig für Körper, die sich mit im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit kleinen Geschwindigkeiten bewegen, aber ungültig, wenn die Geschwindigkeiten der bewegten Körper sich der des Lichtes nähern. So können wir die Grundsätze der klassischen Mechanik noch verwenden, wenn wir Automobile oder Überschallflugzeuge oder sogar die Planeten unseres Sonnensystems behandeln; aber wenn wir uns mit Elektronen beschäftigen, deren Geschwindigkeiten zum Beispiel der des Lichtes nur um zehn Prozent unterlegen sind, bricht die Newtonsche Mechanik zusammen und eine neue Mechanik, die relativistische Mechanik Einsteins, muß angewendet werden. Die Behauptung, daß Einstein die Newtonsche Mechanik als unanwendbar nachgewiesen habe, ist nicht ganz richtig. Es ist richtiger, daß er ihre Begrenzungen aufgezeigt hat. Aber das Gebiet, in dem sie gilt, ist noch immer sehr groß; und bis in eine ferne Zukunft wird sie in unseren Schulen weiter unterrichtet und auf unser Alltagsleben weiter angewendet werden.

### **Die bewegte Uhr**

Um eine folgerichtige Physik auf Einsteins zwei Grundsätze aufzubauen, müssen wir unsere Grundbegriffe von Raum und Zeit radikal revidieren. Es ist fast unglaublich, daß diese grundlegenden, intuitiv geprägten Begriffe niemals zuvor in der Physik definiert worden sind. Man hat sie mit Unrecht als zu selbstverständlich betrachtet, um einer Klärung oder Deutung zu bedürfen. Dennoch begegnen wir sofort unvorhergesehenen Schwierigkeiten, wenn wir sie zu definieren trachten.

Diese Schwierigkeiten werden erst durch Einsteins Relativitätstheorie beseitigt.

Die einfache, von Einstein gestellte und beantwortete Frage ist: Was bedeutet der Ausdruck „zwei gleichzeitige Ereignisse“? Obwohl zu jener Zeit (1905) die Physik sehr kompliziert geworden war, schien der Begriff zweier gleichzeitiger Ereignisse so unzweideutig, daß niemand vor Einstein sich die Mühe nahm, ihn zu prüfen. Das war es nun gerade, was Einstein tat. Er begann seine Analyse mit dem einfachsten Satz, dem ich jemals in einer wissenschaftlichen Arbeit begegnet bin:

„Alle unsere Urteile, in denen die Zeit eine Rolle spielt, sind immer Urteile über gleichzeitige Ereignisse. Wenn ich zum Beispiel sage: ‚Jener Zug kommt hier um sieben Uhr an‘, so heißt dies etwa: Das Zeigen des kleinen Zeigers meiner Uhr auf 7 und das Ankommen des Zuges sind gleichzeitige Ereignisse.“ (*„Zur Elektrodynamik bewegter Körper“*, a. a. O.)

Hier haben wir einem sehr einfachen Fall von Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse (Zusammentreffen des kleinen Uhrzeigers mit der Ziffer sieben und Ankunft des Zuges), die in der Nähe voneinander auftreten, einen Sinn zugeschrieben. Aber was bedeutet die Behauptung, daß zwei Ereignisse in New York und San Francisco gleichzeitige Ereignisse sind? Die Frage wird jetzt schwieriger und wir müssen vor der Antwort ein bißchen nachdenken. Die einfachste Antwort wäre, daß die zwei Ereignisse gleichzeitig sind, wenn zwei Uhren — die eine in New York, die andere in San Francisco — zeigen, daß sie gleichzeitig sind. Diese Antwort mag sich als richtig erweisen, nachdem wir einige Vorbehalte gemacht haben. Zunächst müssen wir wissen, daß beide Uhren gut sind. Um die Sache einfach zu machen, wollen wir annehmen, daß sie von der gleichen Struktur sind oder, wie wir sagen werden, identische Uhren sind. Es ist nicht so leicht zu sagen, was eine gute Uhr ist. Aber übersehen wir diese Schwierigkeit, da darin keine Gefahr liegt! Natürlich wären zwei Ereignisse trotz

gleicher Zeitanzeige dieser Uhren nicht gleichzeitig, wenn die eine die Lokalzeit des Ostens und die andere die Lokalzeit des Westens anzeigen würde. Sie müssen nicht nur den gleichen Rhythmus haben, sondern sie müssen auch gleichzeitig die gleiche Zeit zeigen — kurz, sie müssen synchronisiert sein. Was bedeutet die Aussage, daß zwei Uhren synchronisiert sind? Stellen wir uns vor, daß es in New York genau sieben Uhr ist und daß wir einem Beobachter in San Francisco ein Radiosignal senden, seine Uhr auf sieben zu stellen. Werden die beiden Uhren synchronisiert sein, wenn er das ausführt? Nicht genau. Das Radiosignal pflanzt sich mit großer, aber doch begrenzter Geschwindigkeit fort — mit der des Lichtes. Daher muß der Beobachter in San Francisco, sobald er das Signal empfängt, daß es sieben ist, seine Uhr auf eine Zeit einstellen, die ein wenig nach sieben liegt. Genau gesagt: sieben plus der Zeit, die das Signal benötigt hat, um von einer dieser Städte zur anderen zu reisen.

Wir können uns jedoch ein einfaches Experiment vorstellen, das uns aussagt, ob die zwei Uhren in diesen beiden Städten synchronisiert sind oder nicht. Stellen wir uns einen Punkt genau in der Mitte zwischen New York und San Francisco vor! In diesem Punkt betrachten wir ein Fernsehbild der zwei Uhren. Wenn diese zwei Uhren auf diesem Bild in jedem Moment die gleiche Zeit zeigen, sind sie synchronisiert. Dann, und nur dann, können sie dazu benützt werden, gleichzeitige Ereignisse zu bestimmen. Ebenso können wir uns jetzt synchronisierte Uhren vorstellen, die über die ganze Erdoberfläche verteilt sind. Je zwei von ihnen werden uns in einem auf halbem Wege zwischen ihnen liegenden Punkt identische Fernsehbilder geben.

Erst jetzt, da wir dies alles festgelegt haben, können wir darüber urteilen, ob zwei Ereignisse an verschiedenen Orten gleichzeitig sind oder nicht. Aber unsere Analyse der Gleichzeitigkeit ist damit nicht beendet. Alles, was wir bis jetzt über zwei gleichzeitige Ereignisse behauptet haben, ist in der klassischen Mechanik ebenso richtig wie in der Relativitätstheorie. Die klassische Physik bemühte sich nicht,

diese Annahme zu formulieren, weil es schien, daß durch solch eine gewissenhafte Analyse wenig gewonnen wäre.

Der Unterschied zwischen dem klassischen und dem relativistischen Begriff der Gleichzeitigkeit wird erst dann offenbar, wenn wir gleichzeitige Ereignisse in zwei Systemen betrachten. Wir haben beschrieben, wie entscheidend es in der Relativitätstheorie ist, sich zwei verschiedene Systeme vorzustellen und Beobachter in beiden Systemen die Ergebnisse der von ihnen angestellten Experimente vergleichen zu lassen. So wollen wir jetzt an zwei Systeme denken, zum Beispiel an die Erde mit den ihr fest verbundenen Gegenständen und an einen bewegten Zug. Jeder Beobachter auf der Erde hat die erforderliche Anzahl von synchronisierten Uhren, um die Zeit von Ereignissen an verschiedenen Orten zu bestimmen, und der Beobachter in dem Zug hat ebenfalls seine eigenen synchronisierten Uhren. Jedes System hat also seine eigenen synchronisierten Uhren, um die Zeitpunkte von Ereignissen zu beurteilen.

Jetzt kommt der wesentliche Punkt. Wir stellen uns zwei Ereignisse vor. Wir können an zwei sehr einfache Ereignisse denken, so an zwei Lichtsignale, die zu verschiedenen Zeiten von verschiedenen Punkten im Raum ausgesendet werden. Eine Lichtquelle wird in einem bestimmten Augenblick an einem bestimmten Ort im Raum auf- und abgedreht: das ist das eine Ereignis. Jetzt betrachten wir zwei solcher Ereignisse und fragen, ob sie gleichzeitig sind oder nicht. Nehmen wir an, der Beobachter auf der Erde findet, daß diese zwei Ereignisse nach Angabe seiner Uhren gleichzeitig sind. Wie steht es nun mit dem Beobachter im Zug? Wird auch er sie als gleichzeitig befinden?

Das ist eine entscheidende Frage. An dieser Stelle unterscheiden sich die Antwort der klassischen Physik und die Antwort der Relativitätstheorie radikal. Wie wir sehen werden, hat die Relativitätstheorie, indem sie zum erstenmal den Begriff der Gleichzeitigkeit streng definiert hat, daraus neue Schlußfolgerungen gezogen, die für die weitere Entwicklung der Wissenschaft wesentlich sind.

Der klassische Physiker würde antworten:

„Natürlich sind zwei Ereignisse, die in einem System (Erde) gleichzeitig sind, in einem anderen System (Zug) ebenfalls gleichzeitig. Ich habe dir erlaubt, verschiedene Uhren an verschiedenen Orten zu gebrauchen, und sogar verschiedene Uhren in verschiedenen Systemen. Ich habe mit deiner Definition der Synchronisation übereingestimmt und habe sie völlig angenommen. Aber all dies kann meine Auffassung nicht ändern, daß zwei Ereignisse, die in einem System gleichzeitig sind, auch in einem anderen System gleichzeitig sind. Uhren verändern ihren Rhythmus nicht, wenn sie sich bewegen! Es spielt keine Rolle, ob du eine ruhende oder eine bewegte Uhr befragst, oder ob die Beobachter private Uhren benützen, die in einem der beiden Systeme ruhen, oder universelle Uhren für sämtliche Systeme. Wie Newton gesagt hat, ist die Zeit absolut. Das bedeutet gerade, daß die Zeit sich von einem System zum anderen nicht ändert und daß wir ein und dieselbe Serie von Uhren für alle Systeme verwenden können. Die Zeit fließt gleichförmig für alle Beobachter. So müssen zwei Ereignisse, die in einem System gleichzeitig sind, auch in einem anderen gleichzeitig sein. Es gibt nicht die Spur eines Beweises dafür, daß Uhren ihren Rhythmus ändern, wenn sie sich bewegen. Auf einer schnellen Seereise von Southampton aus wird die Uhr auf dem Schiff dieselbe Zeit anzeigen wie eine New Yorker Uhr, sofern beide Uhren zu Beginn der Fahrt synchronisiert waren.“

So besteht der klassische Physiker darauf, daß die Zeit absolut sei und daß die bewegte Uhr ihren Rhythmus nicht ändere. Hier würde der Relativist eine einfache Frage stellen:

„Woher weißt du, daß eine Uhr ihren Rhythmus nicht verändert, während sie sich bewegt?“

In der Physik sind leere und langwierige Diskussionen selten. Die innere Folgerichtigkeit einer Theorie und das Zeugnis des Experimentes müssen bald zu einem endgültigen Urteil führen. Eine Berufung von diesem an den gesunden Menschenverstand wäre irre-

führend, da das Urteil des gesunden Menschenverstandes über eine solche Frage nur ein allgemein verbreitetes Vorurteil widerspiegeln könnte, das einer strengen Prüfung nicht standhält und daher zerstört werden muß, wenn der Fortschritt des wissenschaftlichen Denkens gewährleistet sein soll. Auf die Dauer wird auch der Appell an eine Autorität, selbst von der Größe Newtons, wenig helfen. Newtons Theorien waren zu seiner Zeit folgerichtig, denn die Wissenschaft im Zeitalter Newtons war für die Relativitätstheorie nicht reif. Die Annahme einer absoluten Zeit führte nicht zu Widersprüchen, wenn sie auf die Tatsachen angewendet wurde, die bis zum 19. Jahrhundert bekanntgeworden waren. Die Annahme, daß die Uhr auf ihrer Reise von Southampton nach New York ihren Rhythmus ändere, wäre zwecklos gewesen. Kein Experiment konnte eine solche Änderung feststellen. Aber was würde geschehen, wenn das gleiche Schiff mit einer der Lichtgeschwindigkeit nur wenig unterlegenen Geschwindigkeit fahren könnte? Würde der Rhythmus einer solchen Uhr noch immer unverändert bleiben? Zu Anfang des 19. Jahrhunderts wäre dies eine rein akademische Frage gewesen, aber heute ist sie es nicht mehr. Heute können wir Teilchen zwingen, sich mit einer Geschwindigkeit nur knapp unterhalb der Lichtgeschwindigkeit zu bewegen.

Wir kehren zu unserer Frage zurück:

„Ändert eine Uhr durch die Bewegung ihren Rhythmus?“

Ja — antwortet die Relativitätstheorie. Zwei Ereignisse, die in einem System gleichzeitig sind, sind in einem anderen System nicht gleichzeitig, und es gibt *keine absolute Zeit*. Daß der Zeitbegriff relativ ist, ist für die innere Geschlossenheit unserer Theorie und für ihre Übereinstimmung mit dem Experiment eine notwendige Annahme.

Hier sind wir an einem wichtigen Punkt unserer Beweisführung angelangt. Wir haben jetzt gesehen, wo die klassischen und relativistischen Entwicklungswege sich trennen. Der Begriff der Zeit wurde ein anderer; ein Begriff, über den die Philosophen Bände ge-

geschrieben hatten, änderte sich durch Überlegungen, die auf dem Gebiet der Physik ihren Ursprung haben.

Der relativistische Charakter der Zeit und des Gleichzeitigkeitsbegriffes kann aus den zwei Grundannahmen der Relativitätstheorie abgeleitet werden:

1. Die Gleichwertigkeit der relativ gleichförmig bewegten Systeme und
2. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Wir werden jetzt erklären, warum der absolute Charakter der Gleichzeitigkeit geopfert werden muß, wenn diese zwei Annahmen der Relativitätstheorie akzeptiert werden.

Wir senden in einem bestimmten Augenblick von der Mitte eines Zuges (bewegtes System) zwei Lichtstrahlen in entgegengesetzte Richtungen. Da die Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) für den inneren Beobachter konstant ist, werden diese zwei Lichtstrahlen in seinem System die beiden entgegengesetzten Wände zur gleichen Zeit erreichen. Für ihn werden diese zwei Ereignisse (Auftreffen der Lichtstrahlen auf die beiden entgegengesetzten Wände) gleichzeitig sein. Wie steht es nun mit dem äußeren, auf dem Erdboden befindlichen Beobachter? Auch für ihn hat die Lichtgeschwindigkeit in seinem System noch immer den konstanten Wert  $c$ ; aber er sieht, daß sich die eine Wand vom Licht wegbewegt und die andere Wand gegen das Licht bewegt. So wird für ihn ein Lichtstrahl die Wand, die sich auf ihn zubewegt, zuerst treffen und erst eine Weile später wird der andere Lichtstrahl die Wand treffen, die sich von ihm wegbewegt. Dies führt zu dem unausweichlichen Schluß, daß zwei Ereignisse, die für Beobachter in einem System gleichzeitig sind, für die Beobachter in einem zweiten, gegen das erste System gleichförmig bewegten System nicht gleichzeitig sind.

Hier liegt in der Tat eine Umwälzung in unseren Denkgewohnheiten und in unserem Sprachgebrauch vor. Ein Satz: „Zwei Ereignisse traten zur gleichen Zeit ein“ ist sinnlos, wenn wir nicht angeben

oder wenigstens stillschweigend klar machen, auf welches System wir uns beziehen. Der Unterschied in der Beurteilung zwischen dem inneren und dem äußeren Beobachter (Zug—Erde) muß ihrem Gebrauch verschiedener Uhren zugeschrieben werden, da beide Systeme ihre eigenen privaten Uhren haben. Wir schließen, daß eine Uhr ihren Rhythmus ändert, während sie sich bewegt.

## Galilei und Lorentz

Wir können ohne Anwendung von Mathematik nicht viel weitergehen. Einstein drückte seine zwei Forderungen in einer strengen mathematischen Form aus, die ihn zum Ziehen neuer Schlüsse befähigte. Es wäre nicht allzu schwer, Einsteins Gedankengang zu folgen, doch würde es die Verwendung einer mathematischen Technik erfordern. An irgend einer Stelle einer solchen Untersuchung muß sich der Weg derer, die mit einer solchen Technik vertraut sind, und derer, die es nicht sind, trennen. Für diejenigen, die es nicht sind, muß das Ziehen von Schlußfolgerungen enden. Für sie kann nichts getan werden, als daß man ihnen die Ergebnisse solcher mathematischer Schlüsse in den Ausdrücken unserer Alltagssprache erklärt.

Wir werden jedoch einen Ausdruck verwenden müssen, der nur mit Hilfe der Mathematik vollkommen verstanden werden kann. Wir werden ihn nicht streng definieren, sondern in ziemlich verschwommener Weise diesen wichtigen Ausdruck der Relativitätstheorie einführen: die *Lorentz-Transformation*. Sie bildet den Pfeiler, auf dem die Relativitätstheorie ruht.

Um eine Vorstellung davon zu geben, wie die Lorentz-Transformation benützt wird, werden wir wie zuvor den Zustand von zwei Systemen in gleichförmiger relativer Bewegung betrachten. Um ein konkretes Beispiel zu geben, stellen wir uns einen durch die Fifth Avenue sausenden Autobus vor. Der Autobus ist vier Häuserblöcke

lang und sehr schmal. Wir können ihn mit jeder beliebigen Geschwindigkeit fahren lassen, er muß sich nur gleichförmig bewegen. Der Platz jedes Beobachters, der sich in diesem Autobus in Ruhe befindet, kann durch eine Zahl gekennzeichnet werden (wir erinnern uns, daß der Autobus sehr schmal ist!), die den Abstand von der Mitte des Autobusses darstellt. Wir werden den Abstand in der Bewegungsrichtung als positiv und in der anderen Richtung als negativ bezeichnen. Wenn wir uns mathematisch ausdrücken wollen, können wir sagen, daß jeder Beobachter und jeder Körper eine *Koordinate* hat, die seinen Platz im Autobus in bezug auf den Autobus kennzeichnet. Nun ändert der Mittelpunkt des Autobusses für einen äußeren Beobachter in der Fifth Avenue mit der Zeit seinen Ort. In bezug auf den starren Rahmen der Häuserblöcke der Fifth Avenue wird der Ort des Autobusmittelpunktes jetzt die 42. Straße sein, dann die 69. Straße usw. Wenn der Ort des Autobusmittelpunktes bei der 42. Straße ist, wird der Ort des Lenkers bei der 44. Straße und der Ort des letzten Fahrgastes bei der 40. Straße sein, da der Autobus vier Blöcke lang ist. All das ist einfach und bedeutet, daß wir die Koordinaten jedes Beobachters im Autobus relativ zum System der Fifth Avenue in jedem Augenblick finden können, wenn wir die Koordinate des Beobachters relativ zum Autobus kennen, wenn wir die Geschwindigkeit des Autobusses kennen und wenn wir wissen, von wo und wann der Autobus abgefahren ist. In der Sprache der Wissenschaft haben wir laut der klassischen Mechanik: die Koordinate im System der Fifth Avenue ist gleich der Geschwindigkeit des Autobusses, multipliziert mit der Fahrzeit, plus der Koordinate im Autobussystem.

Nehmen wir an, daß im Autobus ein Ereignis wie das Aufblitzen eines Lichtsignals vorfällt. Um dieses Ereignis zu beschreiben, müssen wir wissen, wann und wo es vorgefallen ist. Wir benötigen zu seiner Beschreibung zwei Zahlen, deren eine die Ortskoordinate, die andere die Zeitkoordinate bezeichnet. Während die Ortskoordinate für den Beobachter in der Fifth Avenue und im Autobus verschieden sein

wird, wird die andere Zahl, die die Zeit bezeichnet, nach der klassischen Mechanik für alle Beobachter die gleiche sein, da die Zeit absolut ist und eine Uhr ihren Rhythmus durch ihre Bewegung nicht ändert. So können wir die Raum- und Zeitkoordinaten eines Ereignisses in dem anderen System finden, wenn wir die Koordinaten von Raum und Zeit in dem einen System und die relative Geschwindigkeit dieser beiden Systeme kennen. Die Regel für die Raumkoordinate ist zuvor dargelegt worden. Die Regel für die Zeitkoordinate ist sehr einfach: die Zeitkoordinaten sind die gleichen. Daher sind zwei Systeme, die sich relativ zueinander gleichförmig bewegen, zwei Systeme, in denen die Gesetze der Physik die gleichen sind, miteinander in der klassischen Physik durch das verknüpft, was wir eine *Galilei-Transformation* nennen — eine Regel, die uns die Koordinaten von Ereignissen in einem System zu finden gestattet, wenn sie im anderen System bekannt sind.

Was die Relativitätstheorie behauptet, oder vielmehr, was sie aus ihren zwei Grundsätzen ableitet, ist die Ungültigkeit der Galilei-Transformation. Wir können dies besser ausdrücken, wenn wir sagen, daß sie in der Praxis gültig ist, wenn die relativen Geschwindigkeiten bedeutend kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit. Sie versagt vollkommen, wenn die relativen Geschwindigkeiten sich der Lichtgeschwindigkeit nähern. So dürfen wir die klassische Mechanik und die Galilei-Transformation benützen, wenn wir über Automobile, Überschallflugzeuge und sogar Raketen sprechen, wobei wir es praktisch mit Erscheinungen der klassischen Mechanik zu tun haben. Aber zum Beispiel in dem sich rasch erweiternden Gebiet der modernen Atomphysik, wo die Natur oder die menschliche Technik uns oft mit Geschwindigkeiten versehen, die im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit nicht klein sind, versagt die Galilei-Transformation und muß durch die Lorentz-Transformation ersetzt werden. Die Lorentz-Transformation vollbringt, was die Galilei-Transformation für solche Geschwindigkeiten nicht leisten konnte. Sie versieht uns mit einem Hilfsmittel,

die Raum- und Zeitkoordinaten von Ereignissen in dem einen System aufzufinden, wenn sie in dem anderen System bekannt sind und wenn die relative Geschwindigkeit der beiden Systeme überdies konstant ist. Was ist der wesentliche Unterschied zwischen den Transformationen von Galilei und von Lorentz? In der Galilei-Transformation ist die Zeitkoordinate eines Ereignisses für alle Systeme die gleiche, bei der Lorentz-Transformation trifft dies nicht zu. Der Rhythmus der Uhr ändert sich im Einklang mit der Relativität der Zeit, und zwei in einem System gleichzeitige Ereignisse sind in einem anderen System nicht gleichzeitig. Es wäre unrichtig zu behaupten, daß die Lorentz-Transformation sich für große Geschwindigkeiten bewährt, während die Galilei-Transformation auf kleine Geschwindigkeiten anwendbar ist. Es wäre richtiger zu sagen, daß die Lorentz-Transformation immer gilt. Bei kleinen Geschwindigkeiten gibt es praktisch keinen Unterschied zwischen den Transformationen von Galilei und Lorentz, aber diese Unterschiede werden wichtig und experimenteller Bestätigung zugänglich, wenn die Geschwindigkeiten sich der des Lichtes nähern.

Wir werden die Lorentz-Transformation hier nicht niederschreiben, obwohl die Kenntnis der Algebra zu ihrem Verständnis ausreichen würde. Es genügt der Hinweis, daß diese Transformation in einer neuen Art die Raum- und Zeitkoordinaten eines Ereignisses in einem System mit den Raum- und Zeitkoordinaten des gleichen Ereignisses in einem anderen System verknüpft und daß diese Verbindung aus den beiden von Einstein in seinem berühmten Artikel ausgesprochenen Grundannahmen folgt. Eine derartige Transformation bringt uns von einem System zu einem anderen, wenn beide sich relativ zueinander gleichförmig bewegen. Da die Naturgesetze in zwei solchen Systemen die gleichen sind, dürfen wir sagen, daß es die Lorentz- und nicht die Galilei-Transformation ist, die die Gesetze der Physik unverändert läßt.

So hat eine Umwälzung stattgefunden: ein neues und leistungsfähiges Prinzip wurde geboren, ein allgemeiner theoretischer Rah-

men, in den alle Naturgesetze hineingepaßt werden müssen. Wenn irgendein neues Gesetz ausgesprochen wird, fragen wir jetzt: Befriedigt dieses Gesetz das Prinzip der Relativitätstheorie? Gilt es also in gleicher Weise für alle gleichförmig relativ bewegten Systeme? Oder mathematisch formuliert: Ist dieses Gesetz gegenüber der Lorentz-Transformation (die den relativen Charakter nicht nur des Raumes, sondern auch der Zeit anerkennt) unveränderlich? Wenn wir einen solchen Maßstab an die Gesetze der Theorie Maxwells anlegen, wie dies Einstein in seiner Abhandlung getan hat, so sehen wir, daß Maxwells Theorie über die Erscheinungen der elektromagnetischen Wellen eine zulässige Theorie ist, weil sie das *Invarianzprinzip* befriedigt; das heißt, weil der Aufbau der Gleichungen Maxwells sich durch die Lorentz-Transformation nicht verändert.

Wie steht es nun mit der Newtonschen Mechanik? Sie ist gegenüber der Lorentz-Transformation nicht invariant; sie ist nur gegenüber der Galilei-Transformation invariant. So mußte eine neue Mechanik aufgebaut werden: eine Mechanik, die auf schnell bewegte Körper anwendbar ist und gegenüber der Lorentz-Transformation invariant ist. Diese neue Physik, die das neue Prinzip der Relativitätstheorie befriedigt, nämlich das Prinzip der Invarianz gegenüber der Lorentz-Transformation, wurde durch Einstein in seiner berühmten, 1905 veröffentlichten Arbeit aufgebaut. Zwei Hauptzweige der Physik, die mechanischen und die Feldtheorien, wurden verbunden, und zwar nicht durch Annahme eines Äthers, sondern durch das neue Relativitätsprinzip Einsteins, welches sowohl von den mechanischen als auch von den Feldauffassungen befriedigt werden muß. Die klassische Mechanik ergibt sich als eine gute und nützliche Annäherung an die neue Mechanik, solange die Geschwindigkeiten im Vergleich mit der Lichtgeschwindigkeit klein sind.

Dieser neue relativistische Rahmen wurde zu einem der wichtigsten Leitgedanken der modernen Physik. Einsteins geistige Ernte in unserem Jahrhundert gehört zu den reichsten Ernten, die je ein Mensch

der Wissenschaft beschert hat. Durch die Relativitätstheorie, wie sie im Jahr 1905 ausgesprochen wurde, war ein Weg zum Fortschritt gezeigt, und eine lange Strecke dieses Weges wurde später unter Einsteins Führung zurückgelegt. Ein Rückzug auf die alten Positionen der klassischen Physik ist undenkbar geworden. Der Einfluß der Relativitätstheorie auf die gesamte Entwicklung der modernen Physik kann gar nicht übertrieben werden; doch ist ihre Wirkung nicht auf die Physik allein beschränkt, denn die Relativitätstheorie hat auf unser ganzes modernes Leben eingewirkt. Sie hat unsere philosophischen Ansichten über Raum und Zeit beeinflußt und wird gewiß die zukünftige Entwicklung der Technik entscheidend beeinflussen.

### **Ein Prinzip statt zweier**

Warum haben wir von der Lichtgeschwindigkeit oder einer Geschwindigkeit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit, niemals jedoch von einer Geschwindigkeit oberhalb der Lichtgeschwindigkeit gesprochen? Der Grund liegt darin, daß nach der Relativitätstheorie keine Überlichtgeschwindigkeit bestehen kann. Nach der klassischen Mechanik ist die Geschwindigkeit eines Körpers, der sich innerhalb des Autobusses in der Fifth Avenue bewegt, in bezug auf den äußeren Beobachter gleich seiner Geschwindigkeit in bezug auf den Autobus plus der Geschwindigkeit des Autobusses selbst. Derart kann jede Geschwindigkeit vergrößert werden. Wie wir gesehen haben, ist jedoch das klassische Gesetz der Addition von Geschwindigkeiten mit den Grundannahmen der Relativitätstheorie unvereinbar. In der Tat — wenn Licht in bezug auf den Autobus sich mit der Geschwindigkeit  $c$  bewegt, dann wird seine Geschwindigkeit in bezug auf die Außenwelt (den Beobachter in der Fifth Avenue) noch immer den konstanten Wert  $c$  besitzen, ganz unabhängig davon, in welchem Tempo sich der Autobus bewegt. Das klassische Gesetz der Addition von Ge-

schwindigkeiten muß geändert werden, und diese Änderung kann aus der Lorentz-Transformation abgeleitet werden, die die klassische Galilei-Transformation ersetzt.

Die Relativitätstheorie führt zu einer wichtigen Schlußfolgerung, die Einstein in seinem ersten Artikel erwähnt und auf die er in einem kurzen Artikel im nächsten Band der „Annalen der Physik“ zurückkommt. Der Titel dieser Abhandlung lautet: „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ Würde ich sagen, daß die in dieser Arbeit ausgesprochenen Gedanken welterschütternd waren, so wäre das keine Übertreibung, denn hier finden wir zum erstenmal die theoretische Fassung einer möglichen neuen Erscheinung, die einen unbegrenzten Ausblick für die Wissenschaft und die Technik eröffnet hat. Dieser kurze Artikel erklärt: Der Gebrauch der Atomenergie ist *im Prinzip* möglich. Vierzig Jahre später wurde durch die Arbeit vieler Wissenschaftler bewiesen, daß die Verwendung von Atomenergie *praktisch* möglich ist. Der Beweis war deutlich — so deutlich wie die Photographien von der Explosion in der Wüste von Neu-Mexiko und die Zerstörung in Hiroshima. Es ist eine bittere Ironie, daß der Keim für diese Verwendung der Atomenergie durch den friedlichsten Mann der Welt gesät wurde — durch einen einsamen Mann, der Gewalttätigkeit verabscheut und rohe Kraft verachtet.

Einstein zeigte, daß die Verwendung von Atomenergie theoretisch möglich ist, aber niemand, auch nicht Einstein, wußte, ob sie eines Tages praktisch möglich sein würde oder nicht. Dieses Wissen wurde erst vor kurzer Zeit gewonnen, und es hätte sich ebensowohl herausstellen können, daß die Verwendung von Atomenergie nur theoretisch möglich ist. Dann wäre Einsteins Name nicht mit der Atombombe und nur sehr wenig mit der Technik verknüpft gewesen. Dennoch hätte sein Name in der Geschichte unserer Zivilisation deshalb nicht weniger Bedeutung gehabt. Die Schöpfung der Relativitätstheorie bedeutet die Geburt der modernen Physik; sie brachte eine tiefe Veränderung in unseren grundlegenden philosophischen Ideen und

eine gründliche Revision der Grundlagen der modernen Naturwissenschaft mit sich.

Der Schluß des kurzen Artikels von Einstein enthält die folgenden Zeilen:

„Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um  $L$ , so ändert sich die Masse in demselben Sinn um  $L/9 \cdot 10^{20}$ , wenn die Energie in Erg und die Masse in Gramm gemessen wird. Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maß veränderlich ist (z. B. bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird.“ (*„Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ Annalen der Physik, 18. Band, 1906.*)

Mit diesen Worten wird nicht nur ein wichtiger Schluß aus der Relativitätstheorie gezogen, es wird auch die Möglichkeit seiner Bestätigung vorhergesagt.

Ist ein solcher Schluß aus den beiden abstrakten Grundsätzen, auf denen diese Theorie beruht, möglich? Er ist möglich, denn kein neuer Grundsatz wird eingeführt.

Teilen wir unsere Aufgabe, diese grundlegende Ableitung zu erklären, in zwei Teile: zunächst wollen wir ihre vollen Konsequenzen darlegen; dann wollen wir ihren Zusammenhang mit den Annahmen der Relativitätstheorie prüfen.

Der klassische Physiker des 19. Jahrhunderts glaubte an zwei Erhaltungssätze: 1. das Gesetz der Erhaltung der Masse; 2. das Gesetz der Erhaltung der Energie. Das Gesetz der Erhaltung der Masse behauptet, daß man einen Körper erhitzen, verformen oder auch chemisch verändern kann, daß aber seine gesamte Masse dabei die gleiche bleiben wird. Hingegen ist Energie etwas, das Arbeit leisten kann, aber keine Masse besitzt. Beispielsweise verwandelt sich in einer Dampfmaschine Wärme in Arbeit, aber die Masse bleibt außer Betracht, denn nach der klassischen Physik hat Wärme weder Gewicht noch Masse. Die Sonne schickt Strahlung in den Weltenraum. Ein

kleiner Bruchteil dieser Strahlung fällt auf unsere Erde, wobei er die Strahlungsenergie mit sich trägt, die sich in Wärme verwandelt oder in die durch die Pflanzen aufgespeicherte chemische Energie. Aber auch diese Strahlung trägt keine Masse mit sich. So haben wir hier nebeneinander zwei verschiedene Größen, nämlich Masse und Energie. Sie erscheinen den klassischen Physikern als etwas sowohl qualitativ als auch quantitativ Verschiedenes. Masse wird in Gramm gemessen, während Energie ebenso wie Arbeit in Erg gemessen wird.

Ein Erg ist gleich der Arbeit, die durch die Kraft von einem Dyn über den Weg von einem Zentimeter geleistet wird. Ein Dyn ist die Kraft, die einem Gramm pro Sekunde einen Geschwindigkeitszuwachs von einem Zentimeter in der Sekunde erteilt. All dies sind Definitionen für Fachleute. Uns genügt die Kenntnis, daß ein Erg eine kleine Menge von Arbeit oder Energie ist. Wenn man ein Glas Wasser erwärmt, ändern sich seine Temperatur und sein Wärmeinhalt. Ändert sich die Masse dieses Quantums Wasser? Der klassische Physiker würde behaupten, daß sie sich nicht ändert.

Aber die Relativitätstheorie führt zu einer völlig anderen Antwort. Sie schließt, daß Energie nicht gewichtlos ist, sondern eine ganz bestimmte Masse hat. Wenn sich die Menge an Energie ändert, so ändert sich ihre Masse. Energie hat Masse und Masse hat Energie. Es gibt nicht zwei Erhaltungssätze. Es gibt nur einen Erhaltungssatz, nämlich das Prinzip der Erhaltung von Masse und Energie. Masse und Energie sind so verschieden wie Cents und Dollars, aber genau so, wie man Cents in Dollars umwechseln kann und umgekehrt, kann man, zumindest grundsätzlich, Masse in Energie und Energie in Masse umwechseln. Die Relativitätstheorie liefert den Wechselkurs. Die Tatsache, daß dieser Wechselkurs äußerst niedrig ist, hat den einheitlichen Erhaltungssatz vor der Wissenschaft verborgen gehalten, die Energie gewichtlos erscheinen lassen und auf diese Weise den Gebrauch von zwei Erhaltungssätzen statt einem fortgepflanzt.



scheidung zwischen Masse und Energie ab. Jede Masseneinheit stellt einen enormen Energievorrat dar, und jede Energieeinheit besitzt eine sehr kleine Masse. Die zwei Erhaltungssätze der Masse und der Energie wurden durch die Relativitätstheorie in einem Satz zusammengefaßt, den wir den Satz der Erhaltung entweder der Masse oder der Energie nennen können. Der Wechselkurs zwischen diesen zwei Größen ist festgelegt und die beiden Begriffe Masse und Energie sind vereinigt. Es sind zwei Ausdrücke für die gleiche zugrunde liegende Realität.

Auf welche Weise folgt dann das Verhältnis zwischen Masse und Energie aus den Annahmen der Relativitätstheorie? Obwohl wir dieses Resultat hier nicht ableiten können, haben wir doch schon genug gesagt, um Einsteins große Ableitung plausibel machen zu können.

Die Grundlagen der klassischen Mechanik liegen in Newtons Bewegungsgesetz. Eine Kraft ist notwendig, um eine Geschwindigkeit zu ändern, eine Beschleunigung hervorzurufen. Andererseits wird die Masse, wie bemerkt, in der klassischen Mechanik als etwas Konstantes, Unveränderliches betrachtet. Wenn man die Geschwindigkeit einer gegebenen Masse um einen Meter pro Sekunde vergrößern will, muß man eine ganz bestimmte Kraft aufwenden, und es macht nach Newton überhaupt keinen Unterschied, ob die Geschwindigkeit null oder nahezu Lichtgeschwindigkeit ist. Es kommt nicht auf die Geschwindigkeit an, sondern auf die Beschleunigung. Je größer die Masse ist, desto größer ist die Trägheit oder der Widerstand des Körpers gegen die Beschleunigung. Diese Tatsache ist so einfach und vertraut wie die Tatsache, daß ein großer Stein schwerer als ein kleiner Stein beschleunigt werden kann. Nach der klassischen Physik ändert sich Trägheit (also Masse) nicht mit der Geschwindigkeit. Demnach ist es genau so leicht oder schwierig, die Geschwindigkeit eines Körpers um einen Meter pro Sekunde zu vergrößern, wenn er sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, als wenn sich der gleiche Körper in Ruhe befindet. Offenbar kann dies nach der Relativitätstheorie, die keine Überlichtgeschwindig-

keiten zuläßt, nicht stimmen. Wenn wir die Unmöglichkeit unbegrenzter Beschleunigungen erklären wollen, müssen wir schließen, daß die Masse sich mit der Geschwindigkeit ändert! Tatsächlich muß die träge Masse, wenn die Geschwindigkeit nahezu Lichtgeschwindigkeit ist, bereits so groß sein, daß keine Kraft die Geschwindigkeit über die Lichtgeschwindigkeit hinaus steigern kann. Nach der Relativitätstheorie muß die Masse unendlich groß werden, wenn die Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert! Wie sonst könnten wir die Tatsache deuten, daß kein Körper auf Überlichtgeschwindigkeit beschleunigt werden kann?

Nach der klassischen Physik ist die Masse unveränderlich und hängt nicht von der Geschwindigkeit ab; aber nach der Relativitätstheorie ist sie veränderlich und hängt von der Geschwindigkeit ab. Wir kennen nicht nur das qualitative, sondern auch das quantitative Gesetz einer solchen Veränderung.

Nach der klassischen Physik hat ein bewegter Körper durch seine Bewegung „kinetische“ Energie. Diese Energie — wie jede Energie — ist gewichtlos. Oder formulieren wir die gleiche Sache anders: die Masse eines bewegten Körpers verändert sich nicht.

Aber in der Relativitätstheorie muß sich die Masse mit der Geschwindigkeit ändern, oder — um es anders auszudrücken — kinetische Energie muß Masse besitzen, wie klein sie auch sein mag. Und der Wechselkurs zwischen Masse und Bewegungsenergie ist genau der gleiche wie oben erwähnt: der Kurs, der die entwertete Energiewährung mit der hochwertigen Massewährung verbindet. Einstein hat auch gezeigt, daß die grundlegende Relation zwischen Masse und Energie nicht nur für Bewegungsenergie, sondern für jede Energieart gilt.

Wir sehen, wie weit sich die Verzweigungen der Relativitätstheorie ausbreiten. Seitdem wir unsere Darlegung begonnen haben, haben wir einen weiten Bereich behandelt, und jetzt können wir in den Schlüssen aus ihren Grundannahmen eine neue Physik entstehen

sehen. Das Fundament dieser neuen Physik wurde von Einstein mit großer Klarheit in zwei Artikeln errichtet — auf weniger Seiten, als hier gebraucht werden, um einige dieser Ergebnisse aufzuzeigen.

### **„Ein Paradoxon? Ein höchst geniales Paradoxon!“**

Seit seinem fünfzehnten oder sechzehnten Lebensjahr hat Einstein, wie er mir oft erzählte, über die Frage gegrübelt: Was geschieht, wenn jemand einen Lichtstrahl fangen will? Jahrelang dachte er über dieses Problem nach. Seine Lösung führte zur Relativitätstheorie. Wir sehen in diesem Beispiel einige wichtige Merkmale von Einsteins Genie. Zunächst und vor allem hat er die Fähigkeit, Fragen zu stellen. Zweitens hat er die Fähigkeit, jahrelang über das gleiche Problem nachzudenken, bis die Dunkelheit in das Licht des Verstehens übergeht. Und drittens hat er die Fähigkeit, einfache Gedankenexperimente zu formulieren — Experimente, die in der Praxis niemals ausgeführt werden können, die jedoch, wenn sie richtig gedeutet werden, unser Verständnis für die Umwelt klären und wandeln.

Tatsächlich erkennen wir am Beispiel eines Menschen, der einen Lichtstrahl einfängt und sich mit ihm vorwärtsbewegt, das große Rätsel, das zur Relativitätstheorie geführt hat. Für einen solchen Menschen sollten, weil er sich gleichförmig bewegt, alle Erscheinungen dieselben sein wie für einen stillstehenden Menschen — andererseits aber bleibt er immer an der Lichtwelle, so daß für ihn das Licht stillsteht. Irgend etwas würde zu schwingen scheinen, aber die Welle würde sich nicht ausbreiten. Die Relativitätstheorie und die Verwerfung der Galilei-Transformation ergeben die Lösung dieses Rätsels. Kein materieller Körper kann sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Für jeden Beobachter wird die Lichtgeschwindigkeit den konstanten Wert  $c$  behalten. Niemand kann mit Erfolg einem Lichtstrahl nachjagen.

Da wir nun die Wichtigkeit der Analyse der Gleichzeitigkeit in der Relativitätstheorie kennen, wollen wir näher auf die Uhren eingehen, die ihren Rhythmus verändern, und wollen überlegen, welche weiteren Schlüsse daraus gezogen werden können. Wir kehren zu dem Beispiel des Autobusses zurück, der die Fifth Avenue entlangteilt. Wenn der Autobuslenker in irgend einem Augenblick während der Reise findet, daß seine Uhr die gleiche Zeit zeigt wie die nächste äußere Uhr, so wird er später finden, daß seine Uhr von den vielen Uhren der Fifth Avenue abweicht, an denen er vorbeifährt; der Rhythmus seiner Uhr ist langsamer, und zwar um so langsamer, je größer die Geschwindigkeit ist. Die bewegte Uhr würde stehen bleiben, wenn die Geschwindigkeit des Autobusses die des Lichtes wäre. Aber erinnern wir uns: wir vergleichen den Rhythmus der einen Uhr im Autobus mit dem Rhythmus der vielen Uhren in der Fifth Avenue.

Daß der genannte Schluß aus der Relativitätstheorie gezogen werden kann, und zwar im besonderen aus der Lorentz-Transformation, erschien so phantastisch, daß Leute darüber Witze zu reißen begannen. Sie waren überzeugt, daß die Relativitätstheorie ein Unsinn sein müsse, da aus ihr solche Schlüsse gezogen werden können. Diese Einwände wurden oft in der Form des Zwillingsparadoxons ausgedrückt. Stellen wir uns vor, daß in der Fifth Avenue identische Zwillinge geboren werden und daß der eine Zwilling in unseren Autobus gesetzt wird, während der andere auf der Straße zurückgehalten wird. Nun fährt der Autobus mit großer Geschwindigkeit und die mit dem Autobus bewegte Uhr hat im Vergleich zu den Uhren der Fifth Avenue einen langsamen Rhythmus. Wir nehmen den Fall an, daß die Fifth Avenue weit in den Sternenraum führt, daß der eine Zwilling die Reise mit einer Geschwindigkeit nahe der des Lichtes beginnt und daß die Reise in den Weltraum lange dauert. Nun kann das Herz unseres Zwillinges im Autobus als eine Uhr vorgestellt werden. Es schlägt im Vergleich zu allen Menschenherzen, an denen es vorbeikommt, sehr langsam. Irgendwo in weiter Ferne hält der Autobus und kehrt zur Erde zurück.

Auf seiner Rückfahrt erspart er wieder Zeit, da die Verlangsamung des Rhythmus nur von der Geschwindigkeit und nicht von der Bewegungsrichtung abhängt. (Wir nehmen an, daß die Bewegung auf der Hin- und Rückreise gleichförmig ist. Die einzige Nichtgleichförmigkeit tritt auf, wenn sich der Autobus umdreht, aber der Einfluß einer derartigen ungleichförmigen Bewegung kann als beliebig klein angenommen werden, weil wir beliebig weit gehen können und beliebig viel Zeit sparen können.) So kehrt der eine Zwilling zum anderen Zwilling zurück. Aber wegen der Relativitätstheorie steht der eine Zwilling, der gereist ist, in seiner Jugend, hat all seine Zähne und all sein Haar behalten, während der andere Zwilling ein alter Mann ist, der sich dem Grabe nähert. Die beiden identischen Zwillinge werden nach der Relativitätstheorie ganz verschieden aussehen; denn was wir ausgeführt haben, ist ein Schluß aus ihren beiden Grundsätzen. Was ist die Antwort auf das Paradoxon von den zwei identischen Zwillingen?

Dieses Paradoxon wurde immer wieder der Relativitätstheorie entgegengehalten, um zu zeigen, wie absurd ihre Schlüsse sind. Aber tatsächlich widersprechen sie nicht der Erfahrung, sondern nur unseren herkömmlichen Begriffen von der absoluten Zeit. Wir haben ein derartiges Experiment niemals durchführen können. Wenn wir es könnten, würde nach meiner Meinung die Antwort genau so ausfallen, wie es die Relativitätstheorie vorhersagt.

Immerhin würde ein direktes Experiment, das zeigt, daß eine bewegte Uhr ihren Rhythmus ändert, überzeugend wirken. Es gibt eine gewaltige Menge von Beweisen für die Relativitätstheorie, doch sind diese Beweise ziemlich indirekter Natur. Eine direkte Bestätigung ist nicht leicht, weil die Unterschiede zwischen der klassischen Mechanik und der Relativitätstheorie, so wie alles in der Relativitätstheorie, erst entdeckt werden können, wenn die Geschwindigkeiten sich der des Lichtes nähern. Jedenfalls wurde im Jahr 1938, lange nachdem die Relativitätstheorie formuliert war, von Ives ein interessantes Experiment durchgeführt, das direkt den Wechsel des Rhythmus mit

der Geschwindigkeit aufzeigt. Das Experiment betraf das Wasserstoffatom, das als eine natürliche Uhr vorgestellt werden kann, deren Rhythmus durch ihre Spektrallinie aufgezeigt wird. Das scharfsinnige Experiment von Ives zeigte nicht nur, daß ein bewegtes Wasserstoffatom seinen Rhythmus verändert, sondern auch, was viel wichtiger ist, daß diese Veränderung genau das von der Relativitätstheorie vorhergesagte Maß besitzt.

Wie wir gesehen haben, hat die von der Relativitätstheorie eingeleitete Revolution unsere herkömmlichen Begriffe von Zeit und Masse umgeworfen. Ein anderer radikal veränderter Begriff ist der der Länge. Wieder werden wir uns damit begnügen, das abgeleitete Ergebnis darzulegen.

Kehren wir zu unserem Autobus in der Fifth Avenue zurück. Wie schon erwähnt ist dieser Autobus vier Häuserblöcke lang, während er stillsteht. Aber wie lang ist er, wenn er sich bewegt? Wir müssen unseren Vorurteilen mißtrauen und uns vor Behauptungen hüten, die zunächst selbstverständlich scheinen. Statt zu antworten „Natürlich ist er immer vier Blöcke lang“, wie der klassische Physiker gesagt haben würde, wollen wir vorsichtig sein und lieber fragen: „Was meinst du mit der Frage nach seiner Länge, während er sich bewegt?“ Ich würde folgende Antwort vorschlagen: „Du weißt, daß sich der Autobus, sagen wir, mit halber Lichtgeschwindigkeit bewegt. Du stehst mit einer Stoppuhr und drückst los, wenn die Vorderwand des Autobusses an dir vorbeifährt. Du stoppst ab, wenn die Rückwand des Autobusses vorbeifährt. Auf diese Weise wirst du die Zeit erfahren, die der Autobus braucht, um vorbeizukommen. Multipliziere diese kurze Zeit mit der Geschwindigkeit des Autobusses und du erfährst die Länge, die er hat, während er sich bewegt. Du kannst andere Methoden ausdenken, aber du wirst kein sinnvolles Experiment finden, das nicht den Gebrauch einer Uhr erforderte. Doch die Zeit ist relativ und Uhren verändern in der Bewegung ihren Rhythmus, wie wir gesehen haben.“ So wäre es nicht erstaunlich, wenn das Ergebnis eines

solchen Experimentes zeigen würde, daß auch Länge relativ ist. Tatsächlich würde in unserem Fall, in dem der Autobus mit halber Lichtgeschwindigkeit fährt, seine Länge um ungefähr fünfzehn Prozent verkleinert sein. Seine Ausdehnung würde in der Bewegungsrichtung auf nichts zusammenschrumpfen, wenn die Geschwindigkeit die des Lichtes erreicht. Länge ist ebenso wie Zeit relativ.

Ich habe hier die revolutionären Veränderungen zu skizzieren versucht, die durch Einsteins zwei Artikel bewirkt wurden. Welche Wirkung hatten diese neuen Gedanken? Zunächst gab es kaum eine Wirkung. Heutzutage werden wichtige Ereignisse vielleicht schneller erkannt und eine umwälzende neue Arbeit ruft oft eine Flut anderer Beiträge zum Problem hervor. Diese werden von Leuten geschrieben, die die neuen Gedanken bis in ihre Einzelheiten verfolgen und sie mathematisch entwickeln. Doch trat unmittelbar nach dem Erscheinen der Abhandlungen Einsteins keine solche Flut von Arbeiten auf. Sie begann nach Ablauf von etwa vier Jahren — einer langen Zeitspanne für Kenntnisaufnahme durch die Wissenschaft. Und doch weiß ich, daß es Physiker gab, die in der Zwischenzeit Einsteins Artikel sehr sorgfältig lasen und in ihm die Geburt einer neuen Wissenschaft erkannten. Mein Freund Professor Loria hat mir erzählt, wie sein Lehrer, Professor Witkowski in Krakau (er war ein sehr bedeutender Lehrer!), Einsteins Arbeit las und Loria zurief: „Ein neuer Kopernikus ist geboren. Lesen Sie Einsteins Arbeit!“ Als Professor Loria später Professor Max Born auf einer Physikerzusammenkunft traf, erzählte er ihm von Einstein und fragte ihn, ob er die Arbeit gelesen habe. Es stellte sich heraus, daß weder Born noch sonst jemand dort von Einstein gehört hatte. Sie gingen in die Bibliothek, nahmen vom Bücherbrett den 17. Band der „Annalen der Physik“ und begannen mit der Lektüre von Einsteins Artikel. Max Born erkannte sofort seine Größe und auch die Notwendigkeit für formale Verallgemeine-

rungen. Später wurde Borns eigene Arbeit über die Relativitätstheorie einer der wichtigsten Beiträge der Frühzeit zu diesem Feld der Wissenschaft.

Aber erst 1908 oder 1909 wurde die Aufmerksamkeit einer größeren Anzahl von Wissenschaftlern auf Einsteins Ergebnisse gelenkt. Einer der Umstände, der dazu beitrug, die Relativität bekannter zu machen, war das Erscheinen des Vortrages „Raum und Zeit“ von Minkowski im Jahre 1908. Hermann Minkowski, ein bedeutender Mathematiker, war damals Professor in Göttingen. Der berühmte Vortrag, den er auf dem achtzigsten Kongreß der „Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte“ hielt, war wohl sein letzter öffentlicher Vortrag, denn er starb bald danach, allzufrüh. Die ersten Worte des Vortrages von Minkowski waren eine prophetische Voraussage des tiefen Einflusses, den die Gedanken Einsteins auf das moderne Denken ausüben sollten:

„Meine Herren! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken, und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.“

Das mathematische Genie Minkowskis brachte Einsteins Gedanken in eine neue geometrische Form, die ihre Schönheit und Einfachheit vollends offenbarte. Manchmal hören wir, daß „die Zeit in der Relativitätstheorie eine vierte Dimension ist“, und wir werden durch den mystischen Klang dieser Worte beeindruckt. Aber es ist gar nichts Mystisches an ihnen. Die Ereignisse in der Welt müssen durch vier Zahlen beschrieben werden, deren drei sich auf Lagen im Raum und eine auf die Zeit bezieht. Minkowski zeigte, daß es besser ist, nicht den Raum allein als das Medium unserer Ereignisse zu betrachten, sondern die Raum-Zeit. Die Aufspaltung eines solchen Raum-Zeit-Mediums in Raum und Zeit hängt von dem Beobachtungssystem ab.

Wir können hier auf Minkowskis mathematische Arbeit über die Relativitätstheorie nicht näher eingehen, weil man mathematische Formeln nicht ohne den Gebrauch mathematischer Symbole erklären kann.

Zwischen 1908 und 1918 wurde die Relativitätstheorie unter den Physikern und Mathematikern bekannt. Vielen von ihnen wurde bewußt, daß eine Umwälzung stattgefunden hatte. Aber sowohl Begeisterung wie Zweifel traten noch mit Zurückhaltung auf. Erst später wurden beide geäußert, und zwar lauter, als es jemals zuvor in der Geschichte der Wissenschaft geschehen war.

## Die zweite Umwälzung des physikalischen Weltbildes durch Einstein

(Allgemeine Relativitätstheorie)

### Der fallende Aufzug

Die erste Einsteinsche Umwälzung war vollbracht. Vielleicht war Einstein selbst der Mann, der am wenigsten von ihren Ergebnissen befriedigt war. Er erkannte bald, daß die Umwälzung nicht weit genug gegangen war, daß es in der Physik noch tiefwurzelnde Schwierigkeiten gab.

Viele Jahre später sagte ich zu Einstein: „Ich glaube, daß die Spezielle Relativitätstheorie auch dann — und ohne große Verzögerung — formuliert worden wäre, wenn Sie es nicht getan hätten. Die Zeit war reif dafür.“ Einstein erwiderte: „Ja, das ist wahr, doch trifft dies nicht für die *Allgemeine* Relativitätstheorie zu. Ich zweifle, ob sie bis heute bekanntgeworden wäre.“ Ich glaube, daß diese Antwort Einsteins Rolle in der zweiten Umwälzung gut kennzeichnet.

Die Ereignisse vorwegnehmend, wollen wir zwei Ausdrücke einführen, die heute bei der Diskussion der Relativität verwendet werden: *speziell* (oder eingeschränkt) und *allgemein*. Wir werden den Ausdruck „*Spezielle Relativitätstheorie*“ verwenden, wenn wir von den im vorhergehenden Kapitel dargelegten Ideen sprechen, und den Ausdruck

„Allgemeine Relativitätstheorie“, wenn wir über die spätere Entwicklung sprechen, mit der wir uns nun befassen wollen.

Die Spezielle Relativitätstheorie lag in der Luft. Die von ihr beseitigten Widersprüche waren den Physikern bekannt, denn die Wunden am Körper der Physik waren für viele sichtbar. Doch traf dies nicht auf die Allgemeine Relativitätstheorie zu. Einstein war der einzige, der noch immer Widersprüche und Schwierigkeiten sah und an ihrer Beseitigung arbeitete. Im Falle der Speziellen Relativitätstheorie war die Krankheit bekannt; nur die Medizin war unbekannt. Die Allgemeine Relativitätstheorie glich jedoch dem Heilmittel für eine ernste Krankheit, die niemandem auffiel, außer Einstein und bis zu einem gewissen Grad dem Wiener Physiker Ernst Mach. Sogar Planck, der große Planck, der die Entwicklung der Quantentheorie begann, sagte zu Einstein: „Alles ist jetzt so weit erledigt, warum also kümmern Sie sich um diese anderen Probleme?“ Und doch kümmerte sich Einstein darum, und zwar ganz für sich allein. Acht Jahre liegen zwischen der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Acht Jahre ständigen Denkens, das schließlich in der neuen Lösung des großen Problems der Schwerkraft Frucht trug.

Vor mir liegt eine Arbeit, die Einstein 1911 als Professor in Prag schrieb. Sie erschien in den „Annalen der Physik“ unter dem Titel „Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes“. Es ist eine höchst interessante Abhandlung, denn sie enthüllt mehr als irgendeine andere die Gedankengänge Einsteins. Teilweise ist sie falsch, sie enthält halbe Wahrheiten, Vermutungen, eine erregende Bewußtheit, daß die wirkliche Wahrheit zwar nicht weit entfernt, aber doch sehr anders ist. Sie zeigt den ersten Lichtschimmer beim Durchbruch durch die Dunkelheit. Sie zeigt auch Einsteins Leidenschaft für Gedankenexperimente und seine kindliche Fähigkeit, über einfache Dinge zu staunen — über Dinge, die so einfach und vertraut sind, daß sie von anderen völlig unbemerkt bleiben.

Seit Galilei haben die Physiker gewußt, daß alle Körper mit der

gleichen Beschleunigung fallen. Alle Körper, die von derselben Höhe fallen gelassen werden, werden den Erdboden nach der gleichen Zeitspanne erreichen, wenn man vom Luftwiderstand absieht. Niemand in unserem Jahrhundert, ausgenommen Einstein, wunderte sich noch über dieses Gesetz. Das Experiment hatte gezeigt, daß das Gesetz streng gültig ist, soweit wir das feststellen können. Es gibt nicht den mindesten Unterschied zwischen den Beschleunigungen verschiedener Körper, die am gleichen Ort auf unsere Erde fallen.

Der Unterricht tötet unsere Fähigkeit, uns zu wundern. Nur ein Genie kann davon unverdorben bleiben. In den letzten drei Jahrhunderten der Wissenschaftsentwicklung war Einstein der erste, der in der Gleichheit der Beschleunigungen einen wichtigen Fingerzeig sah. Wir können uns eine Welt vorstellen, in der ein solches Gesetz nicht gilt; eine Welt, in der Elefanten so langsam fallen, daß sie fast durch die Luft schweben, während Babys mit gefährlicher Beschleunigung zu Boden stürzen. Aber das Schwerefeld unserer Erde veranlaßt Babys und Elefanten, mit der gleichen Beschleunigung zu fallen. Was bedeutet dieser wichtige Fingerzeig? Im Rahmen der klassischen Mechanik erscheint er als reiner Zufall!

Einstein erzählte mir, wie er seit seiner Knabenzeit über den Mann, der einem Lichtstrahl nachlief, und über den Mann, der in einem fallenden Aufzug eingeschlossen war, nachdachte. Das Bild des Mannes, der dem Lichtstrahl nachlief, führte zur Speziellen Relativitätstheorie. Das Bild des Mannes im fallenden Aufzug führte zur Allgemeinen Relativitätstheorie. In dem vorhin erwähnten Artikel Einsteins finden wir unausgesprochen das Bild des Mannes im fallenden Aufzug. Wir müssen dieses Bild besprechen.

Stellen wir uns einen Wolkenkratzer vor. Ein Aufzug wird auf dessen Höhe gehoben und dann losgelassen, so daß er mit gleichförmig beschleunigter Bewegung frei fällt. Die Beobachter in ihm fürchten sich nicht vor dem bevorstehenden Aufprall auf den Boden des Schachtes, sondern verfolgen tapfer ihre Forschungen. Um unser Bild anschau-

licher zu machen, stellen wir uns vor, daß der Aufzug aus Glas besteht, so daß äußere Beobachter hineinblicken können, und daß die Beobachter im Aufzug und die Beobachter auf dem Boden ihre Feststellungen vergleichen können. Es besteht eine Ähnlichkeit zwischen der vorher gebrauchten Denkmethode und der Methode, die wir jetzt anwenden werden. Wieder haben wir zwei Systeme, nämlich den Aufzug und die Erde. Aber es besteht auch ein entscheidender Unterschied. Die relative Bewegung der zwei Systeme ist nicht mehr gleichförmig; sie ist jetzt beschleunigt. Dennoch wird unsere Methode der Erklärung ähnlich bleiben. Wieder werden wir den Beobachtern innerhalb und außerhalb des Aufzuges Fragen stellen und wieder wird uns eine einfache Überlegung zu weitreichenden Schlüssen führen.

Das Mädchen, das den Aufzug bedient, benützt seine Puderdose und seinen Lippenstift und läßt dann beide fallen. Was geschieht mit Lippenstift und Puderdose? Die Antwort lautet: Von innerhalb des Aufzuges betrachtet, bleiben Lippenstift und Puderdose dort in Ruhe, wo sie losgelassen wurden. Warum auch nicht? Alle Gegenstände fallen mit der gleichen Beschleunigung in bezug auf die Erde. Daher befinden sie sich in bezug auf einander in Ruhe. Gegenstände, die in dem frei fallenden Aufzug losgelassen werden, fallen weder auf seinen Boden noch steigen sie zu seiner Decke. Sie bleiben, wo sie waren, als sie losgelassen wurden. Was geschieht, wenn das Mädchen der Puderdose einen Stoß versetzt? Dann wird sich die Puderdose gleichförmig in der Richtung bewegen, in der sie gestoßen wurde, bis sie durch einen Anprall an die Wand des Aufzuges aufgehalten wird. Nach einigen Versuchen wird der Beobachter innerhalb des Aufzuges das folgende Gesetz formulieren: Alle Körper in meinem System bleiben entweder in Ruhe oder bewegen sich gleichförmig, bis sie durch Kräfte oder durch die Wände meines Systems gestört werden, oder auch durch das herannahende Ende unserer Welt — das heißt, durch den nahenden Aufprall des Aufzuges auf den Schachtboden. Das ist beinahe das Newtonsche Trägheitsgesetz, das wir in der Schule gelernt

haben. Ich sage „beinahe“, weil in den Schulen weder über die Einschränkung durch Wände noch über das Ende der Welt gesprochen wurde.

Wir müssen hier unterbrechen, um die Bedeutung unseres Bildes zu unterstreichen.

Nach Newtons Trägheitsgesetz — dem ersten der drei berühmten Gesetze Newtons — befinden sich alle Körper entweder in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung, bis sie durch die Wirkung äußerer Kräfte gestört werden. Ist dieses Gesetz richtig? Wenn man einen Körper über der Erde losläßt, wird er nicht in Ruhe bleiben; er wird zu Boden fallen. Die Mechanik Newtons lehrt uns, daß das Trägheitsgesetz hier nicht gilt, weil in unserem System eine Kraft wirkt: die Schwerkraft. Um die Wirkungen dieser Schwerkraft zu vermeiden, kann man einige Kugeln auf einer waagrechteten Ebene, zum Beispiel auf einem glatten Tisch, stoßen. Wieder werden diese Kugeln nach einiger Zeit ihre Bewegung beenden. Dann wird der mechanische Physiker im Sinne Newtons erklären, daß sie sich infolge der Reibung nicht gleichförmig bewegt haben; zur Nachprüfung des Trägheitsgesetzes muß auch die Reibung beseitigt werden. Aber es kommt noch schlimmer. Stellen wir uns vor, daß wir unsere Experimente auf einem Ringenspiel ausführen. Dort wird jeder Körper nach auswärts geschleudert, fort vom Mittelpunkt des Ringelspieles. So gelten die Gesetze der Newtonschen Mechanik nicht auf einem Ringenspiel, denn ein Beobachter wird dort finden, daß ein Körper nicht in Ruhe bleibt, sondern sich so weit wie möglich von dem Mittelpunkt zu entfernen sucht. Aber wenn das Trägheitsgesetz auf dem Ringenspiel ungültig ist, dann gilt es auch auf unserer Erde nicht, die sich ebenfalls dreht.

Ich glaube, wir haben das Recht, durch all dies in Staunen versetzt zu sein und dem Anhänger der Newtonschen Mechanik eine einfache Frage zu stellen:

„Um Himmels willen, wo *ist* denn eigentlich dein System, in dem das Trägheitsgesetz gilt?“

Wenn er ehrlich ist, wird er uns antworten:

„Ich weiß es nicht. Du mußt danach suchen. Die Erde stellt manchmal eine gute Annäherung an ein solches System dar, und manchmal nicht. Es hängt von deiner Fragestellung und dem Präzisionsgrad deiner Experimente ab. Ich weiß nur, daß du, wenn du ein solches System findest, unendlich viele solcher Systeme hast, denn jedes andere System in gleichförmiger Bewegung relativ zu dem einen guten System ist ebenfalls ein gutes System.“

Unsere Diskussion hat eine schwache Stelle im Lehrgebäude der klassischen Mechanik zum Vorschein gebracht. Wir kennen die Gesetze, aber wir kennen nicht das System, auf das sie sich beziehen. Da der gewöhnliche Ausweg aus einer Schwierigkeit in der Erfindung eines neuen Namens liegt, nennen wir ein System, in dem die Gesetze der Mechanik gelten, ein Trägheitssystem; aber wir können nicht sagen: „Dieses oder jenes ist ein Trägheitssystem.“ Wir wissen nur theoretisch, was ein Trägheitssystem ist. Es ist eines, in dem die Gesetze der Mechanik gelten. Aber wir wissen nicht, ob und wo solche Systeme existieren.

Wir kehren zu unseren Beobachtern im fallenden Aufzug zurück. Wie Einstein hervorhob, haben wir hier ein Beispiel eines Systems, das beinahe ein Trägheitssystem ist, aber nicht ganz. Sein Charakter als Trägheitssystem ist räumlich begrenzt. Das System ist nicht ganz ein Trägheitssystem, denn früher oder später wird der Lippenstift, wenn er gestoßen wird, auf die Wand auftreffen. Es würde nichts nützen, den Aufzug größer und größer zu machen, denn wir wissen, daß alle Körper nur dann mit derselben Beschleunigung fallen, wenn sie sich an derselben Stelle des Raumes oder in unmittelbarer Nähe dieser Stelle befinden. Unser Aufzug darf also nicht zu groß sein. Außerdem ist unser Trägheitssystem natürlich zeitlich begrenzt, denn die Welt unseres inneren Beobachters wird durch die unvermeidliche Katastrophe des Aufpralles ein Ende finden. Wir nennen ein System von der Art des Aufzuges ein „nahezu vollkommenes Trägheitssystem“.

stem“. So dürfen wir sagen, daß Einsteins Gedankenexperiment die Existenz eines nahezu vollkommenen Trägheitssystemes anzeigt.

Bisher haben wir nur über Beobachter innerhalb des Aufzuges gesprochen. Der äußere Beobachter hat sehr wenig Neues oder Interessantes zu berichten. Offenbar ist sein System im Hinblick auf die Schwerkraft kein Trägheitssystem. Für ihn fallen der Aufzug, das Mädchen, sein Lippenstift und seine Puderdose sämtlich mit der gleichen Beschleunigung im Schwerfeld der Erde.

Wir bemerken an Einsteins Überlegungen die vertraute Form: wichtige Schlüsse, gezogen aus einfachen Gedankenexperimenten. Wir werden einige von ihnen verfolgen.

Wir haben zwei Systeme (den Aufzug und die Erde mit dem Aufzugschacht) in relativer beschleunigter Bewegung. Ein System, der Aufzug, ist beinahe ein Trägheitssystem. In einem solchen System sind die Gesetze der Mechanik fast streng gültig; es gibt dort keine Schwerkraft, denn sie ist durch die freie Bewegung des Aufzuges ausgeschaltet worden. (Aber der äußere Beobachter wird sagen, daß sein System wegen des Schwerfeldes, in dem alle Körper mit der gleichen Beschleunigung fallen, kein Trägheitssystem ist.) Wenn sie durch den durchsichtigen Boden ihres Aufzuges blicken, werden die Insassen einen ungeheuren Körper auf sich zustürzen sehen. Da sie nichts von der Schwerkraft wissen und die Gültigkeit der Newtonschen Mechanik annehmen, werden sie die beschleunigte Bewegung dieses Körpers sehen und werden mit Schrecken sagen, daß irgendeine konstante Kraft diesen Körper in ihre Richtung stößt, um ihre Welt zu zerstören. Daher können diese Beobachter — in einem begrenzten Raum und in einer begrenzten Zeit — ihre Beobachtungen widerspruchsfrei beschreiben, wobei sie die Newtonsche Mechanik benützen und kein Schwerfeld annehmen.

Als wir vorhin die Spezielle Relativitätstheorie diskutierten, erkannten wir eine widerspruchsfreie Beschreibung der Ereignisse in zwei Systemen als möglich, wenn diese zwei Systeme sich in gleich-

förmiger relativer Bewegung befinden. Der Übergang von einem System zum anderen wird durch die Lorentz-Transformation beherrscht. Aber jetzt haben wir zwei Systeme, die sich in bezug aufeinander beschleunigt bewegen. Jeder Übergang von einem System zum anderen bringt jetzt das Erscheinen eines Schwerfeldes in dem einen und sein Verschwinden in dem anderen mit sich. Wenn wir also unsere Überlegungen erweitern wollen, indem wir Systeme einschließen, deren relative Bewegung nicht gleichförmig ist, müssen wir das überaus wichtige Erscheinungsgebiet der Gravitation (Schwerkraft) in Rechnung ziehen. Das Schwerfeld kann (zumindest örtlich) durch die Wahl eines geeigneten Bezugssystems ausgelöscht werden oder geschaffen werden! Dies trifft nur deshalb zu, weil in einem Schwerfeld alle Körper an einem gegebenen Punkt die gleiche Beschleunigung haben. Ohne diesen einfachen Fingerzeig, der 300 Jahre lang mißachtet worden war, wäre alles hier Gesagte sinnlos und die Allgemeine Relativitätstheorie, wie wir sie kennen, unmöglich. Unsere einfachen Überlegungen zeigen uns, daß dieser vergessene Fingerzeig, wenn er richtig verstanden wird, kein zufälliger, sondern von grundlegender Bedeutung ist, ja, daß er uns zur Allgemeinen Relativitätstheorie führt.

Unsere Beweisführung war einfach, und keine Mathematik war dazu erforderlich. Aber selbst diese qualitative Beweisführung wird uns zu einer neuen Folgerung führen, die durch ein Experiment entweder bestätigt oder widerlegt werden kann.

Als wir früher die Spezielle Relativitätstheorie besprachen, zogen wir einen äußerst wichtigen Schluß; wir fanden die Verbindung von Masse und Energie. Um es ganz einfach auszudrücken: dieses Ergebnis führte zur größten Entdeckung seit der Nutzbarmachung des Feuers. Ausgehend nun von unserem Beispiel des fallenden Aufzuges werden wir einen Schluß ziehen, der eine äußerst wichtige Rolle dabei gespielt hat, Menschen in aller Welt auf die Relativitätstheorie und ihren Urheber aufmerksam zu machen.

Stellen wir uns zwei kleine Löcher vor, die genau in der gleichen Höhe in entgegengesetzte Wände unseres Aufzuges gebohrt sind. In eines dieser Löcher schieben wir eine Taschenlampe, die wir auf- und abdrehen, wodurch wir Lichtsignale zur entgegengesetzten Aufzugwand senden. Offenbar wird sich das Licht in dem frei fallenden Aufzug, da er beinahe ein Trägheitssystem darstellt, mit konstanter Geschwindigkeit in einer geraden Linie fortbewegen. Nach einer sehr kurzen Zeitspanne wird es das Loch in der entgegengesetzten Wand treffen. Diese Beweisführung überzeugt. Wir haben nichts anderes getan, als die Gesetze der Lichtfortpflanzung anzuwenden, die für ein Trägheitssystem als gültig angenommen werden. Aber wie steht es mit dem äußeren Beobachter auf der Erde, für den ein Schwerfeld besteht? Durch die Glaswände wird er das Lichtsignal kommen und die gegenüberliegende Wand erreichen sehen. Aber in der kurzen Zeitspanne (wir wollen alles wie durch eine Zeitlupe betrachten), während der das Lichtsignal sich zur zweiten Wand bewegt, bewegt sich der ganze Aufzug für den äußeren Beobachter abwärts. Das ist sogar dann richtig, wenn der Aufzug seine Abwärtsfahrt genau in dem Augenblick beginnt, in dem das Lichtsignal ausgesendet wird. Selbst wenn die Anfangsgeschwindigkeit des Aufzuges null ist, ist seine Beschleunigung nicht null, und der Aufzug wird sich ein wenig abwärts bewegen, während der Lichtstrahl seinen Weg zur gegenüberliegenden Wand vollendet. Das Licht wird den Aufzug auf einem niedrigeren Niveau zu verlassen scheinen, als es in ihn eingetreten ist.

Was wird dieser äußere Beobachter sagen? Offenbar wird er sagen, daß der Lichtstrahl sich in einem Schwerfeld krümmt, daß das Schwerfeld den geraden Weg eines Lichtstrahles verformt. Immerhin sollte der Beobachter, der die Spezielle Relativitätstheorie kennt, weder empört noch erstaunt sein. Er weiß aus der Speziellen Relativitätstheorie, daß alle Energie Masse und alle Masse Energie hat. Der bewegte Lichtstrahl trägt Energie mit sich, und so ist es natürlich, daß er im Schwerfeld ebenso abgelenkt wird, wie die Bahn

eines horizontal in Bewegung gesetzten Geschosses im Schwerfeld gekrümmt wird. Dieser Effekt kann nur sehr klein sein, aber ein von einem Stern ausgesandter Lichtstrahl, der den Sonnenrand passiert, müßte derart abgelenkt werden, daß dies vielleicht experimentell nachgewiesen werden könnte. Während einer Sonnenfinsternis können wir Sterne in der Nachbarschaft der verdunkelten Sonne photographieren. Das heißt, daß die von diesen Sternen ausgesendeten Lichtstrahlen auf ihrer Reise zur Erde am Sonnenrand vorbeilaufen. Vergleichen wir eine solche Photographie mit einer Photographie desselben Himmelsausschnittes, wenn die Sonne an einem anderen Ort steht! Die beiden Bilder müssen sich ein wenig unterscheiden, weil in einem Fall die Lichtstrahlen durch das Schwerfeld der Sonne abgelenkt wurden, im anderen Fall aber nicht. In seiner Arbeit aus dem Jahr 1911 berechnete Einstein die Ablenkung und sagte die Erscheinung der Biegung des Lichtes unter dem Einfluß eines Schwerfeldes voraus. Diese Berechnung stimmte nicht genau. Der von Einstein berechnete Zahlenwert war zu klein. Er verfügte noch nicht über die volle Kenntnis der Allgemeinen Relativitätstheorie. Er sollte sie während der nächsten vier Jahre gewinnen, als er zu seinen Berechnungen zurückkehrte und sie verbesserte. Aber die Voraussage dieses Effektes erschien bereits in Einsteins Arbeit aus dem Jahr 1911. Er beendete sie mit den denkwürdigen Worten:

„Es wäre dringend zu wünschen, daß sich Astronomen der hier aufgerollten Frage annähmen, auch wenn die im vorigen gegebenen Überlegungen ungenügend fundiert oder gar abenteuerlich erscheinen sollten. Denn abgesehen von jeder Theorie muß man sich fragen, ob mit den heutigen Mitteln ein Einfluß der Gravitationsfelder auf die Ausbreitung des Lichtes sich konstatieren läßt.“ (*Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*“, *Annalen der Physik*, 1911.)

Was wurde aus Einsteins Herausforderung an die Astronomen? Acht Jahre vergingen. Inzwischen übersiedelte Einstein von Prag nach

Zürich, dann von Zürich nach Berlin. Dort war er, als der erste Weltkrieg ausbrach, und dort beendete er seine Arbeit über die Allgemeine Relativitätstheorie.

Die Anerkennung der Relativitätstheorie verbreitete sich langsam von den theoretischen Physikern zu den Experimentalphysikern, Astronomen, Mathematikern und Philosophen. Sie wurde als ein äußerst schwieriger Gegenstand betrachtet; es hieß, sie erfordere ein Kenntnis von mathematischen Methoden, die zu jener Zeit weder allgemein bekannt noch hinreichend entwickelt waren. Tatsächlich wurde die Riemannsche Geometrie und später die sogenannte Nicht-Riemannsche Geometrie dazu weiter entwickelt, um den Physikern ein geeignetes mathematisches Rüstzeug zu geben. Die Relativitätstheorie regte das Wachstum dieses Zweiges der Mathematik stark an. Heute wird er an jeder großen Universität unterrichtet.

Erst nach dem Krieg verbreitete sich die Kenntnis der Allgemeinen Relativitätstheorie in England und anderen Ländern der Entente. 1919 wurden zwei englische Expeditionen ausgesandt, die eine nach Sobral in Brasilien, die andere nach Principe an der afrikanischen Küste. Als der Mond die Sonne verfinsterte, photographierten die Wissenschaftler die in Sonnennähe sichtbaren Sterne. Sodann führten sie Monate hindurch langwierige Messungen und Berechnungen aus, um zu finden, ob sich Lichtstrahlen in einem Schwerefeld biegen und ob dieser Effekt zahlenmäßig mit dem übereinstimmt, den die Allgemeine Relativitätstheorie voraussah. Die Ergebnisse, wie sie damals mitgeteilt wurden, schienen Einsteins Vorhersage glänzend zu bestätigen. (Spätere Messungen ergaben eine weniger genaue Übereinstimmung. Aber es besteht heute kaum ein Zweifel, daß Lichtstrahlen wirklich durch das Schwerefeld abgelenkt werden.)

Niemand weiß warum, aber plötzlich beschäftigte diese Erscheinung der sich biegenden Lichtstrahlen die Phantasie der gesamten zivilisierten Welt. Bald nach 1920 wurde die ganze Welt auf die Relativitätstheorie und ihren Schöpfer aufmerksam. Ein einsamer Mann,

der niemals Publizität suchte, wurde der berühmteste Mann der Welt, der meistgepriesene und meistverlachte. Er war gegen beide Auswirkungen ebenso gleichgültig wie gegen viele andere Einzelheiten des äußeren Lebens. Vielleicht war er sich dieses plötzlichen Ruhmes weniger bewußt als irgend jemand anderer.

### Drei Themen

Wir haben den Beginn der Allgemeinen Relativitätstheorie skizziert, wie sie in Einsteins Arbeit im Jahr 1911 erschien. Die nächsten Jahre vollendeten das auf den neuen Ideen fußende Gebäude. Wir können diese Ideen begreifen, selbst wenn wir ihrer mathematischen Formulierung nicht folgen können. Sie sind mit den folgenden drei Gegenständen verknüpft:

Erstens: Gravitation.

Zweitens: Invarianz.

Drittens: Das Verhältnis von Geometrie und Physik.

Wir werden sie der Reihe nach besprechen.

Vielleicht der größte Triumph der Newtonschen Mechanik war ihre Lösung des Problems der Gravitation. Die Geschichte berichtet, daß Newton einen Apfel von einem Baum fallen sah und daß zwar nicht der Apfel, aber der Gedanke der Schwerkraft seinen Kopf traf. Derartige Geschichten sind meist unvollständig. Newton fand die Theorie der Gravitation, weil er Jahre hindurch bewußt und unbewußt darüber nachgedacht hatte. Ein Wissenschaftler kann plötzlich Licht sehen — oder eher einen ersten Lichtschimmer —, aber nur nach langem und unablässigem Nachdenken.

Im 19. Jahrhundert gipfelte die Entwicklung der Astronomie in dem großen Werk von Laplace „*Mécanique céleste*“ (Himmelsmechanik), das auf dem Newtonschen Gravitationsgesetz fußte. Doch erschien das Newtonsche Gesetz mit dem Fortschritt der Zeit weniger

und weniger befriedigend. Nach Newton wurden die Bewegungen der Erde, des Mondes, der Sterne, der Planeten und der Sonne durch das gleiche Gesetz beherrscht. Der Mond bewegt sich um die Erde, weil die Erde den Mond anzieht. Die Erde und andere Planeten bewegen sich um die Sonne, weil sie von ihr angezogen werden, und diese Anziehung nimmt mit zunehmendem Abstand ab, da sie dem Quadrat des Abstandes umgekehrt proportional ist. Dieses Bild von Körpern, zwischen denen die Schwerkraft wirkt, gehört zur Newtonschen Auffassung und ist ihr Höhepunkt.

Aber wir wissen jetzt, daß die Feldauffassung in der Beschreibung von elektromagnetischen und Lichterscheinungen ebenso erfolgreich war wie die mechanische Auffassung in der Astronomie. Die Feldtheorie brachte einen neuen Standpunkt in die Physik. Für den modernen Physiker breitet sich jede Wirkung oder Kraft von der Quelle zum Empfänger mit endlicher Geschwindigkeit aus: mit Lichtgeschwindigkeit im Falle des elektromagnetischen Feldes. Die Kraft ändert sich sowohl zeitlich als auch örtlich. Es ist eine künstliche Vorstellung, daß im Gegensatz dazu die Wirkung der Gravitation von der Zeit unabhängig sei, daß das ganze Weltall das Erscheinen eines neuen Sternes genau im Augenblick seines Entstehens fühlen würde. Die Feldtheorie behauptet, daß Wirkungen sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten und daß die Gesetze, die diese Änderungen in Raum und Zeit beherrschen, die Gesetze des Feldes sind. Daher erscheint im Gegensatz dazu die Newtonsche Gravitationstheorie, die keine solchen Feldgesetze ausspricht, unbefriedigend und künstlich. Übrigens paßt sie nur in den Rahmen der klassischen Mechanik, wo Raum und Zeit absolut sind und wo die Existenz eines Trägheitssystems angenommen wird. Aber wir wissen heute, daß die Zeit nicht absolut ist. Selbst wenn die Zeit das Bild in einem Trägheitssystem nicht beeinflußt, muß sie es nach der Lorentz-Transformation in einem anderen Trägheitssystem tun. Das alte Newtonsche Gesetz paßt in den engen Rahmen der klassischen Mechanik, aber nicht in den weite-

ren Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie. Außerdem nimmt das Newtonsche Gesetz der Gravitation die Existenz eines Trägheitssystems an, obwohl die klassische Mechanik nicht in der Lage ist, uns zu sagen, wie man ein solches System finden kann. Einem Ergebnis gegenübergestellt, das der Beobachtung widerspricht, hat ein Anhänger der klassischen Mechanik die folgende Wahl: er kann sagen, daß die Gesetze Newtons ungültig sind, oder er kann sagen, daß er ein System gewählt hat, das kein Trägheitssystem ist. In Wirklichkeit ist ihm die erste Erklärung, daß die Newtonschen Gesetze nicht gelten, durch seinen Glauben an die klassische Mechanik untersagt. Aber in diesem Fall wird das gesamte Problem, die Gesetze Newtons zu bestätigen oder zu widerlegen, sinnlos.

Wir fassen die hier besprochene Kritik zusammen:

Das Newtonsche Gravitationsgesetz nimmt die Existenz eines *Trägheitssystems* an.

Das Newtonsche Gravitationsgesetz paßt nicht in den Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie.

Das Newtonsche Gravitationsgesetz ist nicht das Gesetz eines Schwerefeldes, das sich in Raum und Zeit ändert.

Im Newtonschen Gravitationsgesetz erscheint die Gleichheit der Beschleunigung an einem gegebenen Ort im Raum als ein Zufall, dem keine tiefere Bedeutung zugeschrieben werden kann.

Jeder dieser Einwände ist sehr ernst, und dabei gibt es vier solche Einwände!

Die Allgemeine Relativitätstheorie ging an das Problem der Gravitation in einer völlig neuen Weise heran und beseitigte alle diese Schwierigkeiten mit einem kühnen Streich. Auf welche Weise dies geschah, ist eine andere Frage und nicht leicht zu beantworten. Doch werden wir versuchen, einige der neuen revolutionären Ideen, auf die Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie gründete, zu erklären.

Die Spezielle Relativitätstheorie erweitert den Rahmen der klassischen Physik. Die Allgemeine Relativitätstheorie ihrerseits erweitert den Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie; sie muß dort angewendet werden, wo die Schwerkraft nicht mehr außer acht gelassen werden kann. Wir können die Spezielle Relativitätstheorie aus dem höheren Standpunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie ableiten, sobald die Schwerkraft außer acht gelassen werden kann. Innerhalb des fallenden Aufzuges haben wir ein System, das — bis zu einem gewissen Grad — beinahe das Trägheitssystem der Speziellen Relativitätstheorie ist. Wenn wir jedoch Messungen in einem großen Raumgebiet und während langer Zeitspannen durchführen, können wir die Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie innerhalb eines riesigen fallenden Aufzuges nicht mehr annehmen.

Also steigen wir höher und höher, um uns von mehr und mehr Beschränkungen zu befreien. Die Straße wird immer schwieriger, aber mit jedem Schritt vorwärts müssen wir die Vorteile unseres alten Blickpunktes behalten können.

Wenn wir eine neue Theorie der Gravitation finden wollen, die von den Schwächen der alten frei ist, ist es wichtig, daß wir uns an die enorme Vielfalt von Erfahrungen erinnern, die durch die alte Theorie in befriedigendem Ausmaß erklärt wurden. Die neue Theorie, die logisch einheitlicher und einfacher ist, muß die bekannten Tatsachen ebensogut erklären können. Die Erde bewegt sich in einer Ellipse um die Sonne. Dies folgt aus dem Newtonschen Bewegungsgesetz und aus Newtons Theorie der Gravitation. Es folgt auch aus Einsteins Theorie der Gravitation. Aber wir erwarten einige kleine Unstimmigkeiten zwischen den alten und den neuen Theorien. Sie müssen klein sein, denn sonst wären sie schon vor langer Zeit entdeckt worden. Doch wo immer sie jenseits der Fehlergrenze des Experiments liegen, müssen sie durch die Beobachtung bestätigt werden. Eine solche Schlußfolgerung, die neu und der klassischen Mechanik unbekannt war, war die Ablenkung des Lichtes in einem Schwerefeld.

Man betont oft allzusehr die Bedeutung der experimentellen Beweise im Fall der Allgemeinen Relativitätstheorie. In Wirklichkeit sind die Beweise ziemlich mager, obwohl kaum ein Zweifel besteht, daß die Allgemeine Relativitätstheorie den Tatsachen besser als die Newtonsche Mechanik angepaßt ist. Doch nicht darin liegt die Stärke der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern in ihrer inneren Geschlossenheit, in der Beseitigung der alten Schwierigkeiten und in ihrer großen logischen Einfachheit.

Wenn wir die Rolle der Astronomie und des Newtonschen Gravitationsgesetzes in der Geschichte der Zivilisation bedenken, so werden wir die Bedeutung der Einsteinschen Umwälzung verstehen, die zum erstenmal in der Geschichte der Wissenschaft das Problem der Gravitation neu faßte. Aber vielleicht noch wichtiger ist die Umwälzung, die diese Theorie in unserer physikalischen und philosophischen Denkweise vollbracht hat.

Wir haben gesagt, daß Einsteins Theorie der Gravitation logisch einfacher ist als die Theorie Newtons. Diese Behauptung verlangt nach einer Erklärung, denn gewöhnlich wird die Allgemeine Relativitätstheorie als im Vergleich zur Newtonschen Theorie sehr schwierig betrachtet. Selbst wenn wir die Lächerlichkeit der Behauptung einsehen, daß nur zwölf Leute die Relativitätstheorie verstehen, können wir nicht bestreiten, daß praktisch die Allgemeine Relativitätstheorie viel schwerer zu begreifen ist als die klassische Mechanik. Allerdings stammt diese Behauptung meistens von denen, die weder die eine noch die andere verstehen. Es ist gar nicht leicht, aus der Newtonschen Gravitationstheorie abzuleiten, daß die Erde sich auf einer Ellipse um die Sonne bewegt. Außer einer Kenntnis der Newtonschen Mechanik erfordert eine solche Ableitung auch eine gewisse Kenntnis der Differential- und Integralrechnung. Es ist noch schwieriger, das gleiche Ergebnis aus der Allgemeinen Relativitätstheorie abzuleiten. Es erfordert Verständnis des mathematischen Aufbaues der Relativitätstheorie, und dies wieder erfordert Kenntnis der Riemannschen

Geometrie und des Tensorkalküls, der Zweige der Mathematik, die sich unter dem Einfluß der Relativitätstheorie besonders entwickelt haben. Die Ableitung an sich ist viel länger und viel mühseliger. Im Fall unserer Erde finden wir komplizierte Bewegungsgleichungen, die uns in der ersten Näherung die alten Gleichungen Newtons liefern. Dennoch können wir die Ansicht aufrechterhalten, daß Einsteins Theorie logisch einfacher ist als die alte Newtonsche Theorie, wenn wir zwischen logischer und praktischer Einfachheit unterscheiden. Durch die Beseitigung künstlicher und unnötiger Annahmen erreichen wir größere logische Einfachheit. Dafür sind unsere Ableitungen länger und mühseliger. Wir haben weniger vorausgesetzt und müssen deshalb mehr ableiten. Es klingt paradox, aber die Allgemeine Relativitätstheorie erscheint gerade deshalb schwierig, weil sie so einfach ist und so wenig voraussetzt.

Wenn zwei Körper A und B — sagen wir, die Erde und die Sonne — sich in relativer Bewegung befinden, dann ist natürlich die Annahme sinnlos, daß A ruht und B sich bewegt oder daß A sich bewegt und B ruht. Was wir beobachten können, ist lediglich die Bewegung eines Körpers in bezug auf den anderen. Zum Beispiel ist es vollkommen sinnlos, die Bewegung eines im Weltall allein existierenden Körpers zu diskutieren, denn Bewegung bedeutet Wechsel der relativen Lage. Heute erscheint all das dem gesunden Menschenverstand zu entsprechen. Es ist zu bedauern, daß die klassische Mechanik jemals von dieser Betrachtungsweise abgewichen ist.

Die Theorie des Ptolemäus, die durch lange Zeit von der Kirche verteidigt wurde, behauptete, daß die Erde ruhe und die Sonne sich bewege. Kopernikus andererseits behauptete, daß die Erde sich bewege und die Sonne ruhe. Aber vom gewöhnlichen Standpunkt des gesunden Menschenverstandes aus erscheinen diese beiden Behauptungen sinnlos. Selbst wenn wir glauben, daß die Sonne auf Geheiß Josuas stillstand, bedeutete offenbar ein solches Geheiß, daß die Sonne in bezug auf die Erde stillstand. Ein solches Geheiß hat genau die gleiche Be-

deutung wie ein Geheiß an die Erde, in bezug auf die Sonne stillzustehen. Ich zweifle, ob eine solche Beweisführung jene überzeugen würde, die Giordano Bruno verbrannten und Galilei ins Gefängnis steckten. Ich bezweifle es, weil Galileis Verteidigung fast genau die gleiche war. Er behauptete, daß er hypothetisch ein System betrachtete, in dem die Sonne ruht. Allerdings darf man zweifeln, ob Galilei aufrichtig sein konnte, als er vor den Kirchenfürsten stand.

Worum ging denn die ganze Aufregung? Die Antwort liegt darin, daß die klassische Mechanik vom Standpunkt des „gesunden Menschenverstandes“ abweicht, unter dem wir die Ansicht verstehen, daß es nur relative Bewegung gibt. Nach der klassischen Mechanik gibt es ein System, oder vielmehr eine Gruppe von gleichförmig bewegten Systemen, in denen die Gesetze der Physik gelten. Es ist dieses System (oder vielmehr: es sind diese Systeme), worauf wir die Bewegung beziehen müssen und in denen wir die Gesetze der klassischen Mechanik in all ihrer Schönheit und Einfachheit anwenden können. So dürfen wir nach der klassischen Mechanik von der Bewegung eines Körpers sprechen, selbst wenn er der einzige Körper in unserem Weltall ist. Stellen wir uns ein Zimmer mit gegen die Außenwelt geschlossenen Fenstern vor. Würde eine neue Kraft alle Gegenstände in diesem Zimmer vom Mittelpunkt wegstoßen, so würden wir aus der klassischen Mechanik ableiten, daß unser System kein Trägheitssystem mehr ist, weil unser Zimmer begonnen habe, sich zu drehen.

So zerstört die klassische Mechanik den Standpunkt des gesunden Menschenverstandes. Wir können die Bewegung selbst eines einzigen Körpers entdecken: das heißt, wir können *absolute* Bewegung entdecken, wenn die mechanischen Gesetze, wie sie für ein Trägheitssystem ausgesprochen worden sind, in dem mit diesem Körper verbundenen System nicht gelten.

Diese Abweichung der klassischen Mechanik vom Standpunkt des gesunden Menschenverstandes wurde von Mach kritisiert. Obwohl Mach heute mit Recht als idealistischer Philosoph verurteilt wird, be-

steht kein Zweifel, daß seine spezielle *physikalische* Analyse der Mechanik in der zur Relativitätstheorie führenden Entwicklung der Physik eine Rolle gespielt hat. Die Relativitätstheorie kehrt zum Standpunkt des gesunden Menschenverstandes zurück. Sie spricht einen Grundsatz aus, der nicht nur für die Erscheinungen der Gravitation, sondern für alle Naturerscheinungen gelten sollte. Es ist der Grundsatz der *Invarianz*:

*Die Naturgesetze müssen in allen Systemen gelten.*

Während wir in der Speziellen Relativitätstheorie Systeme behandeln, die sich relativ zueinander gleichförmig bewegen, behandeln wir in der Allgemeinen Relativitätstheorie Systeme willkürlicher relativer Bewegung. Die Behauptung, daß die Erde sich bewege, oder daß die Sonne sich bewege, ist sinnlos. Wir haben neue Gesetze, die wir entweder auf ein mit der Sonne verknüpftes System oder auf ein mit der Erde verknüpftes System anwenden können. In der Praxis gestattet ein System eine weit bessere Beschreibung der Realität als das andere. Das sehen wir, wenn wir die Theorie des Ptolemäus mit der des Kopernikus vergleichen. Aber die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie *können* auf *jedes* System angewandt werden.

Es mag scheinen, daß die Allgemeine Relativitätstheorie zwei verschiedene Probleme in Angriff genommen hat, nämlich das der Gravitation und das der Formulierung von Naturgesetzen für ein beliebiges System. Aber diese zwei Probleme sind im Grund nur eines. Man erinnere sich an das wichtige Beispiel des fallenden Aufzuges, wo wir zwei relativ zueinander nicht gleichförmig bewegte Systeme betrachteten. Eines war fast ein Trägheitssystem und im anderen hatten wir ein Schwerfeld. Es ist dieses Schwerfeld, das in kleinen Bereichen erscheint oder verschwindet, wenn wir von einem System auf ein anderes übergehen. (Wenn wir die Gravitation ausschließen wollen, müssen wir uns auf die gleichförmig bewegten Systeme beschränken.) Gerade das Schwerfeld erlaubt uns, für ein beliebiges System gültige Gesetze auszusprechen. Ich wiederhole, daß das

Schwerefeld über kleine Bereiche durch den Vorgang der Transformation geschaffen oder vernichtet werden kann. So gibt uns die Besprechung des fallenden Aufzuges den richtigen Fingerzeig. Das Endergebnis einer langen Kette von Schlüssen, die von diesem Fingerzeig ausgehen, ist das folgende:

1. Die Formulierung der Gesetze des Schwerefeldes. Wie die Gleichungen Maxwells Änderungen des elektromagnetischen Feldes, beschreiben Einsteins Feldgleichungen Änderungen des Schwerefeldes in Raum und Zeit. In ihrer ganzen Allgemeinheit und Schönheit wurden diese Gleichungen von Einstein formuliert. Sie sehen einfach aus und sind doch vom Standpunkt der praktischen Arbeit sehr schwierige Gleichungen. Aber wenn das Schwerefeld schwach ist, können wir verhältnismäßig leicht zeigen, daß diese Gleichungen sich in erster Näherung auf die alten Newtonschen Gleichungen zurückführen lassen. Ich bin versucht, Einsteins Feldgleichungen für den leeren Raum niederzuschreiben, und kann dies im Bruchteil einer Zeile tun. Sie sind:  $R_{kl} = 0$ ; aber um zu erkennen, was  $R_{kl}$  bedeutet und was der Aufbau dieser Gleichung ist, muß man ausreichendes Fachwissen besitzen. Es kann nach etwa zwei oder drei Jahren des Studiums fast von jedem erworben werden, der eine Vorliebe für Mathematik hat. (Gewöhnlich sind diejenigen, die eine Vorliebe für Mathematik haben, auch begabt genug, sie zu verstehen.) Und sobald wir diese Gleichungen verstehen, kennen wir den wesentlichsten Teil der Allgemeinen Relativitätstheorie.

2. Die Allgemeine Relativitätstheorie ermöglicht die Formulierung der Naturgesetze für ein beliebiges System. So ist das störende Gespenst des Trägheitssystems aus der Physik ausgeschieden und wir dürfen jedes beliebige System wählen: unsere Gesetze gelten in jedem. In der Fachsprache sagen wir: die Gesetze der Physik sind im Hinblick auf eine beliebige Transformation *invariant*.

Wir erkennen, bis zu welcher Tiefe die Allgemeine Relativitätstheorie unsere physikalischen Begriffe ändert. In der Tat ist diese

Umwälzung nur mit jenen zu vergleichen, die durch Newton oder Maxwell vollbracht wurden. Sie klärt auch die Verbindung zwischen *Physik* und *Geometrie* und verändert dabei unsere Ansichten über dieses alte philosophische Problem.

Der klassische Physiker nahm an, daß unser dreidimensionaler Raum euklidisch und daß die Zeit absolut sei. In der Speziellen Relativitätstheorie betrachten wir Raum und Zeit als eine vierdimensionale Grundlage für unsere Ereignisse. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie ist eine solche Grundlage von nichteuklidischem Charakter. Um das Problem der Gravitation im Einklang mit unseren Feldauffassungen zu lösen und in allen Systemen geltende Gesetze einzuführen, müssen wir die Zeit-Raum-Geometrie auf eine neue Weise betrachten. Hier ergibt sich nun die Verknüpfung von Geometrie und Physik.

Dieser Teil des Baues, der mathematische Teil, beanspruchte die meiste Zeit und Mühe in Einsteins Werk. Einstein hat sich niemals für einen Mathematiker gehalten. Er betrachtet sich mit Recht als einen Philosophen, weil die von ihm angegriffenen physikalischen Probleme eng verwandt sind mit philosophischen Problemen, die denkende Menschen während der ganzen Geschichte unserer Zivilisation beschäftigt haben. Aber diese Probleme, wie jene von Zeit, Raum und Geometrie, wurden von Einstein aus dem Bereich der Spekulation in den Bereich der Physik verschoben, in den Bereich der Wissenschaft und der exakten Überlegung, deren Werkzeug die Mathematik ist. Einstein lernte Mathematik, als er sie brauchte, und zu dem Zweck, für den er sie brauchte. Lernte? Es wäre besser, zu sagen, daß er sie wiedererfand, da er immer lieber selbst dachte als Bücher las. Im Fall der Allgemeinen Relativitätstheorie war der mathematische Apparat, den er brauchte, zuerst noch grob und steckte noch in seinen Kinderschuhen. Später wuchs er infolge der sich steigernden Ansprüche der Allgemeinen Relativitätstheorie schnell.

Als ich in Berlin war, hielt Einstein in der Preußischen Akademie

der Wissenschaften einen Vortrag über die Beziehung zwischen Geometrie und Erfahrung. Später wiederholte er den Vortrag für die Studenten der Universität. Ich war einer der Hörer. Niemand, der Relativitätstheorie studiert hatte, konnte sich dem Eindruck der Tiefe und Einfachheit der philosophischen Gedanken Einsteins und dem Reiz seiner Erklärungsweise entziehen. Danach fand eine Diskussion statt und viele wirrköpfige Philosophen stellten wirre Fragen: „Wie steht es mit Kant?“ — „Herr Professor, Ihre Äußerungen widersprechen Kant.“ — In der Tat! Wie darf man Kant widersprechen — und noch dazu in Berlin? Wie immer genoß Einstein das Schauspiel. Er wurde weder ärgerlich noch ungeduldig, als er die Worte „transzendental“, „a priori“, „Weltanschauung“ und all den Mist hörte, den die Relativitätstheorie hinwegfegte und der heute noch dicke Bücher füllt und viele Institute der spekulativen Philosophie unsicher macht. Leere Worte haben ein zähes Leben!

Worin besteht also die Verbindung zwischen Geometrie und Physik? Zwecks besseren Verständnisses vereinfachen wir unser Problem.

Wir stellen uns denkende Lebewesen vor, die auf einer zweidimensionalen Erde leben. Wir können ihre Handlungen beobachten und sogar durch sie gerührt werden, wie jeder weiß, der in einem Kino Tränen vergossen hat. Aber wir dürfen den Vergleich mit dem Kino nicht allzu ernst nehmen. Wir denken uns die Leinwand unendlich groß, verzichten auf die Perspektive und stellen uns flache Geschöpfe vor, die — wie die Menschen auf einer ägyptischen Malerei — nur ein Profil besitzen. Wir nehmen auch an, daß diese Geschöpfe ein Gehirn haben und nach eigenem Willen handeln. Für sie wird die zweidimensionale Fläche das gleiche bedeuten, was uns der dreidimensionale Raum bedeutet. Wenn sie intelligent sind, können sie mit der Zeit das Wissen über die euklidische Geometrie der Ebene entwickeln; also über die gleiche Geometrie, die wir aus unseren Mittelschultagen kennen. Wenn sie einen Weg entlang einer geraden Linie antreten, werden sie niemals zu ihrem Ursprungspunkt zurückkehren; zwei

parallele Linien werden sich niemals treffen und der Umfang eines Kreises wird  $2\pi$  mal dem Radius dieses Kreises betragen. Diese Lebewesen können sogar eine primitive Art von Physik haben, die wir uns vorstellen können. Sie können mit Lichtstrahlen Experimente angestellt haben; sie können die Begriffe von Zeit und Geschwindigkeit ebenso wie wir haben; sie können gefunden haben, daß die Lichtgeschwindigkeit ebenso wie in unserem dreidimensionalen Raum 300000 Kilometer in der Sekunde beträgt.

Gehen wir jetzt zum zweiten Kapitel unserer Geschichte von den zweidimensionalen Lebewesen über. Wir stellen uns vor, daß irgendwann irgend jemand alle diese Lebewesen im Schlafe auf die Oberfläche einer Kugel verpflanzt — einer sehr großen Kugel. Was verstehen wir darunter, daß eine Kugel sehr groß ist? Wir meinen, daß diese Lebewesen beim Aufwachen keinen Unterschied bemerken werden. Ihr Nachrichtenwesen ist nicht genügend entwickelt für die Entdeckung, daß sie schließlich zum Ursprungspunkt zurückkehren würden, wenn sie eine Reise „geradeaus“ unternähmen. Wenn sie einen kleinen Kreis zeichnen, werden sie nicht finden, daß sein Umfang etwas weniger beträgt als  $2\pi$  mal dem Radius des Kreises. Aber wenn einmal Generationen zweidimensionaler Lebewesen gelebt haben werden und wenn ihre Wissenschaft und Technik sich höher und höher entwickelt, dann werden sie daraufkommen, daß irgend etwas mit ihrer ererbten euklidischen Geometrie nicht stimmt. Sie werden schließen, daß es zweckmäßiger ist und mit ihren Beobachtungen besser übereinstimmt, wenn sie nicht die euklidische Geometrie der Ebene, sondern die nichteuklidische Geometrie einer Kugeloberfläche verwenden. Während einer gewissen Zeit werden die konservativen Elemente ihrer Gesellschaft einer solchen Neuerung widerstehen und vielleicht auf einem zweidimensionalen Scheiterhaufen die Wesen verbrennen, die nichteuklidische Geometrie predigen. Diese konservativen Lebewesen mögen behaupten, daß die verwendeten Maßstäbe nicht völlig starr gewesen seien oder daß irgendwelche Temperatur-

differenzen an dem offenbaren Versagen der euklidischen Geometrie schuld seien. Aber am Ende wird die Wissenschaft — so wie immer — einen solchen Kampf gewinnen. Langsam werden die zweidimensionalen Kugelbewohner erkennen, daß die Annahme nichteuklidischer Kugelgeometrie viel zweckmäßiger ist. So werden sie finden, daß eine gerade Linie (für uns ein Kreis um die Kugel) immer in sich geschlossen ist und daß ein Lichtstrahl, der von irgendeinem Punkt ausgesendet wird, wieder zu seinem Ursprungspunkt zurückkehrt. Sie werden diese Ergebnisse auch aussprechen, selbst wenn sie nicht rund um die Kugel reisen können und selbst wenn hundert Generationen entstehen, vergehen und wieder entstehen müssen, bevor sie durch ein tatsächlich ausgeführtes Experiment finden, daß ein Lichtstrahl tatsächlich zu seinem Ausgangspunkt zurückkehrt. Sie werden diese Ergebnisse ableiten, weil jetzt die Geometrie von nichteuklidischer Art die Erscheinungen in ihrer Nachbarschaft besser und zweckmäßiger beschreibt als die alte euklidische Geometrie. Unter diesen zweidimensionalen Wesen wird eine wissenschaftliche Umwälzung stattgefunden haben.

Diese Geschichte ist nicht so phantastisch, wie sie klingt. Manches davon erinnert uns an die Geschichte unserer Erde, daran, wie ihre Kugelgestalt erkannt wurde.

Kehren wir zu den zweidimensionalen Wesen zurück, um das dritte und letzte Kapitel unserer Erzählung vorzutragen. Wir stellen uns vor, daß ein neuer Wechsel stattgefunden hat. Wieder ist diesen Geschöpfen im Schlafe etwas zugestoßen. Diesmal gehört das Ereignis nicht in den Bereich der Geometrie, sondern eher in den der Physik (sofern nämlich eine scharfe Unterscheidung zwischen Geometrie und Physik überhaupt irgend einen Sinn hat). Wir stellen uns die Wesen auf der Kugel lebend vor und wählen auf ihr zwei entgegengesetzte Punkte, die wir Nord- und Südpol nennen. Die Temperatur der Kugel, die wir bis dahin als gleichförmig annehmen wollen, unterliegt nun einer plötzlichen Änderung. An den Polen ist es kalt, von

ihnen entfernt ist es wärmer, und der Äquator ist die Linie der größten Hitze. An den Polen ist es so kalt, daß die Temperatur dem absoluten Nullpunkt entspricht. Wir wollen annehmen, daß dann die Ausdehnungen aller Lebewesen und aller starren Maßstäbe zu Null zusammenschrumpfen, wenn sie sich diesem Pol nähern. So werden die Wesen, die in Richtung der Pole reisen, kleiner und kleiner, ebenso verkleinern sich ihre Ausmaße und ihre Schritte, und sie werden die Pole niemals erreichen. Indem sie den Breitengraden entlangreisen, werden sie finden, wenn die Temperaturen richtig reguliert sind, daß jeder solche Kreis genau so lang ist wie der Äquator, da ja ihre Maßstäbe und ihre eigenen Ausmaße genau im gleichen Verhältnis eingeschrumpft sind; zwar werden die Kreise kleiner, aber dasselbe gilt auch für ihre Maßstäbe.

So befinden sich unsere intelligenten zweidimensionalen Lebewesen in einer völlig neuen Situation. Sie haben zwei Möglichkeiten, ihre Wissenschaft ihrer veränderten Welt anzupassen. Wenn ihre zweidimensionalen Körper Temperaturveränderungen nicht empfinden, dann können sie jetzt annehmen, daß sie nicht mehr in einer Ebene und nicht mehr auf einer Kugel, sondern auf einem unendlichen Zylinder leben. Er wird für sie unendlich sein, weil sie niemals das Ende erreichen können, wenn sie nordwärts oder südwärts gehen. Aber er wird endlich sein, wenn sie entlang den Breitenkreisen gehen, und alle diese Kreise werden die gleichen Radien haben, weil sie nichts von der Maßstabänderung wissen, die wir bemerkt haben, als wir vom vorteilhaften Standpunkt dreidimensionaler menschlicher Wesen auf ihre Kugel blickten.

Wenn sie hingegen für Kälte und Hitze empfindlich sind, können sie die Annahme vorziehen, daß sie noch immer auf einer Kugel leben, aber daß es auf dieser Kugel jetzt zwei sehr eigenartige Punkte gibt, die sie niemals erreichen werden, weil die Temperatur dort dem absoluten Nullpunkt entspricht.

Niemand weiß, welche Wahl diese Wesen treffen werden. Es

hängt von vielen Umständen ab, die wir nicht analysieren wollen. Sie können sogar zwei miteinander im Gegensatz stehende Theorien haben.

Unsere Geschichte hat einen tiefen Sinn. Sie zeigt, wie eng die Physik mit der Geometrie verknüpft ist. Wir erinnern uns, daß die zweidimensionalen Lebewesen die Wahl haben, entweder Temperaturunterschiede und Kugelgeometrie anzunehmen, oder aber Temperaturgleichheit und Zylindergeometrie (die im wesentlichen eine euklidische Geometrie ist).

Wir dreidimensionalen Wesen befinden uns in einer ähnlichen Lage. Wir müssen Geometrie und Physik als ein einziges Wissenssystem behandeln. Unsere wissenschaftliche Aufgabe ist die Formulierung eines solchen einheitlichen Systems, das am folgerichtigsten und für die Beschreibung der Naturerscheinungen am zweckmäßigsten ist. Das System ist in Ordnung, wenn es funktioniert.

Die Relativitätstheorie hat uns gelehrt: Wenn wir den leeren Begriff eines Trägheitssystems über Bord werfen wollen, wenn wir invariante Naturgesetze formulieren wollen, die in allen Systemen gelten — wenn wir all dies tun wollen, dann müssen wir eine nicht-euklidische Geometrie für unsere vierdimensionale Raum-Zeit annehmen. Die Geometrie unserer Welt wird durch das Schwerfeld gekennzeichnet. Eine Gummiebene kann bei Beanspruchung durch äußere Kräfte verformt werden. Ebenso verformen bewegte Massen unsere Raum-Zeit. Sie bestimmen, ob und in welchem Maße unsere Raum-Zeit nichteuklidisch ist. Die beiden Fragen „Was ist die Geometrie unserer Welt?“ und „Was ist das Schwerfeld unserer Welt?“ sind identische Fragen. Geometrie und Gravitation werden synonym. Sie werden durch die Verteilung der Massen und ihre Geschwindigkeiten bestimmt. Ich habe zuvor die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie für den leeren Raum genannt. Diese sind die Gleichungen, die sowohl die Geometrie als auch das Schwerfeld unserer Welt in materiefreien Bereichen beschreiben.

Ich bin mir wohl bewußt, daß diese Gedanken schwierig sind. In mancher Hinsicht ist es leichter, die Relativitätstheorie zu verstehen, wenn man Mathematik benützt, als wenn man keine Mathematik benützt. Doch hoffe ich, gezeigt zu haben, wie grundlegend die neuen Begriffe sind, wie tief die philosophischen Folgerungen der Relativität reichen und wie radikal diese Theorie die Wissenschaft von unserer Welt verändert hat.

Unter den Schlüssen, die aus der Allgemeinen Relativitätstheorie im Gegensatz zur klassischen Mechanik gezogen werden können, befindet sich einer, der wohlbekannt ist: die Perihelbewegung des Merkur. Im Jahre 1916 bildete sie die erste Bestätigung der Relativitätstheorie. Dieser Schluß wurde zu jener Zeit durch den berühmten Astronomen Schwarzschild aus den Gleichungen Einsteins streng abgeleitet. In gewisser Hinsicht aber bedeutet diese Behauptung eine allzu große Vereinfachung. Die vollständige Geschichte dieses Problems ist viel komplizierter. Ich werde darüber kurz berichten.

Die Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie schritt verhältnismäßig langsam fort, als sie von Einstein in Arbeiten in den „Berichten“ der Preußischen Akademie formuliert und umformuliert wurde. Mehr als einmal mußte Einstein wieder auf seiner eigenen Spur zurückgehen und Fehler verbessern, als er tiefer und tiefer in das Problem der Gravitation eindrang. Um das Jahr 1916 war das Gebäude der Allgemeinen Relativitätstheorie vollendet und die Theorie wurde nochmals in einer längeren Arbeit zusammengefaßt, die in den „Annalen der Physik“ unter dem Titel „Die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie“ erschien. Später wurden keine wesentlichen Änderungen mehr vorgenommen, obwohl viele Ergebnisse hinzugefügt und weiterentwickelt wurden.

Die Allgemeine Relativitätstheorie in ihrer um das Jahr 1916 formulierten Form ruhte auf zwei Stützpfählern. Der eine bestand aus

den Feldgleichungen; das sind die Gleichungen, die die Veränderungen des Schwerefeldes oder, wenn man das vorzieht, des geometrischen Feldes in Raum und Zeit beschreiben. Der andere stellte die Bewegungsgleichungen dar, die uns darüber unterrichten, wie ein Körper sich in einem solchen Schwerefeld bewegt. Diese Gleichungen ersetzen die alten Newtonschen Bewegungsgleichungen, in denen die Schwerkraft der Beschleunigung proportional ist. Aber jetzt, in der Allgemeinen Relativitätstheorie, gelten die Bewegungsgleichungen, so wie alle Naturgesetze, nicht nur in einem Trägheitssystem, sondern in einem beliebigen System.

Wenn wir also zum Beispiel die Bewegung eines Planeten im Schwerefeld der Sonne aufzufinden wünschen, müssen wir zuerst das Schwerefeld der Sonne durch die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie auffinden. Sodann müssen wir die Bewegungsgleichungen auf dieses bekannte Feld anwenden und die Bewegung des Planeten ausfindig machen. Genau das führte Schwarzschild mit großem mathematischen Geschick durch. Aber sein Ergebnis ist nur in dem Fall gültig, daß der Planet im Vergleich zur Sonne klein ist. Die Astronomen wissen von der Existenz vieler Doppelsterne: zwei Körper bewegen sich um einander wie zwei Sonnen. Wir dürfen nicht annehmen, daß der eine im Vergleich zum anderen klein sei. Wir können eine solche Bewegung von Doppelsternen nicht nach der Schwarzschild'schen Methode behandeln. Wir wissen nämlich in bezug auf die Bewegungsgleichung in der Allgemeinen Relativitätstheorie nur, daß diese Gleichung bloß auf einen kleinen Körper (einen Planeten) in einem Feld angewendet werden darf, das durch die Gegenwart eines solchen kleinen Körpers nicht zu stark gestört ist.

Wir haben Feldgleichungen und Bewegungsgleichungen; aber die Bewegungsgleichungen, wie man sie im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ausspricht, besitzen nur begrenzte Gültigkeit. Bis 1938 waren wir in Unkenntnis einer Lösung des Bewegungsproblems von Doppelsternen nach der Allgemeinen Relativitätstheorie, obwohl

die Lösung dieses Problems nach der klassischen Mechanik bekannt ist. Dort ist es kaum schwieriger als das Problem einer schweren Sonne und eines kleinen Planeten.

Schon lange war Einstein der Ansicht, daß Bewegungsgleichungen in der Allgemeinen Relativitätstheorie unnötig sind, daß solche Gleichungen nicht angenommen werden müssen, daß sie aus den Feldgleichungen *abgeleitet* werden können, daß wir auf die Bewegungsgleichungen verzichten und sie weglassen können — daß der einzige Pfeiler, auf dem die Allgemeine Relativitätstheorie ruht, aus den Feldgleichungen allein besteht.

Dies stellte sich als richtig heraus, aber der Beweis nahm eine lange Zeit in Anspruch. Alle technischen Mittel dazu befanden sich um das Jahr 1916 in der Hand der Mathematiker und Physiker. Sie kannten die Feldgleichungen. Es mußte nur noch gezeigt werden, daß sie die Bewegungsgleichungen enthalten. Es war, als grabe man nach einem tief vergrabenen Schatz, dessen Versteck man kennt. Einstein nahm dieses Problem wiederholt in Angriff, ließ es wieder fallen, um auf viele andere überzugehen, und kam dann neuerlich auf das Problem zurück. Auch andere Wissenschaftler dachten darüber nach. Mittlerweile kam Hitler zur Macht. Einstein verließ Deutschland und ließ sich 1933 als Professor am „Institut für Fortgeschrittene Studien“ in Princeton nieder. Die Arbeit über die Bewegungsprobleme begann vor ungefähr zweiundzwanzig Jahren, aber eine logisch befriedigende Theorie ergab sich erst vor kurzem (1949). An diesem Problem arbeitete ich in Gemeinschaft mit Einstein vor ungefähr zwölf Jahren und nochmals im Jahr 1949.

In zweierlei Hinsicht kann aus dieser Geschichte eine Moral gezogen werden. Erstens zeigt sie, wie schwierig die mathematischen Ableitungen sind, wie kompliziert die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind und wie tief sie ihre Geheimnisse verbergen kann. Die zweite Moral besitzt philosophische Bedeutung und ist mit einem vorhin ausgesprochenen Gedanken eng verbunden. Es ist

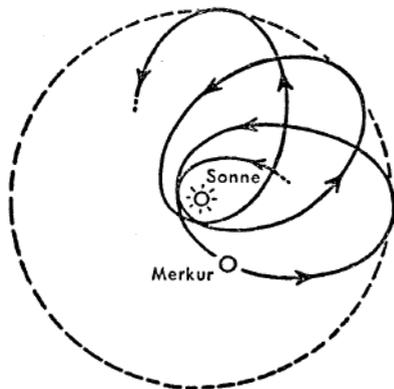
logisch einfacher, nur Feldgleichungen aufzustellen und auf Bewegungsgleichungen zu verzichten, aber wir erkaufen die logische Einfachheit um den Preis gesteigerter technischer Schwierigkeiten.

Wenden wir nun die aus den Feldgleichungen abgeleiteten oder für sich gesondert ausgedrückten Bewegungsgleichungen auf die Bewegung eines kleinen Planeten an. Natürlich erwarten wir in erster Näherung Newtonsche Bewegung, weil die Newtonsche Theorie aus der Allgemeinen Relativitätstheorie als ihre erste Näherung folgt. Aber wir finden Unterschiede zwischen der Newtonschen und der Allgemeinen Relativitätstheorie, wenn wir tiefer eindringen — Unterschiede, die sich experimentell bestätigen lassen.

Solche Abweichungen von den Gesetzen Newtons können nur für starke Schwerefelder erwartet werden. Die Planeten, unter ihnen unsere Erde, bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne. Der Merkur ist der sonnennächste Planet und die Anziehung zwischen ihm und der Sonne (um die klassische Ausdrucksweise zu verwenden) ist deshalb stärker als zwischen der Sonne und irgendeinem anderen Planeten. Wenn wir eine Abweichung vom Gesetz Newtons zu finden hoffen, haben wir die beste Chance im Fall des Merkur. Aus der Theorie Newtons folgt, daß Merkur, ebenso wie jeder andere Planet, sich auf einer Ellipse bewegt, aber diese Ellipse ist im Vergleich zu den Bahnen anderer Planeten unseres Sonnensystems die kleinste. Jedoch sollte nach der Allgemeinen Relativitätstheorie die Bewegung ein wenig von der Ellipse verschieden sein. Nicht nur sollte Merkur um die Sonne wandern, sondern die vom Merkur bei einem Umlauf um die Sonne beschriebene „Ellipse“ sollte sehr langsam relativ zu dem mit der Sonne verbundenen System rotieren. Diese Rotation der „Ellipse“ macht den neuen Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie und ihre Abweichung von der Newtonschen Theorie aus. Die Relativitätstheorie sagt auch die Größe des Effekts voraus: die „Ellipse“ Merkurs sollte in drei Millionen Jahren eine vollständige Rotation beschreiben! Wir sehen, wie klein dieser Effekt

ist und wieviel schwerer es wäre, einen entsprechenden, aber noch kleineren Effekt für andere Planeten zu finden.

Die Abweichung der Merkurbewegung von der Ellipse war bekannt, bevor die Allgemeine Relativitätstheorie ausgesprochen wurde, aber es konnte keine Erklärung dafür gefunden werden. Andererseits entwickelte Einstein die Grundsätze der Allgemeinen Relativitätstheorie,



Die vom Merkur beschriebene Bahn ist keine geschlossene Ellipse, sondern eine Art Rosette, deren „fast-elliptische“ Bogen sich sehr langsam relativ zu dem mit der Sonne verbundenen System drehen.

ohne diesem Sonderproblem Beachtung zu schenken. Sein einziges Ziel war die Beseitigung der logischen Widersprüche und Schwierigkeiten der alten Theorie. Im Fall des Merkur erklärt die Allgemeine Relativitätstheorie erfolgreich, und zwar nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ, die Abweichung seiner Bewegung von den Gesetzen Newtons.

Neben den zwei genannten Effekten — der Ablenkung der Lichtstrahlen und der Merkurbewegung — gibt es einen dritten Effekt, nämlich die sogenannte Rotverschiebung von Spektrallinien, die von der

Sonne oder von Sternen mit einem starken Schwerefeld kommen. Dieser Effekt läßt sich viel schwerer als die anderen erklären, obwohl er mathematisch leicht abgeleitet werden kann. Verzichten wir auf eine ins einzelne gehende Darstellung und erwähnen wir bloß nebenbei, daß auch in diesem Fall das Urteil des Experiments, obwohl es nicht sehr klar oder entschieden ist, für die Allgemeine Relativitätstheorie günstig zu sein scheint. Aber erinnern wir uns vor allem daran, daß die Stärke dieser Theorie nicht in solchen Bestätigungen liegt. Gäbe es auch keine auffindbaren Unterschiede zwischen der klassischen Physik und der Allgemeinen Relativitätstheorie, so würden wir noch immer vorbehaltlos die Allgemeine Relativitätstheorie wählen. Dies zu leugnen, hieße die Bedeutung von Einsteins Umwälzung und der durch sie in der Physik herbeigeführten großen Klärung nicht verstehen.

## Das Weltall

Spekulationen über das Weltall, in dem die Menschen leben, sind so alt wie das Denken und die Kunst der Menschen, so alt wie der Anblick strahlender Sterne in einer klaren Nacht. Doch hat erst die Allgemeine Relativitätstheorie vor dreißig Jahren die kosmologischen Fragen aus der Dichtung und der spekulativen Philosophie in die Physik verlegt. Wir können sogar das Geburtsjahr der modernen Kosmologie feststellen: es war das Jahr 1917, als Einsteins Artikel „Kosmologische Betrachtungen in der Allgemeinen Relativitätstheorie“ in den „Berichten der Preußischen Akademie“ erschien.

Obwohl die Wichtigkeit dieser Arbeit kaum überschätzt werden kann, und obwohl sie eine Flut anderer Arbeiten und Spekulationen verursachte, sind Einsteins ursprüngliche Gedanken, vom heutigen Standpunkt gesehen, veraltet, vielleicht sogar falsch. Ich glaube, Einstein selbst würde dies als erster zugeben.

Dennoch ist das Erscheinen dieser Arbeit von größter Bedeutung in der Geschichte der theoretischen Physik. Sie ist wieder einmal ein Beweis dafür, daß eine falsche Lösung eines grundlegenden Problems unvergleichlich wichtiger sein kann als die richtige Lösung eines trivialen, uninteressanten Problems.

Warum ist Einsteins Arbeit so wichtig? Weil sie eine völlig neue Frage aufwirft: die Frage der Struktur unseres Weltalls. Und weil sie zeigt, daß die Allgemeine Relativitätstheorie diese Frage neu beleuchten kann.

Der klassische Physiker dachte sich unseren physikalischen Raum als dreidimensional und unsere physikalische Zeit als allen Beobachtern gemeinsam — ob diese Beobachter sich in relativer Bewegung befinden oder nicht. Diese Begriffe änderten sich 1905, als Einstein die Spezielle Relativitätstheorie formulierte. Der Physiker lernte, daß sich eine bessere Formulierung der physikalischen Ereignisse finden läßt, wenn man von der vierdimensionalen Raum-Zeit-Grundlage ausgeht. Später, im Jahr 1916, entdeckte er, daß er seine Begriffe abermals verallgemeinern mußte, um die Erscheinungen der Gravitation zu verstehen. In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird das Weltall durch eine vierdimensionale nichteuklidische Geometrie beschrieben, seine Metrik ist durch die Massen und ihre Bewegungen bestimmt.

Neue Ideen werden in der theoretischen Physik durch das Genie und die Phantasie von Menschen geboren, die ein altes Problem von einem ganz neuen unerwarteten Gesichtspunkt aus betrachten. So entstanden die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie; so trat die Quantentheorie in die Physik ein. In Einsteins Artikel über die Kosmologie erkennen wir ebenfalls diese Fähigkeit zur neuartigen Betrachtung alter Probleme. Und doch besteht da, wie wir heute wissen, ein wesentlicher Unterschied. Während die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie in der heutigen Zeit so frisch und abgerundet dastehen wie in den Tagen ihrer Entstehung, während in den letzten dreißig Jahren nichts von grundlegender Bedeutung zu Ein-

steins Gebäude hinzugefügt wurde, sieht das Problem der Kosmologie heute ganz anders aus als zur Zeit, da Einstein seinen berühmten Artikel schrieb.

Die kosmologische Arbeit — die Erforschung der Struktur unseres Weltalls — erscheint mehr als jede andere Arbeit im Bereich der Relativität als ein Gemeinschaftsunternehmen. Neben dem Namen Einsteins scheinen hier andere auf, die ebenso bedeutend sind. Sie gehören verschiedenen Nationen an. Die Wissenschaft kennt keine rassischen und nationalen Grenzen. Die Wissenschaftler aller Länder arbeiten erfolgreich zusammen, wenn man sie zusammenarbeiten läßt.

Einsteins ursprüngliche Ideen waren der Anfang der Wissenschaft von der Struktur unseres Weltalls. In den Händen anderer Forscher veränderten und entwickelten sich diese Ideen später unter der Einwirkung neuer Beobachtungen und neuer, auf der Allgemeinen Relativitätstheorie fußender Annahmen.

Was ist heute unser Gesamtbild?

Fassen wir das Ergebnis von drei Jahrzehnten experimenteller und theoretischer Untersuchungen in den Worten zusammen: *Unser Weltall ist ein Weltall von Inseln*. Es besteht aus Materie-Inseln — oder Nebeln — in einem Meer der Leere.

Stellen wir uns vor, daß wir mit der größten uns bekannten und größtmöglichen Geschwindigkeit — also mit Lichtgeschwindigkeit — durch das Weltall reisen. In wenigen Minuten lassen wir die Sonne hinter uns. In wenigen Stunden verlassen wir unser gesamtes Sonnensystem. In einigen Jahren erreichen wir die nächsten Sterne. So messen wir jetzt Entfernungen durch Lichtjahre — durch die Anzahl der Jahre, die wir zur Überwindung dieser Abstände brauchen würden, wenn wir mit Lichtgeschwindigkeit reisten.

Unser Sonnensystem und alle Sterne, die wir in einer hellen Nacht von unserem Umkreis aus wahrnehmen können, sind Bestandteile *unserer* Milchstraße, *unseres* Nebels; sie sind ein Teil der Insel, auf der wir leben. Aber diese Milchstraße (zu der die Sonne, die Planeten und

die mit freiem Auge wahrnehmbaren Sterne gehören) ist nur eine der sehr vielen Inseln, einer der sehr vielen Nebel unseres Weltalls. Wie ferne Inseln im Ozean, so sind die Nebel — die großen Anhäufungen von Sternen — Materie-Inseln im Meer des leeren Raumes. Unsere Milchstraße ist nur eine dieser Inseln.

Nach einer jahrtausendelangen Reise mit Lichtgeschwindigkeit würden wir uns außerhalb unserer Milchstraße befinden; um dann die nächste Insel zu erreichen, den nächsten Sternhaufen, würden wir fast eine weitere Million Jahre reisen müssen! Diese Behauptung ist durchaus nicht phantastisch, und es besteht kein Grund, über das Ausmaß der Leere und die Spärlichkeit der Materie in unserem Weltall bekümmert zu sein. Es besteht weniger Grund, sich darüber Sorgen zu machen, als über die Spärlichkeit von Tankstellen an einer Wüstenstraße, denn wir werden niemals in die Lage kommen, diese Straßen durch unser Weltall zu bereisen. Die Lichtstrahlen, die unsere Augen von den entfernten Nebeln aus erreichen, sind die einzigen reisenden Boten; und ihnen macht die Leere nichts aus, im Gegenteil — wenn sie auf ihrer langen Reise zu viel absorbierende Materie treffen müßten, könnten sie unsere Erde gar nicht erreichen.

Prüfen wir das Beweismaterial, das uns durch diese Lichtboten zugetragen und in unseren mächtigen Fernrohren aufgefangen wird.

Hunderttausende von diesen Nebelinseln sind photographiert worden. Die von uns entferntesten Inseln, die noch immer, wenn auch nur sehr schwach, sichtbar sind, sind eine halbe Milliarde Lichtjahre von uns entfernt. Soweit können wir heute durchdringen. Aber durch den Bau besserer Fernrohre (wie des kürzlich fertiggestellten Zweihundert-Zoll-Reflektors) werden wir noch tiefer in den Raum vordringen können.

Der durchschnittliche Nebel hat einen Durchmesser von ungefähr zwanzigtausend Lichtjahren. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Nebeln beträgt ungefähr zwei Millionen Lichtjahre. Ich wiederhole: Die Nebel sind Inseln in einem Meer der Leere.

Der große Astronom E. Hubble gibt folgenden anschaulichen Vergleich: Man stelle sich Tennisbälle vor, die innerhalb einer Kugel von acht Kilometern Durchmesser in Entfernungen von fünfzehn Metern voneinander verstreut sind. In diesem Vergleich vertritt ein Tennisball einen Nebel, der aus vielen Millionen Sternen besteht. Die acht Kilometer vertreten den Abstand, bis zu welchem wir heute vordringen können. Die fünfzehn Meter zwischen den Tennisbällen zeigen uns, wie wenig Materie und wie viel leeren Raum es in unserem Weltall gibt.

Das ist der Aufbau unseres Weltalls in seiner Gesamtheit, wie er durch Beobachtung und durch einfache theoretische Deutung von Beobachtungsergebnissen aufgezeigt wird.

Wir interessieren uns für den Bau unseres Weltalls in seiner Gesamtheit, das heißt in seinen allgemeinen Merkmalen, im Durchschnitt. Wir ignorieren kleine Unregelmäßigkeiten und vom kosmologischen Standpunkt unwichtige Abweichungen — ebenso wie wir uns bei der Vorbereitung eines Fluges um die Erde für die Verteilung der Flugplätze interessieren und nur wenig für die zwischen ihnen liegenden Dörfer. Für diesen Zweck betrachten wir die Erde als eine Kugel, auf der Punkte liegen, die die Flugfelder vorstellen. Aber zu anderen Zeiten, wenn wir uns mit den Fragen unseres Alltagslebens befassen, müssen wir uns um unsere Nachbarn und um unseren Haushalt kümmern — was wir ja auch tatsächlich tun.

Wenn wir das Weltall als Ganzes betrachten, interessieren wir uns nur wenig für die kleinen Unregelmäßigkeiten, für den Umstand, daß jede Nebelinsel ihre eigene besondere Gestalt und Größe, ihr eigenes Alter und ihre eigene Geschichte hat. Wir betrachten sie alle als gleich und lassen die Unterschiede zwischen ihren Größen und zwischen ihren Abständen außer acht. Unser Bild von gleichmäßig verteilten Nebeln gleicher Größe ist stark vereinfacht. Wie immer in unserer Wissenschaft vereinfachen und idealisieren wir auch hier; später, unter dem Einfluß neuer Beobachtungen, komplizieren wir dann ge-

wöhnlich unser ursprüngliches einfaches Bild. In einem noch späteren Zeitpunkt machen diese zunehmenden Komplikationen das ganze Bild in seiner Kompliziertheit so häßlich, daß es abgelehnt werden und ein neues, einfaches Bild gesucht werden muß. Aber in der jungen Wissenschaft der Kosmologie sind wir noch nicht weit über die paar ersten Schritte hinausgelangt. Unser Bild ist noch immer sehr einfach — vielleicht allzu einfach!

Nun kommen wir zu dem charakteristischsten und rätselhaftesten Merkmal unseres Inselweltalls. Auch dieses Merkmal hat sich uns durch Beobachtung erschlossen. Ich werde das Ergebnis zunächst in der Fachsprache ausdrücken. *Die Spektren der Nebel zeigen eine Rotverschiebung.* Oder, in einfacherer Sprache: *Die Nebel scheinen von uns fortzulaufen.*

Eine Erklärung der zwei gleichbedeutenden Behauptungen kann nur in der Terminologie der Physik gegeben werden.

Der Ton der Pfeife einer sich der Station nähernden Lokomotive erscheint einem Beobachter in der Station höher als der Ton der gleichen Pfeife, wenn die Maschine stillsteht. Ebenso erscheint der Ton der Pfeife niedriger, wenn die Maschine aus der Station fortfährt. Dieser in der Akustik wohlbekanntes Effekt wird der Dopplereffekt genannt.

Wir begegnen auch im Alltagsleben einer ähnlichen Erscheinung. Stellen wir uns eine Gesellschaft vor, die in einem Automobil reist und unterwegs jede Stunde einen Boten auf einem Motorrad zu uns abschickt. Solange die Gesellschaft an ein und demselben Platz bleibt, wird der Bote jede Stunde bei uns eintreffen. Aber wenn das Auto sich von uns fortbewegt, wird der Bote in größeren Zeitabständen als einer Stunde ankommen, und wenn das Auto sich auf uns zubewegt, in kleineren Zeitabständen. Tatsächlich können wir aus der Häufigkeit (Frequenz), mit der die Boten eintreffen, die Geschwindigkeit berechnen, mit der die Gesellschaft im Auto sich zu uns her- oder von uns fortbewegt, wenn wir die Geschwindigkeit der Boten und die Häufigkeit, mit der sie uns zugeschickt werden, kennen.

Das gleiche gilt für den Fall der Lokomotivpfeife. Der Ton mißt die Häufigkeit, mit der die Lautboten eintreffen. Er ist höher (das heißt, die Frequenz ist höher), wenn die Lokomotive sich auf die Station zubewegt, und niedriger, wenn sie sich von der Station fortbewegt.

Ein sehr ähnlicher, dem Physiker ebenfalls wohlbekannter Effekt ist der Doppler-Effekt auf dem Gebiet der Optik.

Ein Spektroskop ist ein Gerät für die Analyse des Lichtes. Wenn zum Beispiel die Lichtquelle aus einem Gas besteht, durch das ein elektrischer Strom geleitet wird (wie etwa im Falle einer Neonröhre), so sehen wir bei Betrachtung dieser Quelle durch ein Spektroskop dünne helle Streifen gegen einen dunklen Hintergrund. Die Dämpfe verschiedener Elemente geben verschiedene Liniensysteme. Niemals gibt es zwei verschiedene Elemente mit identischen Liniensystemen — ebensowenig wie es zwei Menschen mit identischen Fingerabdrücken gibt. So kennzeichnet das Liniensystem in eindeutiger Weise das Element, zu dem es gehört, und jedes Element wird durch sein Liniensystem gekennzeichnet.

Durch die Analyse des von den Sternen oder Sternnebeln ausgesendeten Lichtes können wir die Anwesenheit der gleichen Elemente feststellen, die wir auf unserer Erde kennen und aufgefunden haben. Die Spektren des Wasserstoffs oder des Heliums haben die gleiche Struktur, ob sie jetzt von unserer Erde, von der Sonne, von den Sternen unserer Milchstraße oder von den fernen Nebeln kommen.

Immerhin sehen wir nicht nur die gleiche Struktur (sonst könnten wir gar nicht sagen, daß es sich um das gleiche Element handelt), sondern wir erkennen auch einige Unterschiede, wenn wir das Spektrum eines Elements auf unserer Erde mit dem Spektrum des gleichen Elements in einem Nebel vergleichen. Das ganze Spektrum (also *alle* Linien, die das Element kennzeichnen) ist ein wenig verschoben. Das ist auch der Fall, wie wir sowohl aus der Theorie wie aus der Erfahrung wissen, wenn die Lichtquelle (Neonröhre, Stern, Nebel) sich von uns

fortbewegt oder auf uns zubewegt. Es ist der gleiche Doppler-Effekt, den wir vorhin an dem Beispiel der Boten und an dem der Lokomotive erkannt haben: das Liniensystem ist gegen das *rote Ende* des Spektrums verschoben, wenn sich die Lichtquelle vom Beobachter entfernt; die Linien sind gegen das *violette Ende* des Spektrums verschoben, wenn sich die Lichtquelle dem Beobachter nähert. Verschiebung gegen das rote Ende zeigt eine verminderte Frequenz der Lichtboten, Verschiebung gegen das violette Ende eine vergrößerte Frequenz der Lichtboten an. Wie in den Fällen der Boten und der Pfeife können wir auch aus einer solchen Rot- oder Violettverschiebung die Geschwindigkeit berechnen, mit der sich die Lichtquelle entfernt oder nähert.

Es ergibt sich die Frage: warum verhalten sich die Nebel, als ob sie vor unserer Milchstraße davonlaufen würden? Die einfachste Antwort wäre natürlich, daß sie sich so verhalten, weil sie tatsächlich vor unserer Milchstraße davonlaufen. Aber dann bleibt die Frage: warum laufen sie?

Wäre die Rotverschiebung und die Nebelflucht in biblischen Zeiten entdeckt worden, so hätte man damals vielleicht irgendeine befriedigend erscheinende Erklärung für sie gefunden. (Die Unsinnigkeit dieser Behauptung ist mir wohl bewußt!) Man hätte damals folgern können: es gibt in jeder Milchstraße einige Planetensysteme und unsere Erde ist nicht der einzige Planet, der von sogenannten vernünftigen Wesen bevölkert wird. Da unser Planet derjenige ist, auf dem Adam sündigte, und der einzige, auf dem die Menschen einander töten, hätten alle anderen Nebel eine tiefe Abneigung gegen unsere Milchstraße und würden versuchen, soweit wie möglich von uns fortzukommen.

Natürlich scheidet diese Hypothese schon allein an der Tatsache, daß die Bewohner anderer Nebel, selbst wenn sie die Begebenheiten auf unserer Erde beobachten könnten, jetzt sehen würden, was vor Millionen Jahren geschehen ist, weil das Licht Millionen Jahre braucht,

um sie zu erreichen. Zweitens gibt es da noch einen merkwürdigen, einen außerordentlich merkwürdigen Umstand. Die Rotverschiebung *steigert sich* mit der Entfernung. Das bedeutet, daß die Geschwindigkeit der flüchtenden Nebel um so größer zu sein scheint, je weiter sie sich von unserer Milchstraße entfernen. Das ist verblüffend! Warum sollte die Abneigung mit der Entfernung zunehmen? Das Gesetz dieser Zunahme der Rotverschiebung ist an sich äußerst einfach: je größer die Entfernung, desto größer ist im Verhältnis dazu die Rotverschiebung. Ein Nebel in der Entfernung von 100 Millionen Lichtjahren scheint zehnmal schneller vor uns zu fliehen als ein 10 Millionen Lichtjahre entfernter Nebel. Diese gesetzmäßige Verbindung zwischen Rotverschiebung und Entfernung scheint ziemlich genau zu sein, obwohl es anscheinend einige kleine systematische Abweichungen gibt. Aber das Gesetz gilt gut genug, um uns die Bestimmung der Entfernungen der weit entfernten Nebel gerade durch das Gesetz der Rotverschiebung zu gestatten.

Wir kehren zu unserer Frage zurück. Worin liegt die Erklärung dieses Gesetzes der Rotverschiebung?

Auf der Suche nach einer Antwort verlassen wir den Bereich der Beobachtung und betreten den Bereich der Spekulation, den Bereich der Allgemeinen Relativitätstheorie. Es gibt eine Brücke, die in diesen Bereich der Spekulation führt; es gibt nämlich einen wichtigen Grundsatz, der teilweise zum Gebiet der Beobachtung und teilweise zum Gebiet der Spekulation gehört.

Wenn wir mit unseren Fernrohren in verschiedene Richtungen blicken, so sehen wir im großen ganzen keine besonders ausgezeichneten Richtungen. Wir finden im allgemeinen ebensoviele Nebel in einer Richtung wie in irgendeiner anderen. Wir sehen auch, daß die Zahl der Nebel pro Raumeinheit konstant bleibt, soweit unsere Fernrohre durchdringen können. Unser Weltall scheint ziemlich gleichförmig mit Materie erfüllt zu sein. Natürlich gibt es gewisse Unregelmäßigkeiten, aber sie sind gering genug, um uns in guter Annäherung

die Annahme zu gestatten, daß keine Richtung und kein Punkt im Raum vor irgend welchen anderen ausgezeichnet ist.

So schließen wir, daß unser Weltall *gleichförmig* ist. Vielleicht ist ein solcher Schluß vorschnell. Offenbar beziehen sich unsere Kenntnisse nur auf ein Bruchstück des Weltalls, und ein neues, stärkeres Fernrohr kann irgendwelche Unregelmäßigkeiten, irgendwelche systematische Abweichungen von der Gleichförmigkeit aufdecken. Das ist bestimmt möglich. Aber wenn wir annehmen wollten, daß das Weltall nicht gleichförmig sei, müßten wir wissen, auf welche Weise es sich mit der Richtung und mit der Entfernung ändere. Offensichtlich ist die Annahme, daß unser Weltall gleichförmig ist, die einfachste. Also nehmen wir die Gleichförmigkeit des Weltalls als grundlegende Hypothese an. Wir widersprechen damit nicht der Erfahrung.

Diese ursprünglich aus der Beobachtung gewonnene Annahme wurde von der Theorie übernommen und scharf zugespitzt. Sie wurde sozusagen zu einem moralischen Gebot für unser Weltall. Wir behaupten: die Vorstellung von unserem Weltall muß — im ganzen gesehen — die gleiche sein, ob es von unserer Milchstraße oder von einem beliebigen anderen Nebel aus betrachtet wird. Stellen wir uns vor — da unserer Vorstellungskraft keine Grenzen gesetzt sind —, daß wir zu jedem Nebel einen hinreichend mit Intelligenz und Instrumenten ausgerüsteten Beobachter entsenden. Die Vorstellung von unserem Weltall wird für jeden dieser Beobachter die gleiche sein. Das ist mit dem Prinzip der Gleichförmigkeit gemeint. Es wird natürlich kleine Abweichungen geben, aber ein ausgeglichenes und vereinfachtes Bild des Weltalls wird sich in gleicher Weise aus den wissenschaftlichen Beschreibungen aller dieser Beobachter auf den verschiedenen Sternen in verschiedenen Nebeln ergeben.

Nun haben wir ein wirkungsvolles Prinzip, das die Möglichkeiten der Struktur unseres Weltalls beschränkt. Das Bild unseres Weltalls muß mit dem Prinzip der Gleichförmigkeit in Einklang stehen!

Wir kehren zu der vorhergehenden Frage zurück. Wie erklären wir die Rotverschiebung? Unsere Frage wird jetzt allgemeiner und schwieriger. Wenn wir das Prinzip der Gleichförmigkeit annehmen, so folgt daraus, daß der Beobachter in einem Nebel außerhalb unserer Milchstraße die Rotverschiebung ebenfalls feststellt! Die Nebel flüchten also nicht nur vor uns, sondern auch voreinander.

Aber selbst dieser Schluß ist etwas verfrüht. Vielleicht kann die Rotverschiebung auch anders erklärt werden — nicht nur dadurch, daß die Nebel voreinander fortlaufen. Wir nehmen gegenwärtig weiter nichts an, als daß jeder Beobachter auf all diesen Nebeln die Existenz der Rotverschiebung bestätigen und die Proportionalität der Rotverschiebung mit der Entfernung feststellen würde.

So werden wir zu einer anderen Frage geführt: welche Möglichkeiten der Struktur unseres Weltalls gibt es, die mit dem Prinzip der Gleichförmigkeit vereinbar sind? An diesem Punkt verknüpft sich die Geschichte von der Struktur unseres Weltalls mit der Geschichte der Relativitätstheorie — genauer gesagt, mit der Geschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie. Wir fragen: was sind die möglichen Modelle unseres Weltalls, die mit den Grundsätzen der Allgemeinen Relativitätstheorie, mit dem Grundsatz der Gleichförmigkeit und mit der beobachteten Rotverschiebung in Einklang stehen?

Gewiß wird die Zahl der möglichen relativistischen Modelle unseres Weltalls durch das Prinzip der Gleichförmigkeit und das Gesetz der Rotverschiebung beschränkt. Dennoch sind viele Modelle möglich, und die Ergebnisse der Beobachtungen sind nicht von einer Endgültigkeit, die eine eindeutige Wahl erlauben würde. Aber was auch immer die Natur unseres Weltalls sein mag: wir wissen zumindest, daß alle denkbar möglichen Weltalle in zwei Klassen eingeteilt werden können. Unser Weltall ist entweder *offen* oder es ist *geschlossen*. Diese wichtige Feststellung klingt nicht besonders eindrucksvoll. Sie könnte einen an die triviale Tatsache erinnern, daß eine Tür entweder offen oder geschlossen sein muß. Dennoch ist die Erkenntnis zweier solcher

Möglichkeiten eine große Entdeckung. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wäre die Annahme eines geschlossenen Weltalls sinnlos gewesen. Ein euklidischer Raum war damals die einzige Möglichkeit.

Was sind die charakteristischen Merkmale eines offenen und eines geschlossenen Weltalls?

Beginnen wir mit einem geschlossenen Weltall. Das Weltall der zweidimensionalen Wesen, die auf einer Kugel leben, wäre geschlossen. Wir erinnern uns, daß für sie ein Lichtstrahl zuletzt zum Ausgangspunkt zurückkehren muß.

Ebenso ist vielleicht unser Weltall ein geschlossenes Weltall, obwohl es schwerer ist, sich einen dreidimensionalen „sphärischen Raum“ vorzustellen, als ihn mathematisch zu beschreiben. Dennoch können wir uns zumindest theoretisch ein entscheidendes Experiment vorstellen, durch das wir erfahren, ob unser Weltall geschlossen ist oder nicht. Man schicke einen Lichtstrahl in den Raum hinaus. Wenn der Lichtstrahl nach einem Zeitablauf zurückkehrt, ist das Weltall geschlossen. Wenn er niemals zurückkehrt, ist das Weltall offen. Natürlich würde ein solches Experiment auf technische Schwierigkeiten stoßen, aber wir brauchen nicht darauf einzugehen. Die größte Schwierigkeit liegt darin, daß wir zu wenig Zeit haben; nach unserem gegenwärtigen Wissen würde das Licht Milliarden Jahre brauchen, um unsere Welt zu durchheilen und wieder zu uns zurückzukehren. Dennoch besteht eine Möglichkeit, daß wir mit dem neuen Zweihundertzollreflektor auf Umwegen ausfindig machen werden, ob unser Weltall offen oder geschlossen ist.

Wir können uns das Weltall als geschlossen vorstellen, indem wir eine Dimension unterdrücken und unser Weltall mit jenem der zweidimensionalen Kugelbewohner vergleichen. Um diesen Vergleich auszuführen, wollen wir uns goldene Punkte vorstellen, die spärlich, aber gleichmäßig über eine solche Kugel verteilt sind; sie verkörpern für uns die Nebel unserer Welt. Wie steht es mit der Rotverschiebung? Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir unser zweidimensionales

Bild ein wenig komplizieren. Stellen wir uns vor, daß eine Kugel sich wie ein Ballon unter zunehmendem Druck ausdehnt. Diese sich ausdehnende Kugel bildet — eher als eine Kugel mit unverändertem Radius — das zweidimensionale Modell unseres Weltalls. Wir sehen, daß ein solches Modell sowohl das Prinzip der Gleichförmigkeit als auch das Rotverschiebungsgesetz befriedigt. Wirklich: unsere Nebel — die goldenen Punkte auf dem sich ausdehnenden Ballon — werden gleichmäßig verteilt bleiben, weil sie gleichmäßig verstreut waren und weil die Expansion die Gestalt der Kugel bewahrt und nur ihren Radius ändert. Die Abstände zwischen den Nebeln, die auf dem Ballon gemessen werden, nehmen zu. Ein Beobachter auf irgendeinem dieser Nebel wird bemerken, daß andere sich von ihm entfernen. Es ist auch klar, daß für jeden Nebel die Geschwindigkeit der Expansion der andern Nebel proportional der Entfernung zu sein scheint.

Wir wollen jetzt die andere Möglichkeit prüfen: die eines offenen Weltalls. Hier brauchen wir keine Dimension zu unterdrücken und können zum dreidimensionalen Bild unseres Raumes zurückkehren. Am besten verstehen wir dieses Weltall durch eine historische Betrachtungsweise.

Einstmals war alle Materie unseres Weltalls in einem sehr kleinen Volumen konzentriert. Im Rahmen unseres vereinfachten mathematischen Modells können wir sagen, daß sie in einem Punkt konzentriert war. So waren alle Nebel eng zusammengepreßt. Dann geschah etwas und die ganze Materie explodierte wie ein Explosivgeschloß. Die Nebel begannen, mit konstanter Geschwindigkeit vor einander davonzulaufen. Wenn wir zum Beispiel von unserer Milchstraße aus urteilen, bewegten sich die schnelleren Nebel weiter fort als die anderen. Auch heute noch bewegen sie sich gleichförmig fort.

Wir erkennen, warum eine solche Geschichte unseres Weltalls uns das Rotverschiebungsgesetz (der Entfernung proportional) und auch das Prinzip der Gleichförmigkeit liefert. Je weiter entfernt die Nebel sind, desto größer ist ihre Geschwindigkeit, weil sie diese größeren

Geschwindigkeiten hatten, als sie noch auf einen kleinen Raum konzentriert waren. Sie behalten diese größere Geschwindigkeit, weil sie sich gleichförmig bewegen. Die Nebel, die uns näher sind, haben geringere Geschwindigkeiten, weil sie zur Zeit der Konzentration diese geringeren Geschwindigkeiten besaßen und sie seither beibehalten haben. Außerdem erkennen wir — wenn dies auch etwas schwieriger ist —, daß das Prinzip der Gleichförmigkeit nicht verletzt wurde. Alle Nebel steckten einmal zusammen, und wenn wir auch sagen dürfen, daß sie vor unserer Milchstraße davonzulaufen begannen, können die Bewohner eines beliebigen anderen Nebels das gleiche in bezug auf sich sagen. Die schnellsten Nebel hätten eine Geschwindigkeit, die der Lichtgeschwindigkeit nahe ist, und die gesamte Materie des Weltalls befände sich in einer Kugel mit einem Radius, der dem Produkt aus  $c$  (Lichtgeschwindigkeit) mal  $t$  (seit dem Moment der Explosion vergangene Zeitspanne) gleich ist. Jeder Beobachter kann für sich selbst eine solche Kugel zeichnen, und eine solche Feststellung wird für jeden Beobachter richtig sein. Der Übergang von einem System (also von einem Nebel) zu einem anderen System wird von der Transformation beherrscht, die durch die Spezielle Relativitätstheorie formuliert wurde: von der Lorentz-Transformation. Sie zeigt uns, wie wir die Erscheinungen in einem System beschreiben müssen, wenn wir die Beschreibung in einem anderen System kennen. Nehmen wir zum Beispiel unsere Milchstraße als einen Punkt  $O$  und einen sehr weit entfernten Nebel als einen Punkt  $P$ . Dann wird sich  $P$  nahe der Oberfläche  $S$  der Kugel mit dem Radius  $ct$  und dem Mittelpunkt  $O$  befinden. Aber auch der Beobachter in Punkt  $P$  wird sich im Mittelpunkt einer solchen Kugel vorkommen. Alle Nebel zwischen  $P$  und  $S$  werden für den Beobachter in  $O$  im Vergleich zu dem Beobachter in  $P$  auf einer geschrumpften Schale zu liegen scheinen. Das kommt daher, weil sie sich schnell bewegen. Es ist das Ergebnis der Längenkontraktion in der Bewegungsrichtung, die von der Speziellen Relativitätstheorie gefordert wird. Aus dem-

selben Grund werden alle Nebel in größerer Entfernung als O für den Beobachter im Nebel P auf einer geschrumpften Schale zu liegen scheinen. Die Geschichte eines solchen offenen Weltalls würde für alle Beobachter in allen Nebeln die gleiche sein.

Erst durch eine detaillierte Berechnung können wir ausdrücklich zeigen, wie sowohl das Gesetz der Rotverschiebung als auch das Prinzip der Gleichförmigkeit aus einem solchen Bild folgen.

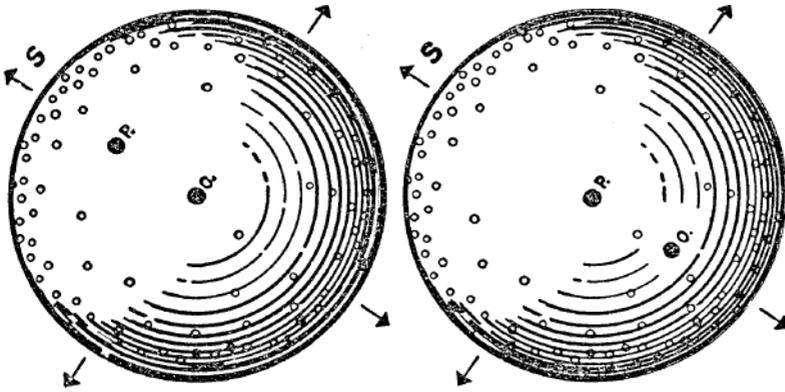
Wann explodierte unser Weltall? Aus der Beobachtung der gegenwärtigen Rotverschiebung können wir schließen, daß die Ausdehnung vor einigen Milliarden Jahren begann.

Da wir nun die zwei möglichen Strukturen unseres Weltalls zumindest in ihren Umrissen kennen, dürfen wir fragen: Ist unser Weltall offen oder geschlossen? Wie schon erwähnt, gibt es nicht genug Beweise, um diese Frage zu beantworten. Gegen das Bild eines geschlossenen Weltalls, das wegen der Vollkommenheit, mit der es im Rahmen des heute verfügbaren mathematischen Apparates die Behandlung physikalischer Fragen erlauben würde, von vielen Gelehrten bevorzugt wird, bestehen schwerwiegende Einwände\*. Ein geschlossenes Weltall wäre nicht nur räumlich endlich, es hätte auch nur einen endlichen materiellen Inhalt. Damit stünde es im Gegensatz zum Begriff der Entwicklung. In einer Welt mit endlichem materiellem Inhalt gäbe es ja bestenfalls eine „ewige Wiederkehr des Gleichen“, keinesfalls aber eine dauernd fortschreitende Bewegung vom Niederen zum Höheren, vom Einfachen zum Komplizierten, eine unaufhörliche Kette qualitativer Veränderungen von alten Zuständen zu neuen, noch nie dagewesenen.

Beim Bild des offenen Weltalls, wo sowohl der Raum wie der materielle Inhalt unendlich ist, fallen diese Einwände fort. Dafür

---

\* Nicht etwa wegen der Frage: „Was liegt jenseits eines dreidimensionalen sphärischen Raumes?“ Diese Frage ist sinnlos; es gibt einfach kein Jenseits, ebenso wie es für die zweidimensionalen Bewohner einer Kugeloberfläche kein Jenseits gibt.



In einem offenen Weltall scheinen alle Nebel zwischen P und S für den Beobachter in O auf einer Schale zu liegen, die im Vergleich zu der Schale, welche man von P aus wahrnimmt, geschrumpft ist.

müssen wir die bequeme mathematische Behandlung opfern und uns über Ereignisse in unendlicher Entfernung den Kopf zerbrechen.

Eine Mißdeutung erfährt die relativistische Kosmologie häufig insofern, als man die Aussage, daß einmal die Materie — sowohl im geschlossenen wie im offenen Weltall — auf einem engen Raum konzentriert war (mit endlicher bzw. unendlicher Dichte!), so verstanden wissen will, als ob die Relativitätstheorie den „Anfang der Welt“, den Zeitpunkt der „Schöpfung der Materie“ berechne. Aber es handelt sich hier lediglich um den Versuch, die Entwicklung der heute vorhandenen Sterne und Sternsysteme aus einem früheren Zustand der Materie zu verstehen, bei dem diese Sterne und Sternsysteme als solche noch nicht bestanden. Nichts aber berechtigt dazu, den Beginn dieser Entwicklung, der nur die gegenwärtige äußerste Grenze unserer Kenntnis von der Geschichte unserer Welt ist, als Zeitpunkt der „Weltschöpfung“ zu bezeichnen.

Unser Jahrhundert hat das Bild unserer Welt gewandelt. Unsere

Vorstellungen über die Struktur der Welt — von den Atomen bis zum Weltall — haben revolutionäre Veränderungen erfahren. Dieser ungeheure Fortschritt unserer Erkenntnis, der kaum mit dem Fortschritt in irgendeiner anderen Epoche der kurzen Menschheitsgeschichte verglichen werden kann, ist zum Teil durch die unmittelbaren materiellen Bedingungen gegeben, unter denen die Menschen leben, zum anderen Teil durch die geistigen Traditionen, also durch den vorherigen Zustand der Wissenschaft.

Subjektiv — also vom persönlichen Standpunkt des Forschers — gesehen, ist die Entwicklung der Wissenschaft nicht immer durch praktische Erfordernisse bestimmt. Viele Überlegungen über die Atome und über unser Weltall entstanden aus dem Wissensdurst des Menschen, aus seinem Wunsch, immer tiefer in das Unbekannte vorzudringen. Der unmittelbar praktische Wert vieler unserer Theorien mag null sein, wenigstens soweit wir das heute beurteilen können; aber sie verhelfen zum Verständnis der Welt, in der wir leben. Einsteins Motiv bei seinen bahnbrechenden Forschungen war gewiß dieser Wissensdurst und der Drang nach der Herstellung eines Weltbildes von größerer logischer Einheitlichkeit. Aber dennoch haben diese anscheinend so weltfremden Gedankenexperimente wesentlich, wenn auch unbeabsichtigt, zur Erreichung eines praktischen Zieles von größter Bedeutung für die Zukunft der Menschheit beigetragen — zu der Entwicklung der Atomenergie.

Ich habe versucht, die Bemühungen der Wissenschaftler um das Verständnis der Architektur unseres Weltalls kurz zu skizzieren. Diese Bemühungen sind von wesentlich spekulativem Charakter, wo sie über die Grenze unserer Beobachtungen hinausgehen. Wir befinden uns hier in einer ähnlichen Lage wie bei dem Versuch, aus der Kenntnis des Verlaufes eines kurzen Stückes einer unbekanntten Straße eine Feststellung darüber zu treffen, wohin sie führt. Jedenfalls ist es uns in den letzten dreißig Jahren gelungen, ein neues Problem zu formulieren und einige mögliche Lösungen in Betracht zu ziehen, wenn auch

unsere Ergebnisse weder entscheidend noch endgültig sind. Aber in der Wissenschaft gibt es überhaupt keine „endgültigen“ Ergebnisse.

Unsere kosmologischen Überlegungen sind aus den Ideen der Relativitätstheorie entstanden, obwohl sie über die ursprüngliche Arbeit Einsteins weit hinausgegangen sind. In der Geschichte des menschlichen Denkens bewegen sie sich auf einem jener vielen Pfade, die von einem gemeinsamen Ursprung ausgehen: von der Relativitätstheorie, der Schöpfung Albert Einsteins.

## Einsteins Anteil an der unvollendeten Umwälzung des physikalischen Weltbildes

(Quantentheorie)

### Die Geburt der Quantentheorie

Die Relativitätstheorie wurde in allen Wesenszügen von *einem* Mann geschaffen und ihre Grundlagen sind bis zum heutigen Tag unverändert geblieben. Aber die Relativitätstheorie bildet nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der gemeinsamen Bemühungen aller Physiker um eine folgerichtige Theorie der Naturerscheinungen. Fast jeder Physiker würde zustimmen, daß die große Umwälzung, die die Physik unseres Jahrhunderts umgebaut hat, nicht in der Relativitätstheorie, sondern in der Quantentheorie liegt. Deren Geschichte ist die Geschichte unserer Bemühungen um das Verständnis der Materie und der Strahlung — das heißt, um das Verständnis der Natur und der Zusammensetzung der Elementarteilchen, aus denen die Welt der Materie und der Strahlung aufgebaut werden kann. Wir wissen jetzt, daß unsere materielle Welt, der Bleistift, mit dem ich schreibe, mein Schreibtisch, mein Körper, die Erde, die Sonne, die Planeten, die Sterne, die Nebel, alle aus materiellen Bausteinen von wenigen Arten aufgebaut sind: Elektronen, Protonen, Positronen, Neutronen und Mesonen. Die Quantentheorie beschäftigt sich mit den Gesetzen des Aufbaus der Materie aus diesen Elementarteilchen und der zwischen

ihnen wirkenden Kräfte; Gesetzen, die durch Spektrallinien, durch die radioaktiven Erscheinungen und bei der Kernspaltung enthüllt werden. Die Geschichte der modernen Physik ist zu einem großen Teil jene der Quantentheorie.

Während die Relativitätstheorie fast zur Gänze das Werk eines Mannes ist, der seinen einsamen Weg allein verfolgte, ist die Quantentheorie die Leistung vieler Menschen, die unabhängig oder gemeinsam arbeiteten und Schritt für Schritt unser noch immer unvollständiges Wissen von der Materie, der Strahlung und ihrer Wechselwirkung vervollständigt haben. Es ist eine faszinierende und verwickelte Geschichte. Würde ein Physiker aufgefordert, den für diese Entwicklung wichtigsten Namen zu nennen, so würde er es schwierig finden. Er würde es bei weitem vorziehen, eine Namensliste zu geben: Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac und Pauli.

Wenn wir die Quantentheorie als die größte wissenschaftliche Revolution unseres Jahrhunderts bezeichnen, so sehen wir also, daß Einstein in ihr eine überaus wichtige, aber nicht eine einzigartige Rolle spielte. Wir können hier nicht die ganze Umwälzung beschreiben, die sich durch die Quantentheorie in der Physik vollzog. Viele Bücher verschiedener Schwierigkeitsgrade sind über dieses Thema geschrieben worden und werden darüber geschrieben werden. Wir sind hier hauptsächlich mit Einsteins Anteil an dieser Umwälzung befaßt. Aber selbst dieser Gegenstand ist noch zu weit und wir werden uns auf die Diskussion des wichtigsten Beitrags Einsteins beschränken.

Bevor wir dies tun, müssen wir unser Bild klären. Denn was ich gesagt habe, könnte den Eindruck vermitteln, daß es sozusagen zwei gesonderte Strömungen in der modernen Physik gäbe: die durch die Relativitätstheorie vertretene — eine ziemlich enge Strömung — und dann eine breite Strömung, vertreten durch die Quantentheorie. Ein solches Bild wäre vollkommen falsch. Die Quantentheorie ist von der Relativitätstheorie nicht unabhängig und ohne den Anteil, den die Relativitätstheorie an ihrer Entwicklung hatte, nicht vorstellbar.

Allerdings waren die Anfänge der Quantentheorie von der Relativitätstheorie unabhängig. Sie liegen in der Arbeit von Planck um die Jahrhundertwende, fünf Jahre vor der Geburt der Speziellen Relativitätstheorie. Einsteins wichtigster Beitrag zur Quantentheorie wurde in einer Arbeit ausgesprochen, die schon 1905 erschien, im selben Jahrgang und im selben Band der „Annalen der Physik“, in dem seine Arbeit über die Relativitätstheorie gedruckt wurde. (Wie wir sehen werden, waren diese Arbeiten nicht die einzigen von Einstein, die in diesem Band erschienen. Das Schweizer Patentamt muß ein guter Platz zum Arbeiten gewesen sein!)

Wir können also die Geschichte der Quantentheorie nur bis zum Jahre 1905 unabhängig von der Relativitätstheorie behandeln. Später vermischten sich die Geschichten der beiden Theorien: De Broglies und Diracs große Leistungen in der Quantenphysik sind mit der Relativitätstheorie so eng verbunden, daß sie in Büchern über jeden der beiden Gegenstände behandelt werden können. In fachmännischer Sprache würde ich sagen, daß ein großer Fortschritt in der Quantentheorie erzielt wurde, indem man sie Lorentz-invariant machte. Dies geschah 1928 durch Dirac. Ein anderes wichtiges Beispiel für die Verbindung von Quantentheorie und Relativität ist die Atomenergie und ihre Ausnützung. Hier beginnen die entscheidenden Gedanken mit der Relativitätstheorie, nämlich mit der Beziehung von Masse und Energie; aber es war die Quantentheorie, die die Eigenschaften der Materie und die Umwandlung der Elemente aufdeckte, durch die die Atomenergie möglich wurde. In der Tat bildet der Einfluß der Relativitätstheorie auf die Quantentheorie ein sehr wichtiges Kapitel in der Geschichte der Physik. Bei der Beurteilung des Einflusses der Ideen Einsteins auf die moderne Physik darf diese Phase nicht vergessen werden.

Um über Einsteins eigene Rolle in der großen Quantenrevolution zu berichten, müssen wir noch einmal zum Beginn unserer Erzählung, zum Jahr 1905, zurückkehren. Aber noch bevor wir das tun, müssen

wir die Geschichte der wissenschaftlichen Experimente und der theoretischen Gedanken umreißen, die zu Einsteins Entdeckung führten. Wir müssen für eine kurze Zeit bis ins 17. Jahrhundert zu den Arbeiten von Newton und Huygens zurückgehen.

Im 17. Jahrhundert wurden durch zwei große Männer zwei verschiedene Theorien des Lichtes ausgesprochen, durch Newton und Huygens. Es waren dies die korpuskulare und die Wellentheorie.

Newtons großes Werk, „Die Optik“, enthält Beschreibungen seiner Experimente über die Lichtbrechung und eine vorsichtige Formulierung seiner Korpuskulartheorie. Nach Newton verhält sich Licht, als ob es aus Teilchen (Korpuskeln) bestünde: gewichtlosen Teilchen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Zu den verschiedenen Farben gehören verschiedene Arten von Teilchen, aber im leeren Raum bewegen sie sich alle gleichförmig mit Lichtgeschwindigkeit entlang einer geraden Linie. Innerhalb der Theorien Newtons wird die Erscheinung des Lichtes durch ein mechanisches Bild erklärt. Seine Bestandteile sind gewichtlose Teilchen und ihre Bewegung.

Aber auch die rivalisierende Theorie von Huygens ist mechanischer Natur. Zur gleichen Zeit ausgesprochen, konkurrierte seine Theorie mit der Newtons um die Vorherrschaft auf dem Gebiet der optischen Erscheinungen. Nach Huygens ist das Licht eine Welle. Wenn wir über eine Welle sprechen, müssen wir zwischen der Fortpflanzung der Welle und der Bewegung der Materieteilchen unterscheiden, die das Medium für die Fortbewegung der Welle bilden. Ähnlich müssen wir, wenn wir analysieren, wie sich Tratsch verbreitet, zwischen der Verbreitung des Tratsches und der Bewegung der Tratscherin unterscheiden; sie kann sich von ihrem Haus zu ihren Nachbarinnen und zurück bewegen, während der Tratsch selbst sich geradlinig nach allen Richtungen von der Quelle ausbreitet. Ähnlich bewegen sich die Wasserteilchen im Falle einer Wasserwelle auf und nieder, aber die durch einen ins Wasser geworfenen Stein verursachte Welle bewegt sich geradlinig von der Quelle fort. Was ist nach Huygens

das Medium, durch das sich die Lichtwellen bewegen? Ein gewichtloses, durchsichtiges Medium, das das ganze Weltall durchsetzt: der Äther. Auf diese Weise wurde der Äther geboren.

Wir kehren nochmals zu den Begriffen zurück, mit denen wir begonnen haben. Wir müssen dies tun, weil Einsteins großes Werk in der Quantentheorie mit der Physik des Lichtes befaßt ist, während sein großes Werk in der Relativitätstheorie eher mit der Geometrie des Lichtes befaßt ist. Das wird klar werden, wenn wir seine Lichtquanten oder Photonen diskutieren; doch bevor wir das tun, müssen wir tiefer in die Vergangenheit tauchen.

Wann immer wir von einer Welle sprechen, sind die wesentlichen Begriffe, die zu ihrer Beschreibung dienen, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Wellenlänge. Unter der Wellenlänge verstehen wir den Abstand (in einem bestimmten Augenblick) von einem Wellenberg zum nächsten Wellenberg, oder von einem Wellental zum nächsten Wellental. Nach der Wellentheorie des Lichtes unterscheiden sich verschiedene einfache Farben durch verschiedene Wellenlängen.

Auf diese Weise haben wir zwei verschiedene Theorien, die korpuskulare und die Wellentheorie. Im Bereich unserer Sinnesempfindungen finden wir Licht von verschiedenen Farben. In der korpuskularen Sprache bedeutet dies Lichtteilchen von verschiedener Art. In der Wellensprache bedeutet es Licht von verschiedener Wellenlänge.

Es ist beunruhigend, zwei verschiedene Theorien zu haben, denn man müßte annehmen, daß Licht entweder eine Welle sein kann oder ein Schauer von Korpuskeln, aber nicht beides. Der Zweck einer Theorie ist es, Ereignisse so zu ordnen und zu erklären, daß sie ein einfaches Bild ergeben, aus dem die Naturerscheinungen und Gesetze abgeleitet werden können. Zu Newtons Zeit war es möglich gewesen, die bekannten Erscheinungen durch beide Theorien gleich gut zu erklären, und so bestand für eine eindeutige Wahl zwischen ihnen keine Grundlage; dies war im wesentlichen die damalige Situation.

(Der letzte Satz beinhaltet eine allzu große Vereinfachung, aber wir könnten den Eindruck des Gesamtbildes verwirren, wenn wir allzu genau zu sein versuchten.) So konnten beide Theorien im 17. und im 18. Jahrhundert als gleich richtig betrachtet werden. Das gilt jedoch nicht mehr für das 19. Jahrhundert. In diesem änderte sich die Situation radikal durch die Arbeiten von Young und Fresnel. Eine neue Erscheinung wurde bekannt und gründlich erforscht, und eine der Theorien hörte auf, annehmbar zu sein. Es war die Theorie Huygens', die im 19. Jahrhundert als Sieger hervorging.

Warum?

Weil eine neue Erscheinung auf die Bildfläche trat: die Beugung des Lichtes.

Wir werden ein einfaches Experiment beschreiben und die Anhänger der korpuskularen und der Wellentheorie auffordern, sein Ergebnis vorherzusagen. Wenn ihre Vorhersagen sich unterscheiden — und *nur* dann —, werden wir ein Mittel in der Hand haben, um zwischen der Korpuskulartheorie Newtons und der Wellentheorie Huygens' zu unterscheiden.

Unter den sehr zahlreichen Experimenten dieser Art wählen wir das folgende: Wir haben eine Lichtquelle, vor die wir eine kleine runde Öffnung setzen. Was wird auf einem Schirm erscheinen, auf den das Licht auftrifft, nachdem es durch diese runde Öffnung hindurchgetreten ist?

Die Antwort des Anhängers der Korpuskulartheorie Newtons würde ungefähr lauten:

„Lichtteilchen bewegen sich auf einer geraden Linie. Sie treten durch das runde Loch hindurch und bewegen sich innerhalb eines Kegels, der durch die punktförmige Lichtquelle und die geraden Linien, die sie mit der runden Öffnung verbinden, gebildet wird. Auf dem Schirm werden wir dort einen Schatten sehen, wo das Licht nicht hindringen kann, dagegen Licht an den anderen Stellen. Der Übergang von Licht zu Schatten wird scharf sein.“

Behalten wir die Vorhersage im Gedächtnis, daß der Übergang vom Licht zur Dunkelheit immer scharf sein wird — wie klein auch die runde Öffnung ist.

Die Vorhersage des Anhängers der Wellentheorie von Huygens wäre eine andere; er würde argumentieren:

„Stellen wir uns auf einem Fluß kurze Wellen vor, die sich in der Richtung auf ein großes Schiff bewegen. Sie werden auf die andere Seite des Schiffes nicht vordringen, darum wird das Schiff einen Schatten werfen. Wird jedoch das Schiff durch ein kleines Boot oder einen Baumstamm ersetzt, dann werden sich die Wellen biegen und zur anderen Seite des Hindernisses vordringen. Auf diese Weise werden wir einen bestimmten Schatten oder keinen Schatten haben, je nachdem, ob die Hindernisse im Vergleich mit der Wellenlänge groß oder nicht sehr groß sind. Wenn dies zutrifft, dann wird in dem Experiment mit dem Lichtkegel durch die runde Öffnung etwas Ähnliches geschehen. Wenn wir die Öffnung kleiner und kleiner werden lassen, wird ein Moment kommen, wo kein Schatten mehr erscheint. Nach meinen Berechnungen werden sich statt einer Fläche des Lichtes und einer Fläche des Schattens abwechselnd dunkle und helle Ringe finden. Der Übergang vom Licht zur Dunkelheit wird durch diese dunklen und hellen Ringe gebildet werden, oder vielleicht durch farbige Ringe, wenn die Quelle verschiedenfarbiges Licht ausstrahlt: das heißt Licht, das eine Mischung von verschiedenen Wellenlängen ist. Sobald wir eine solche Erscheinung entdecken können, werden wir daraus und aus meinen Berechnungen ableiten können, wie groß, oder vielmehr wie klein die Wellenlänge des von der Quelle ausgesendeten Lichtes ist. So sage ich für hinreichend kleine Öffnungen das Erscheinen von dunklen und hellen und vielleicht farbigen Ringen voraus, während mein Kollege, der an die Newtonsche Theorie glaubt, das Erscheinen von Licht und Schatten voraussagt. Hier liegt ein wesentlicher Unterschied zwischen unseren beiden Theorien.“

Es war die Vorhersage der Wellentheorie, die sich als richtig erwies. So wurde die Herrschaft der Wellentheorie im 19. Jahrhundert errichtet. Die Erscheinung der Beugung gestattet es uns, die Wellenlänge des Lichtes zu messen. Natürlich ist eine solche Wellenlänge im Verhältnis zur Größe des Menschen klein. Nur aus diesem Grund konnte die Gültigkeit der Korpuskulartheorie so lange akzeptiert werden. Aber vergessen wir Newtons Bild nicht gänzlich, denn wir werden später sehen, daß Einstein zu ihm zurückkehrte und der toten Theorie neues Leben eingehaucht hat.

Experimente über die Lichtbeugung gestatten uns, die Wellenlängen im sichtbaren Spektrum zu messen. Unter allen Regenbogenfarben hat das Violett die kürzeste Wellenlänge, das Rot die längste. Im 19. und 20. Jahrhundert wurde dieser Bereich ausgedehnt. Die Röntgenstrahlen wurden entdeckt, die ihrer Wellenlänge nach viel kürzer sind als sichtbare Strahlung, und die Gammastrahlen, die viel kürzer sind als Röntgenstrahlen. Jetzt haben wir auch Radiowellen, die viel länger sind als die Wellen der sichtbaren Strahlen. Dieser große Bereich der Strahlung wird durch eine einzige Theorie erfaßt: durch Maxwells Feldtheorie. Dies war der Stand des Wissens um die Jahrhundertwende.

Große Ideen und neue Theorien werden aus Konflikten geboren, aus Schwierigkeiten und Widersprüchen, aus denen kein befriedigender Ausweg möglich erscheint. Dies waren die Bedingungen, die zu den wichtigsten physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts führten: zur *Quantentheorie* und zur *Relativitätstheorie*.

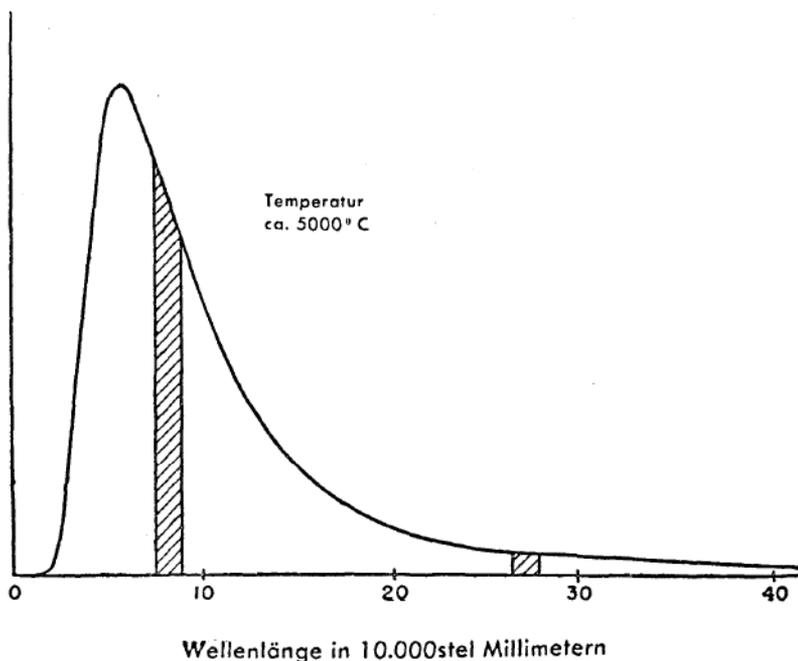
Die Schwierigkeiten, die der Quantentheorie zugrunde liegen, sind weniger auffällig und erschienen zunächst, philosophisch betrachtet, weniger tief als diejenigen, die zur Relativitätstheorie führten. Die tiefsten Wesenszüge der Quantentheorie erkennt man erst in einem ziemlich späten Stadium. Wenn man die Quantentheorie von einem logischen Gesichtspunkt darstellen will, wäre es bequem, die historische Entwicklung, die im Gegensatz zur Relativitätstheorie

ziemlich zufällig erscheint, teilweise außer acht zu lassen und zu umgehen. Trotzdem werden wir hier der historischen Entwicklung folgen, weil die Schwierigkeiten der Frühzeit Einsteins Gedankengänge beeinflussten und zu seiner Theorie der Photonen führten.

Welches Problem der Physik führte zur Entstehung der Quantentheorie? Denken wir an das sichtbare Spektrum der Sonne. Das von der Sonne ausgesendete Licht ist weiß, eine Mischung aller sichtbaren Farben. Wir können dieses weiße Licht in seine Bestandteile aufspalten, indem wir es durch ein Prisma hindurchtreten lassen. Die Natur leistet für uns das gleiche in der herrlichen Erscheinung eines Regenbogens. In der Sprache der Wellentheorie können wir sagen, daß im sichtbaren Sonnenspektrum alle Wellen anwesend sind, beginnend mit der kürzesten, dem Violett entsprechenden, bis zur längsten, dem Rot entsprechenden.

Die Sonne ist die Energiequelle. Die Energie wird durch Wellen verschiedener Länge verbreitet. Jeder Teil des Spektrums, also jede Farbe, trägt einen gewissen Anteil dieser Energie mit sich. Teilen wir nun dieses Spektrum beispielsweise in zehn Teile; das heißt in zehn kleine Intervalle je nach der Wellenlänge. Wieviel Energie wird in jedem dieser Abschnitte enthalten sein? Wird jeder von ihnen ein Zehntel der Gesamtenergie tragen? Selbst ein oberflächliches Experiment zeigt schon, daß dies nicht der Fall ist. Die Energie ist über die Abschnitte ungleich verteilt. Aber welches Gesetz regelt dann die Verteilung? Wieviel wird zum Beispiel der dritte Abschnitt tragen und wieviel der siebente? Wie ist die strahlende Energie der Sonne über die verschiedenen Teile des Spektrums verteilt? Wenn wir eine genauere Kenntnis der Energieverteilung im Spektrum haben wollen, müssen wir es in eine größere Zahl von Abschnitten teilen, sagen wir in hunderte oder sogar tausende statt in zehn. Unsere Frage kann dann experimentell beantwortet werden; dies ist im 19. Jahrhundert geschehen. Die Antwort wird am besten durch ein Diagramm zusammengefaßt. Auf einer waagrechten Linie zeichnen wir alle denkbaren

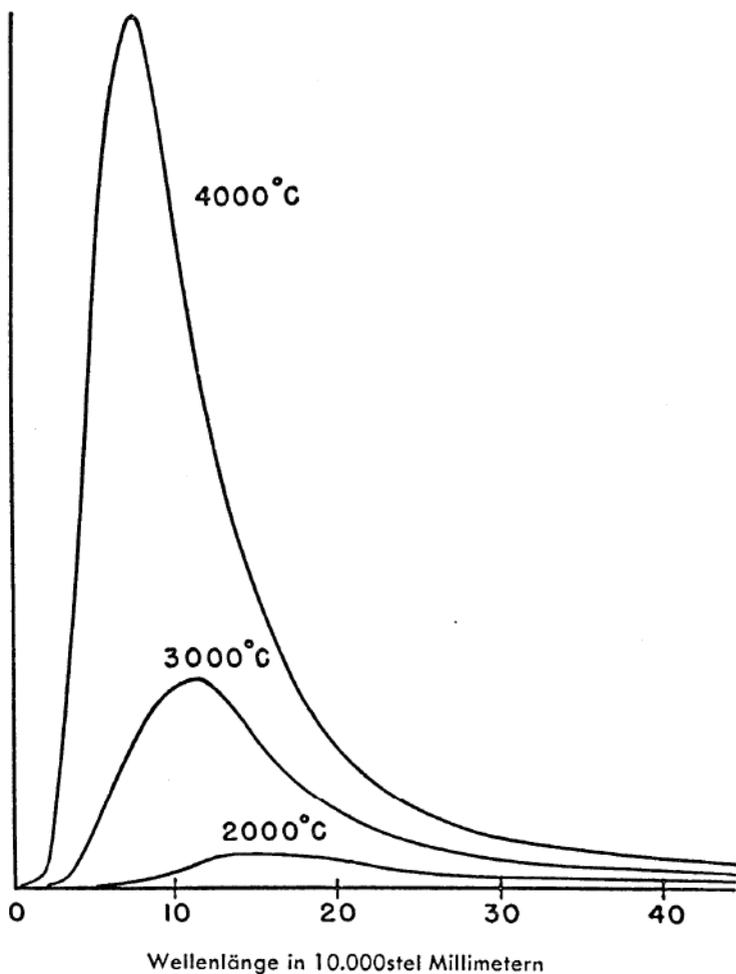
Wellenlängen zwischen null und unendlich ein. Dann wird uns eine Kurve die Energie anzeigen, die zu jedem kleinen Intervall gehört. Die schraffierten Teile geben die Energien wieder, die zu zwei verschiedenen, gleichlangen Intervallen gehören, welche willkürlich ausgewählt worden sind. In der Gegend der blauen Farbe — um  $4800 \text{ \AA}$  — ist die Energie verhältnismäßig am reichlichsten. (Zehn Millionen  $\text{\AA}$  [Ångström] = 1 Millimeter.) Das rote Ende des Spektrums ist verhältnismäßig energiearm.



Die schraffierten Teile entsprechen Energien in zwei verschiedenen Intervallen gleicher Länge. Das rote Ende des Spektrums ist verhältnismäßig energiearm.

Dann ergab sich die Frage: wie wird sich die Energieverteilung ändern, wenn die Temperatur des strahlenden Körpers sinkt? Auch diese Frage wurde durch das Experiment beantwortet. Wir können Miniatursonnen erzeugen, die zwar kälter sind als die Sonne selbst, aber doch jede Art von Strahlung aussenden. Wir können die Verteilung der Energie in ihren Spektren erforschen und können ausfindig machen, wie sich deren Energieverteilung ändert, wenn die Temperatur abnimmt. Genau wie zuvor können wir verschiedene Kurven zeichnen, die sich auf verschiedene Temperaturen beziehen und die uns zeigen, wie sich die Energieverteilung mit der Temperatur ändert. Wir entnehmen unseren Kurven, daß die ausgesendete Energie mit abnehmender Temperatur abnimmt. Das ist selbstverständlich. Aber eine andere Erscheinung ist interessanter und unerwarteter. Die Streifen des Spektrums, die verhältnismäßig den größten Energiebetrag mit sich tragen, bewegen sich gegen Rot, also gegen größere Wellenlängen. Bei einer Temperatur von  $6000^{\circ}\text{C}$  liegt die größte Energie um die Farbe blau. Bei  $3000^{\circ}\text{C}$  dagegen liegt sie in ausgeprägter Weise dem roten Ende näher. Die Energie in jedem Teil des Spektrums hängt von zwei Faktoren ab, nämlich von der Wellenlänge und der Temperatur des strahlenden Körpers. Mathematisch ausgedrückt ist die Energie eine Funktion der Wellenlänge und der Temperatur.

Bis jetzt haben wir nur die Ergebnisse von Experimenten und Messungen beschrieben. Wie aber können wir diese Ergebnisse theoretisch erklären? Die Physiker des 19. Jahrhunderts glaubten, daß wir genug über die strahlende Materie und über die Strahlung selbst wüßten, um die theoretische Formel für die richtige Energieverteilung abzuleiten. Und sie konnten eine Formel ableiten, aber die Formel war falsch. Alle Ableitungen, alle theoretischen Schlüsse — und es gab ihrer viele — führten zu Ergebnissen, die dem Experiment widersprachen. Die Physiker konnten die ausgeprägten Maxima der experimentellen Kurven und die Verschiebung dieser Maxima zum roten Ende des Spektrums mit sinkender Temperatur nicht erklären.



Die Streifen des Spektrums, die verhältnismäßig den größten Energiebetrag mit sich tragen, bewegen sich mit sinkender Temperatur gegen die roten Teile des Spektrums.

Aus dieser Schwierigkeit wurde die Quantentheorie geboren. Ihr Geburtstag war der 14. Dezember 1900, der Tag, an dem Max Planck über diesen Gegenstand in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin eine Vorlesung hielt. Er leitete die richtige Strahlungsformel ab — doch konnte er dies nur, indem er Annahmen einführte, die, vom Standpunkt der klassischen Physik aus gesehen, neu, seltsam und beunruhigend schienen. .

## Quanten

Im Leben und in der Wissenschaft haben wir es mit zwei Arten von Mengen zu tun: mit *kontinuierlichen* und *diskontinuierlichen*. Wenn man die Studentenzahl in einer Klasse anführt, benützt man nur ganze Zahlen; die Zahl der Studenten kann sich nur um ganze Zahlen ändern. Die Aussage „Heute hatte ich in meiner Klasse 25,68 Studenten“ ist sinnlos. Ihr erspartes Geld oder das von irgend jemand anderem ist auch eine diskontinuierliche Menge. Denn Ersparnisse können sich um die kleinste Geldeinheit ändern, aber nicht um einen Bruchteil davon. Wir können sagen, daß in den USA ein Cent das *elementare Geldquantum* ist. Sobald wir dieses Quantum einmal festgelegt haben, kann alles Geld in Amerika durch eine ganze Zahl ausgedrückt werden, die die Anzahl dieser Elementarquanten anzeigt. Wir können die Studentenzahl oder den Geldbetrag nicht um eine willkürliche Zahl verändern. Wir können sie nur um Quanten verändern. Ein Student ist das Elementarquantum im ersten Fall und ein Cent im zweiten. Diese Mengen (Studentenzahl und Geld) können sich nicht kontinuierlich ändern. Sie können sich nur diskontinuierlich ändern.

Wenn wir uns in einen Zug setzen, wählen wir die Station, wo wir unsere Reise beenden; die Wahlmöglichkeiten werden sich aber, wenn wir sie in Entfernungen von der Ausgangsstation ausdrücken, diskontinuierlich ändern. Im Automobil jedoch können wir fahren, wohin

wir wollen. Alle Punkte, die auf einer Landstraße im Automobil erreicht werden können, bilden ein Kontinuum. Wir können die Entfernungen bis zum Haltepunkt um beliebig kleine Einheiten verändern.

So haben wir im täglichen Leben kontinuierliche und diskontinuierliche Mengen. Wir fragen: welche sind die kontinuierlichen und welche die diskontinuierlichen Mengen? Die Frage ist sinnlos. Dieselbe Menge, die in einem Fall als kontinuierlich betrachtet wurde, kann in anderen als diskontinuierlich betrachtet werden. Oder vielleicht können wir besser so sagen: derselbe Begriff kann in der Beschreibung einiger Erscheinungen als kontinuierlich betrachtet werden und bei der Beschreibung anderer, verwickelterer Erscheinungen als diskontinuierlich. Das sollte nicht allzuviel Erstaunen hervorrufen. Wenn man den Sand der Wüste Sahara tonnenweise verkauft, kann man ihn als kontinuierlich betrachten; aber wenn man die Gestalt von zwei Sandkörnern unter dem Mikroskop vergleicht, kann man ihn kaum als kontinuierlich betrachten. Etwas Ähnliches geschieht in der Wissenschaft. Mengen, die in einem Fall als kontinuierlich betrachtet wurden, müssen wir in einem anderen Fall als diskontinuierlich betrachten. Es war die Quantentheorie, die uns gelehrt hat, gewisse Begriffe als diskontinuierlich zu betrachten, die früher als kontinuierlich galten.

Diskutieren wir nun den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Charakter der wichtigsten physikalischen Begriffe.

Die *Zeit* ist ein kontinuierlicher Begriff. Zeitspannen können sich um eine beliebig kleine Zahl ändern.

Der *Raum* ist kontinuierlich. Entfernungen können sich um eine beliebig kleine Zahl ändern.

Die *Energie* ist nach der klassischen Mechanik kontinuierlich. Sie kann um eine beliebig kleine Zahl zu- oder abnehmen.

Erinnern wir uns bei dieser Gelegenheit, daß die gewählte Energieeinheit das Erg ist: die Arbeit, die von einem Dyn auf dem Weg

von einem Zentimeter geleistet wird. Ein Dyn ist die Kraft, die ein Gramm pro Sekunde um einen Zentimeter in der Sekunde beschleunigt. Vielleicht genügt die Erinnerung — wobei wir die genannten technischen Einzelheiten beiseite lassen können —, daß ein Erg eine sehr kleine Energieeinheit ist, die sich für die Beschreibung der Arbeit von Ameisen und Fliegen gut eignet, weniger jedoch für die Beschreibung der von einem Pferd oder von dem Wasser eines Kraftwerkes geleisteten Arbeit. Damit meine ich, daß die Arbeit in solchen Fällen, in Erg ausgedrückt, den Gebrauch von allzu großen Zahlen erfordern würde.

So wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts Zeit, Raum und Energie als kontinuierlich betrachtet.

Wie steht es nun mit der *Masse*? Natürlich wurde die Masse in der klassischen Mechanik auch als kontinuierlich betrachtet. In der Alltagserfahrung, in unserem Haushalt, können wir uns beliebige Veränderungen in der Buttermenge auf unserem Tisch vorstellen. Dennoch liegt der große wissenschaftliche Fortschritt des 19. Jahrhunderts in der Erkenntnis der atomistischen Struktur der Materie; in der Erkenntnis, daß jedes Element aus Atomen besteht, daß ein Atom das Elementarquantum dieses Elementes ist. So hat zum Beispiel das Wasserstoffatom die Masse 0,0000000000000000000017 Gramm.

Dabei können wir die Masse von Wasserstoff nicht um einen Betrag verändern, der kleiner als die angegebene Zahl ist. Daher ist das Elementarquantum des Wasserstoffs klein, aber doch endlich. Das war eine große Entdeckung. Das Bild unterscheidet sich wesentlich von dem Newtonschen Bild, in dem die Masse als kontinuierlich betrachtet wurde.

Seit seiner frühen Jugend wurde Einstein durch das neue atomistische Bild, das sich im 19. Jahrhundert ergeben hatte, tief beeindruckt. Während wir den Aufbau der Materie aus Atomen besprechen,

ist es richtig, abzuschweifen und — wenn auch kurz — einen anderen Beitrag Einsteins zu erwähnen, der mit der Relativitätstheorie und Quantentheorie nichts zu tun hat. Ich meine Einsteins Arbeit, die 1905 in jenem siebzehnten Band der „*Annalen der Physik*“ erschien, in dem es drei Arbeiten Einsteins gibt: die eine über die Relativitätstheorie, die zweite über den photoelektrischen Effekt, zu der wir bald zurückkehren werden, die dritte über die *Brownsche Bewegung*. Die letzte ist weniger wichtig als die zwei anderen. In dem Artikel über die Brownsche Bewegung sah Einstein sich nach Erscheinungen um, die den Aufbau der Materie aus Atomen hinreichend klar aufzeigen würden, um selbst den größten Zweifler zu überzeugen. So sah er die Erscheinung der Brownschen Bewegung voraus und beschrieb sie. Dies ist eine Erscheinung, die auftreten muß, wenn die Materie eine körnige Struktur hat. Einstein wußte nicht, daß eine derartige Erscheinung schon seit achtzig Jahren bekannt gewesen ist. Er gab also die Theorie der Brownschen Bewegung, ohne zu wissen, daß die Brownsche Bewegung bereits beobachtet worden war.

Im Jahre 1827 bemerkte Brown, daß Körnchen von Pflanzen, organische und anorganische Teilchen, wie auch jeder andere Stoff, der so fein pulverisiert ist, daß die Länge jedes Teilchens nur ungefähr ein Zehntausendstel Zentimeter beträgt, hin und her bewegt erscheinen, wenn sie in Wasser getan und mit einem Mikroskop betrachtet werden. Diese Teilchen oder, wie sie genannt werden, die *Brownschen Teilchen*, bewegen sich beständig, wobei sie auf phantastisch gebrochenen Wegen laufen. Sie machen niemals halt; ihre Bewegung endet nie.

Einstein sah voraus, daß infolge des Aufbaus der Materie aus Atomen eine solche Erscheinung auftreten muß. Das Wasser, so wie jedes andere Medium, in das diese Teilchen getan werden, besteht aus Elementarquanten der Materie in beständiger Bewegung, die dabei die Brownschen Teilchen herumstoßen. Die Brownsche Bewegung stellt sozusagen eine Vergrößerung der Ruhelosigkeit der kleinen Wasserteilchen dar. Die Bewegung, die wir durch das Mikroskop

sehen, ist die Folge der Körnchenstruktur des Wassers und der beständigen Beschießung der Brownschen Teilchen durch die Wasserteilchen. Tatsächlich gestattet uns das Studium der Brownschen Bewegung und die Kenntnis ihrer von Einstein entwickelten Theorie die Berechnung der Masse der beschießenden Teilchen. Vorhin habe ich die Masse des Wasserstoffatoms erwähnt. Die Experimente mit der Brownschen Bewegung und die von Einstein formulierte Theorie haben uns zu diesem Wert geführt.

Ich erwähne hier nur kurz die Geschichte der Brownschen Bewegung und ihre Theorie, wie sie in Einsteins schöner Arbeit formuliert worden ist. Mein Ziel ist es, Einsteins Einfluß auf unsere moderne Zivilisation darzustellen, und in diesem Zusammenhang ist die Geschichte der Brownschen Bewegung nicht sehr bedeutungsvoll. Unabhängig von Einstein, aber beinahe zur gleichen Zeit, formulierte der große polnische Wissenschaftler Smoluchowski, mein Professor in Krakau, die Theorie der Brownschen Bewegung. Er wendete einen großen Teil seines kurzen Lebens an das Studium des Aufbaus der Materie aus Atomen.

Das Wesentliche an dieser Geschichte aber ist, daß Einstein außer von den allgemeinen, fast philosophischen Problemen, die zur Relativitätstheorie und zu Theorien über die Struktur unseres Weltalls führten, sich auch von den Fragen des Aufbaus der Materie aus Atomen hinreißen ließ. Obwohl, wie wir gesehen haben, Einsteins Arbeiten über sehr verschiedene Gegenstände innerhalb desselben Jahres erschienen, ist es doch jedem Wissenschaftler klar, daß sie das Ergebnis von langen Jahren der Arbeit und des Denkens waren.

Um mit dem diskontinuierlichen Aufbau der Materie zu einem Ende zu kommen, wollen wir einfach feststellen, daß am Ende des 19. Jahrhunderts die Atomtheorien von den Wissenschaftlern allgemein angenommen wurden.

Ist die Elektrizität kontinuierlich oder diskontinuierlich? Wie die Masse wurde die Elektrizität in der Frühzeit der Wissenschaft als kontinuierlich betrachtet. Aber auch hier zwang uns eine Entdeckung, die des Elektrons, gegen Ende des 19. Jahrhunderts zu einer Revision unserer Vorstellungen. Die Elektronen sind die kleinsten Quanten der negativen Elektrizität. Leider haben wir für die positive Elektrizität zwei Arten von Elementarquanten, nämlich die schweren Protonen und die leichten Positronen. Diese Elektrizitätsquanten sind gleichzeitig die Bausteine, aus denen sich die Atome zusammensetzen. Im 20. Jahrhundert entdeckten wir, daß das Atom kein Elementarquantum der Materie, sondern aus elementaren Bausteinen aufgebaut ist: Elektronen, Protonen, Positronen, Neutronen, Mesonen. Die Geschichte, wie diese Atome aus solchen Bausteinen zusammengesetzt sind, ist im wesentlichen die Geschichte der Quantentheorie.

Wir haben vorhin drei Mengen erwähnt, die in der klassischen Physik als kontinuierlich betrachtet wurden: Zeit, Raum, Energie. Die Quantentheorie, die später zur Theorie des Baus der Atome wurde, begann mit Plancks Entdeckung. Wir können jetzt die große Leistung Plancks ausdrücken: er nahm die Energie aus der Klasse der kontinuierlichen Begriffe heraus und versetzte sie in die Klasse der diskontinuierlichen Begriffe.

Die Energie hat, wie die Masse und die Elektrizität, eine körnige Struktur!

Wir erinnern uns, daß Plancks Ziel die Auffindung des richtigen Strahlungsgesetzes war und daß alle klassischen Annahmen unweigerlich zum falschen Gesetz führten. Indem Planck annahm, daß Energie nur in Quanten abgegeben oder aufgenommen werden kann, leitete er das richtige Strahlungsgesetz ab, das dann auch durch das Experiment in großartiger Weise bestätigt wurde. Dieser Erfolg war der Anfang der Quantentheorie. Später wurden die Erscheinungen, die die Körnchenstruktur der Energie bestätigten, so zahlreich, daß die Quantentheorie zum Alltagswerkzeug eines jeden Physikers wurde.

Wir fragen jetzt: Was ist das Elementarquantum der Energie? Die Beantwortung der Frage ist nicht einfach. In den USA ist das Elementarquantum des Geldes ein Cent. Die Behauptung, daß ich ein Hundertstel von einem Cent in der Bank habe, ist unsinnig. In Griechenland aber ist das Elementarquantum die Drachme, die gegenwärtig ein Hundertstel von einem Cent wert ist. So kann ein Grieche sagen, daß er ein Zehntausendstel von einem Dollar besitzt, wenn er eine Drachme gespart hat.

Haben Sie jemals die Geschichte „The Bottle Imp“ von Robert Louis Stevenson gelesen? Ein Mann kauft eine Flasche, um das Leben seiner Frau zu retten. Er kann damit Wunder tun, aber wenn er sie zur Zeit seines Todes noch besitzt, wird seine Seele dem Teufel gehören. So muß er sein Wunder schnell tun und dann die Flasche verkaufen. Er muß sie aber um einen geringeren Preis als den Kaufpreis abgeben. Das sind die Spielregeln; wenn er sie verletzt, wird die Flasche ihn verfolgen. Die ganze Geschichte beruht auf der Tatsache, daß es ein Elementarquantum des Geldes gibt. Die Geschichte wäre sinnlos, wenn das Geld eine kontinuierliche Menge bilden würde. Der arme Mann, der das Leben seiner kranken Frau retten will, kauft die Flasche um einen Farthing (die kleinste englische Münzeinheit) und verkauft dadurch seine Seele dem Teufel. Er vertraut seine Sorgen seiner gebildeten Frau an, die eine Lösung findet. Sie übersiedeln nach einer französischen Insel, wo fünf französische Centimes einem Farthing gleichwertig sind, und sie werden die Flasche los. Da Stevenson in einer stabilen Welt lebte, endet die Geschichte damit.

Ähnlich gibt es im Fall der Energie nicht bloß *ein* Energiequantum, sondern viele Energiequanten. Die Sonne, sowie jeder andere Körper, emittiert oder absorbiert Strahlung. Dies geschieht allerdings in Quanten — aber die Größe des Quantums wird von der Wellenlänge der emittierten oder absorbierten Strahlung abhängen. Je kürzer die Wellenlänge, desto größer das Quantum. So emittiert oder absorbiert Materie violette Strahlung in Portionen — also in

Quanten —, die etwa doppelt so groß sind als die Quanten für rote Strahlung. Die Energiequanten der Röntgenstrahlen (kleine Wellenlänge) sind größer als die des sichtbaren Spektrums. Wenn wir also die Größe des Quantums zum Beispiel für das rote Ende des Spektrums bestimmen, so werden wir wissen, wie groß — oder vielmehr wie klein — das Quantum für irgendeine andere Strahlung ist. Natürlich muß das Energiequantum auf jeden Fall sehr klein sein, denn sonst wäre die körnige Struktur der Strahlung nicht so lange verborgen geblieben. Ein Erg, eine sehr kleine Energieeinheit, enthält 400 000 Millionen Quanten roter Strahlung oder 200 000 Millionen Quanten violetter Strahlung. Die Quanten sind also wirklich sehr klein.

Wie findet man das Energiequantum, das der Strahlung einer bestimmten Wellenlänge entspricht? Hier ist die von Planck gegebene Anweisung: Dividiere die Lichtgeschwindigkeit (30 000 000 000 Zentimeter pro Sekunde) durch die in Zentimetern ausgedrückte Wellenlänge und multipliziere mit der Planckschen Konstante, die immer und überall mit  $h$  bezeichnet wird. Man erhält auf diese Weise das in Erg ausgedrückte Elementarquantum der Energie, das dieser bestimmten Strahlung entspricht. Wie groß ist  $h$ ? Die Antwort lautet:  $h = 0,00000000000000000000000655$ .

Das ist natürlich eine kleine Zahl, weil die Energiequanten klein sind. (Plancks Konstante  $h$  hat die „Dimension“ Erg mal Sekunde. Die Dimension weist uns an, wie wir den Zahlenwert von  $h$  ändern müssen, wenn wir die Einheiten der Energie und der Zeit ändern.)

Auf diese Weise wurde eine neue revolutionäre Idee in die Physik eingeführt und damit wurde ein Widerspruch zwischen der Theorie und dem Experiment aufgehoben. Die Idee war eine der fruchtbarsten Ideen in der ganzen Geschichte der Wissenschaft.

Bevor wir von hier wieder zu Einsteins Werk übergehen, möchte ich ein Wort über die philosophischen Konsequenzen der Entdeckung Plancks sagen. Wie immer in der Geschichte der Physik mußten wir unsere Grundannahmen verändern, weil wir den wach-

senden Reichtum unserer Erfahrungen berücksichtigen wollten. Eine lange Schlußkette führt von diesen Annahmen zu der richtigen Strahlungsformel. In der modernen Physik wird die Schlußkette, die von den Annahmen zu den Schlüssen führt, welche durch Beobachtungen bestätigt werden können, immer länger und länger. Wir sind beständig zur Veränderung unserer Annahmen gezwungen, wenn wir die Welt verstehen wollen, in der wir leben.

## Photonen

Den Gedanken Plancks mangelte es an Entschiedenheit. Sie waren der Beginn einer Bewegung. Einstein gab der Bewegung einen neuen Anstoß, weil er den Mut und die Unabhängigkeit besaß, neue und weitreichende Schlüsse zu ziehen.

Wir erkennen in Einsteins Arbeit über die Quantentheorie das gleiche charakteristische Merkmal wie zuvor: Originalität. Umwälzungen werden durch Menschen mit Phantasie durchgeführt, die die Fehler in der alten Ordnung klar sehen und den Mut haben, mit der Tradition zu brechen, durch Menschen, denen es weit mehr auf das Verstehen ankommt als auf das Wissen. Plancks Theorie war Einstein bekannt; obwohl er ihre Bedeutung erkannte, war er sich dessen bewußt, daß sie eine Art Behelf war, um eine bestimmte Formel zu erhalten: die Abhängigkeit der Strahlungsenergie von der Wellenlänge und der Temperatur. Dies leistete sie in großartiger Weise.

Die Wellentheorie des Lichtes befaßt sich mit der Strahlung. In ihrer Urform befaßt sich die Quantentheorie Plancks mit Emissionen und Absorptionen. Stellen wir uns vor, daß Strahlung mit einer bestimmten Wellenlänge auf einen Körper fällt, der sie absorbiert; diese Absorption erfolgt in Quanten. Der Körper verschluckt Brocken solcher Strahlung; jeder davon hat eine bestimmte Größe. Was nun Einstein leistete, war eine grundlegende Veränderung der Vorstellung

von der Strahlung selbst. Verwerfen wir wenigstens für den Augenblick die Wellentheorie des Lichtes. Nehmen wir mit Einstein an, daß das Licht selbst eine körnige Struktur besitzt, daß es aus Körnern, aus Geschossen, aus Quanten besteht, die mit der Geschwindigkeit des Lichtes durch den Raum eilen. Wie ähnlich ist dieses Bild dem der Korpuskulartheorie Newtons! In einem gewissen Sinn hat Einstein die Korpuskulartheorie Newtons wiederbelebt, obgleich seine Begriffe jetzt eine Tiefe besitzen, die sie zur Zeit Newtons nicht hätten erreichen können. Die ursprüngliche primitive Form der Theorie Newtons ändert sich, ihr Bereich wird vertieft. Doch sind die Wesenszüge sehr ähnlich. Die Körner der Lichtenergie, die sogenannten *Photonen*, ersetzen die Korpuskeln Newtons. So besteht Licht nach Einstein aus einem Schauer von Photonen und das Photon ist das Elementarquantum der Energie.

Doch wirft Einstein die Wellentheorie des Lichtes nicht über Bord, während er die Theorie Newtons wiederbelebt. Die Erscheinung der Beugung und die Erfolge der Wellentheorie des Lichtes sind allzu bedeutsam, um ihm dies zu gestatten. Einstein wiederbelebt nicht nur die Newtonsche Theorie, sondern er baut auch eine Brücke zwischen den Theorien von Huygens und Newton. Es ist, als ob Einstein die zwei alten Feinde versöhnen würde, indem er sie von einer höheren Ebene des Verständnisses auf die Erscheinungen blicken läßt.

Diese Periode der Arbeit Einsteins über die Quantentheorie der Strahlung ist revolutionär, aber gleichzeitig versöhnlich. Darin liegt kein Widerspruch. Seine Theorie des Lichtes versöhnt die Auffassungen von Huygens und Newton, doch wird diese Versöhnung durch die Einführung neuer und revolutionärer Ideen vollbracht.

Einstein sagt im wesentlichen, daß wir einige Erscheinungen des Lichtes erfolgreich in der Wellenterminologie beschreiben können, daß wir aber einige andere Erscheinungen erfolgreich in der korpuskularen oder Photonenterminologie beschreiben können. Man kann gewisse Sätze aus der einen Terminologie in die andere übersetzen,

genau wie man ein Buch aus einer Sprache in eine andere übersetzen kann. Hier folgen einige Beispiele:

*Terminologie der Wellentheorie*

1. Das sichtbare Spektrum enthält Wellen von verschiedenen Längen.
2. Die Wellenlänge am roten Ende des Spektrums ist etwa zweimal so groß wie die Wellenlänge am violetten Ende.
3. Einheitliche Strahlung hat eine bestimmte Wellenlänge.

*Terminologie der Quantentheorie*

1. Das sichtbare Spektrum enthält Photonen verschiedener Energie.
2. Die Photonenenergie ist am roten Ende des Spektrums etwa halb so groß wie am violetten Ende.
3. Einheitliche Strahlung besteht aus Photonen bestimmter und gleicher Energie.

Auf der linken Seite unseres Miniaturwörterbuches haben wir das Wort „Wellenlänge“; die Wellenlänge wird in Zentimetern gemessen. Auf der rechten Seite haben wir das Wort „Photonenenergie“; die Photonenenergie wird in Erg gemessen. Das Wesenselement der Theorie Einsteins ist nicht nur das neue korpuskulare oder vielmehr Photonenbild, sondern auch die Brücke, der Übergang von dem Begriff der Wellenlänge zu dem der Photonenenergie. Zu jeder Wellenlänge gibt es eine entsprechende Photonenenergie, zu jeder Photonenenergie eine entsprechende Wellenlänge. Die Formel für diesen Übergang ist die gleiche wie die, die vorher von Planck gegeben worden ist. Aber Einstein wendet sie jetzt auf Photonen an. Sie ist selbst heute noch immer die grundlegendste und wichtigste Formel der Quantentheorie: die Lichtgeschwindigkeit, dividiert durch die Wellenlänge und multipliziert mit der Planckschen Konstanten ergibt die Energie des entsprechenden Photons. Diese Formel ist die Brücke zwischen der Wellentheorie und der Quantentheorie der Strahlung.

Überblicken wir rasch den Bereich der Strahlung und lassen wir

die Wellentheorie beiseite. Betrachten wir die Strahlung als einen Schauer von Photonen. Die Radiowellen bestehen aus Photonen sehr kleiner Energie; in der Sprache der Wellentheorie: ihre Wellenlänge ist verhältnismäßig groß. Sie können mit Baumwoll- oder Wollkugeln verglichen werden. Dann gibt es das sichtbare Spektrum. Seine Photonen gleichen Revolverkugeln. Die Photonen der ultravioletten Strahlung sind wie Gewehrkerne. Schließlich sind die Röntgenstrahlen wie eine Garbe von Granaten aus schweren Geschützen.

Wodurch ist dieses neue korpuskulare Bild gerechtfertigt? Gibt es irgendwelche Erfahrungstatsachen, die zwar durch die Einsteinsche Theorie der Strahlung, aber nicht durch die Wellentheorie erklärt werden können? Es gibt sie! Hier werden wir uns nur mit der einfachen Erscheinung befassen, die als *photoelektrischer Effekt* bekannt ist.

Stellen wir uns eine Mauer entlang der Meeresküste vor. Eine Welle schlägt gegen die Mauer, wäscht einen Teil ihrer Oberfläche weg, zieht sich zurück; eine neue Welle nähert sich. Die Masse der Mauer nimmt ab, und wir dürfen die Frage stellen, welcher Teil der Mauer zum Beispiel in einem Jahr weggewaschen wird. Aber verändern wir das Bild und stellen wir uns vor, daß jemand die Mauer beschießt und daß Bruchstücke der Mauer abfallen, wenn eine Kugel die Mauer trifft. Wiederum nimmt die Masse der Mauer ab, und wir können uns gut vorstellen, daß zum Beispiel in einem Jahr dieselbe Verminderung der Masse durch die Beschießung wie durch die aufprallenden Wellen erreicht wird. Dennoch können wir nach dem Aussehen der Mauer leicht feststellen, durch welchen der beiden Vorgänge die Masse der Mauer vermindert wurde: ob durch Meereswellen oder durch Kugelregen. Es wird vorteilhaft sein, diese beiden verschiedenen Bilder im Gedächtnis zu behalten, während wir den photoelektrischen Effekt besprechen.

Der photoelektrische Effekt kann entweder in der Sprache der Wellentheorie oder in der Sprache der Photonen beschrieben werden. Welche ist zweckmäßiger? Welche führt zu Ergebnissen, die mit dem

Experiment im Einklang stehen? Wir werden es mit beiden versuchen und dann sehen. Beginnen wir mit der Wellensprache.

Eine Lichtquelle bestimmter Länge, zum Beispiel ultraviolettes Licht, fällt auf die Oberfläche eines Metalls. Das Experiment belehrt uns, daß Elektronen, also die Elementarquanten der Elektrizität (und zugleich die Bausteine der Materie) aus der Metallplatte herausgerissen werden; die Strahlungsenergie wird teilweise in Bewegungsenergie der ausgestoßenen Elektronen verwandelt. Das ist der photoelektrische Effekt: Lichtwellen stoßen Elektronen aus einer Metallplatte aus.

Nehmen wir einen Physiker an, der zwar nicht die Plancksche Quantentheorie oder die Einsteinsche Photonentheorie, wohl aber die Wellentheorie des Lichtes kennt. Wir stellen ihm einige Fragen:

*Frage:* „Glaubst du, daß alle Elektronen die gleiche Energie, das heißt die gleiche Geschwindigkeit haben, wenn sie die Metallplatte verlassen?“

*Antwort:* „Ich weiß es nicht, aber ich sehe nicht ein, warum dies so sein sollte. Ich weiß nur, daß die Energie der ausgestoßenen Elektronen die Energie der auftreffenden Strahlung nicht übertreffen kann. Das weiß ich, weil ich an das Gesetz der Erhaltung der Energie glaube.“

*Frage:* „Was wird geschehen, wenn ich mehr Strahlung verwende, wenn ich die Intensität der auftreffenden Welle vergrößere? Wird sich die Geschwindigkeit der ausgestoßenen Elektronen verändern?“

*Antwort:* „Wohl möglich. Mehr Energie trifft auf, deshalb kann mehr Energie herauskommen. Entweder werden mehr Elektronen ausgestoßen werden oder ihre Geschwindigkeiten werden zunehmen.“

*Frage:* „Wird der photoelektrische Effekt auftreten, wenn ich violettes statt ultraviolettes Licht verwende?“

*Antwort:* „Ich glaube, ja. Warum nicht? Wenn die gleiche Energie auftrifft, sollte die gleiche Energie in einer oder der anderen Form herauskommen.“

Wir sehen, daß die Antworten unklar und unbestimmt sind, und wie wir später feststellen werden, sogar falsch. Verändern wir nun das

Bild. Einsteins Theorie der Photonen wird jetzt unser Führer sein und wir werden die gleichen Fragen nochmals stellen:

*Frage:* „Glaubst du, daß alle Elektronen die gleiche Energie, das heißt die gleiche Geschwindigkeit haben, wenn sie die Metallplatte verlassen?“

*Antwort:* „Ganz bestimmt. Wir beschießen die Metallplatte mit identischen Kugeln; ein glücklicher Treffer stößt ein Elektron aus und verwandelt die Energie einer Photonenkugel in die Bewegungsenergie einer Elektronenkugel. Da alle Photonenkugeln die gleiche Energie haben, müssen auch alle Elektronenkugeln die gleiche Energie und daher die gleiche Geschwindigkeit haben.“

*Frage:* „Was wird geschehen, wenn ich mehr Strahlung verwende, wenn ich die Intensität der auftreffenden Welle vergrößere? Wird sich die Geschwindigkeit der ausgestoßenen Elektronen verändern?“

*Antwort:* „Du wirst die Zahl der glücklichen Treffer vergrößern, daher werden mehr Elektronen austreten, aber ein jedes von ihnen wird die gleiche Energie, das heißt die gleiche Geschwindigkeit haben.“

*Frage:* „Wird der photoelektrische Effekt auftreten, wenn ich violettes statt ultraviolettes Licht verwende?“

*Antwort:* „Das bedeutet, daß du jetzt die Metallplatte mit kleineren Kugeln beschießen wirst. Wiederum wird jeder Treffer ein Elektron herausreißen, aber jedes Elektron wird eine kleinere Energie haben, weil das beschießende Photon eine kleinere Energie hatte. Wird hingegen das ultraviolette Licht durch Röntgenstrahlen ersetzt, dann wird jedes Elektron eine größere Geschwindigkeit bekommen.“

Wir sehen, daß nach Einsteins Korpuskulartheorie auf jede dieser Fragen bestimmte Antworten gegeben werden können. Was hat das Experiment ausgesagt? Es hat alle Antworten großartig bestätigt. Die Photonentheorie Einsteins hat in der Wissenschaft festen Fuß gefaßt.

Das Experiment bestätigte nicht nur die Theorie Einsteins, sondern es gestattete auch die genaue Messung der Planckschen Konstante  $h$ , die für die Quantentheorie so wichtig ist. Dies geschah 1915,

zehn Jahre nach dem Erscheinen jener Abhandlung Einsteins. Die Durchführung einer solchen Messung ist nicht leicht, aber es ist leicht, die zugrundeliegende Idee zu erklären. Nach der Theorie Einsteins ist die Energie des ausgestoßenen Elektrons durch die Energie des Photons bestimmt. Die Energie des Elektrons und infolgedessen auch die Energie des Photons kann gemessen werden. Aber die Energie des Photons ist gleich der Planckschen Konstante, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit und dividiert durch die Wellenlänge. Die Wellenlänge kann durch die Beugungserscheinungen gemessen werden, so daß die Plancksche Konstante als einzige Unbekannte bleibt. Auf diese Weise bestimmte Millikan diese Konstante und erhielt für diese schöne Experimentalarbeit den Nobelpreis, zwei Jahre nachdem Einstein diesen Preis für die Theorie des photoelektrischen Effekts erhalten hatte.

Die Geschichte der Beiträge Einsteins zur Quantentheorie entbehrt nicht ironischer Verwicklungen. Einstein ist in seiner Arbeit über die Relativitätstheorie stark durch die Feldtheorie beeinflusst, und zwar im besonderen durch die Feldtheorie Maxwells, die die optischen und elektromagnetischen Erscheinungen beherrscht. Er glaubte und glaubt noch immer, daß die Feldauffassung vielleicht die größte wissenschaftliche Leistung des Menschen ist. Mehr als einmal sagte mir Einstein, daß er Maxwells Leistung um vieles höher einschätzte als seine eigene. Ich bin sicher, daß die Geschichte Einsteins Selbsteinschätzung als zu bescheiden beurteilen wird. Es erscheint nun seltsam, daß er einerseits die Feldtheorie bewunderte und seine Gedanken über die Relativität darauf aufbaute und andererseits sein Möglichstes getan zu haben scheint, diese Feldauffassung in seiner Theorie des photoelektrischen Effekts zu zerstören. Aber einen solchen Schluß zu ziehen, wäre ärger als eine übergroße Vereinfachung — es wäre geradezu eine Fälschung.

Die hauptsächlichen Meilensteine in der Lichttheorie waren:

1. Die Wellen- und die korpuskularen Theorien des Lichtes (*Huygens und Newton*).

2. Die Beugungserscheinungen und der Sieg der Wellentheorie (*Fresnel, Young*).

3. Die elektromagnetische Theorie des Lichtes (*Maxwell*).

4. Die Quantentheorie der Strahlung (*Einstein*).

Kann die moderne Physik die Wellentheorie verwerfen und bloß die Quantentheorie der Strahlung annehmen? Offensichtlich nicht. Wir könnten dann den photoelektrischen Effekt erklären, aber nicht die Beugung des Lichtes. Wir könnten nicht das Erscheinen abwechselnd heller und dunkler Muster erklären, wenn das Licht durch kleine Öffnungen hindurchtritt und durch kleine Hindernisse abgelenkt wird. Das scheint ein kritischer Zustand zu sein. Wir haben zwei Theorien — die der Wellen und die der Photonen —, von denen jede gewisse Tatsachen erklärt. Das Phänomen der Beugung scheint der Photonentheorie zu widersprechen. Der photoelektrische Effekt scheint der Wellentheorie zu widersprechen. Was ist der Ausweg aus diesem Dilemma? Was ist das Licht wirklich? Ist es ein Schauer von Photonen oder besteht es aus Ätherwellen?

Dies sind neue und tiefeschürfende Fragen. Sie wurden durch Einsteins große Entdeckung veranlaßt und führen mitten in die Quantentheorie, in das Problem ihrer statistischen Natur, in die Frage von Determinismus und Indeterminismus. Eine umfangreiche Literatur ist gerade um diese Fragen entstanden, die sowohl wissenschaftlich als auch philosophisch bedeutsam sind. Verschiedene Ansichten sind ausgesprochen worden. Ihre Klärung ist nur möglich, wenn man tief in die ganze Begriffsstruktur der Quantentheorie eindringt.

Wir sind versucht, zu behaupten, daß Licht entweder eine Welle oder ein Schauer von Photonen sein kann. Aber die Frage „Was ist das Licht wirklich?“ ist sinnlos. Ihr scheinbarer Sinn beruht auf dem jetzt zerstörten Glauben, daß ein einziges Bild, eine einzige Theorie zur Erklärung aller Erscheinungen ausreicht. Vorläufig zumindest müssen wir aber zwei Bilder verwenden: das korpuskulare und das Wellenbild.

Es besteht kein Grund, darüber zu erschrecken. Wir können uns

auch im gewöhnlichen Leben eine Situation vorstellen, in der die Verwendung zweier verschiedener Theorien für die Beschreibung ein und derselben „Realität“ angezeigt ist.

Stellen wir uns einen Mann vor, der abwechselnd vollständig blind oder vollständig taub wird, aber niemals beides zur gleichen Zeit. Er wird regelmäßig ins Kino geführt. Er sieht zur Zeit seiner Taubheit Stummfilme; zur Zeit seiner Blindheit mag er denken, daß er Grammophonplatten hört. Er kann die Welt seiner Sinnesempfindungen folgerichtig durch zwei völlig verschiedene Mechanismen erklären, die er vielleicht eines Tages zu einem Bild vereinigen kann. Dann wird er erkennen, daß der Grund für dieses Bestehen zweier verschiedener Eindrücke in seinen eigenen Beschränkungen liegt, in der Tatsache, daß er nur entweder den Gesichts- oder den Gehörsinn zu seiner Verfügung hat.

Die Entdeckung Einsteins beeinflusste die weitere Entwicklung der Quantentheorie. In Bohrs Atommodell springt ein Elektron von einem Zustand in einen anderen über und sendet bei jedem Sprung ein Photon aus. Diese Vorstellung, die Einsteins Photonentheorie benützt, liegt heute, zusammen mit anderen gänzlich neuen und höchst wichtigen Gedanken, der Quantentheorie zu Grunde. Später wurden De Broglies Arbeiten durch die Einsteins inspiriert und beeinflusst. Wenn Licht einen korpuskularen und einen Wellenaspekt zeigt, gilt dann nicht das gleiche für einen Schauer von Elektronen? Hier kennen wir den korpuskularen Aspekt, aber wir sollten uns um Erscheinungen umsehen, in denen die Materie ihren Wellenaspekt verrät, wenn wir Einsteins Argument folgen. Diese Idee führte zur Vorhersage und Entdeckung der Beugung der Materiewellen. Nicht nur war De Broglies Arbeit durch diejenige Einsteins angeregt, sondern noch mehr: Einstein war der erste, der die Bedeutung und Frische der Ideen De Broglies erkannte. Schrödingers Werk ist logisch mit dem De Broglies verbunden, wie der Ausdruck „Wellenmechanik“ zeigt.

Aber Schrödingers Werk paßt nur in den Rahmen der klassischen Mechanik. Nach der Speziellen Relativitätstheorie muß jedes physikalische Gesetz in einen beliebigen Trägheitsrahmen eingepaßt werden können und alle diese Rahmen sind durch die Lorentz-Transformation miteinander verbunden. In der Fachsprache ausgedrückt, dürfen die Gesetze der Physik nicht in bezug auf die Galilei-Transformation, sondern müssen in bezug auf die Lorentz-Transformation invariant sein. Schrödingers Wellenmechanik war aber in bezug auf die Lorentz-Transformation nicht invariant. Tiefere Einsicht wurde durch Dirac gewonnen, der die Quanten- und die Relativitätstheorie versöhnte, wobei er gleichzeitig eine bessere Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment herbeiführte. Seine Theorie führte zu der Entdeckung neuer Bausteine der Materie: der Positronen mit einer Masse gleich der Elektronenmasse und mit einer Ladung von entgegengesetztem Vorzeichen. Das Positron ist das legitime Kind, das der Ehe zwischen der Quanten- und der Relativitätstheorie entsprossen ist.

Während ich diese Seiten schreibe, staune ich selbst über den großen Einfluß, den Einsteins Werk auf die Quantentheorie ausgeübt hat. Die Quellen dieses Einflusses sind einerseits die Korpuskulartheorie Einsteins, andererseits seine Relativitätstheorie. Und doch habe ich viele der Beiträge Einsteins zur Quantentheorie ausgelassen, wie die Einstein-Bose-Statistik, die Quantentheorie der spezifischen Wärme und andere. Wer immer die gegenwärtige Entwicklung der Quantentheorie verfolgt, weiß, daß dieser Einfluß bei weitem nicht erschöpft ist. Er wächst noch immer.

Vom Standpunkt Einsteins sind allerdings durch viele Quantenphysiker die Grenzen überschritten worden. Um Einsteins Haltung zu verstehen, müssen wir sein Werk und seine wissenschaftliche Tendenz richtig sehen. Wenn wir auf Einsteins Werk blicken, so sehen wir darin das Bestreben, eine allgemeine Theorie aus wenigen Grundsätzen aufzubauen. Das ist in der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie deutlich, wo der logische Aufbau einfach ist und die Annahmen klar

und ausdrücklich ausgesprochen werden können. Sobald einmal diese Theorien aufgebaut waren, war wenig an ihnen zu ändern. Einsteins Arbeiten über die Relativität sind auch heute nicht veraltet.

Die Lage in der Quantentheorie ist anders. Hier kennen wir eine enorme Vielzahl von Tatsachen. Die Experimentalphysik ist heute der Theorie vorausgeeilt. Besonders auf dem Gebiet der Erscheinungen des Atomkerns haben wir heute nicht eine einheitliche Theorie, sondern eher ein Flickwerk von vielen, teilweise einander widersprechenden Bildern. Wir suchen noch immer nach einem allgemeinen theoretischen Rahmen, in den wir alle bekannten Tatsachen hineinpassen können. Wir schrecken nicht davor zurück, schnell neue Annahmen zu machen und Theorien zu formulieren, die dann schneller als Blumen sterben. Einstein glaubt, daß die moderne Entwicklung in der Quantentheorie nur eine zeitweilige ist und daß sie durch eine anders aufgebaute Theorie ersetzt werden wird; er hält die große Umwälzung für unvollendet.

Ich habe einmal Einstein gefragt: „Warum sind Sie von der Quantentheorie so unbefriedigt, besonders von der Entwicklung, die doch aus Ihrem eigenen Werk ihren Ursprung genommen hat?“ Einstein sagte: „Ja, vielleicht habe ich sie begonnen, aber ich habe diese Ideen immer als temporär betrachtet. Ich dachte niemals, daß andere sie so viel ernster nehmen würden als ich selbst.“

Einstein mißfällt die statistische Natur der Quantentheorie, die Annahme, daß die Quantentheorie sich mit Gesetzen befaßt, die sich auf Gesamtheiten und nicht auf Individuen beziehen. Dieser statistische Charakter der modernen Quantentheorie wird von vielen anderen Physikern als wesentlich betrachtet und es kommt ihnen sehr unwahrscheinlich vor, daß sich in Zukunft etwas daran ändern werde. Jedenfalls zweifelt aber kein Physiker daran, daß auf viele Jahre hinaus der Historiker der Wissenschaft keine Schwierigkeit finden wird, in der dramatischen Entwicklung der Quantentheorie den Stempel von Einsteins Genie zu erkennen.

## Jenseits der Umwälzungen?

### Die Suche nach der Einheit

Wir haben gesehen, wie die Relativitätstheorie — im wesentlichen das Werk *eines* Mannes — unsere Begriffe von Raum, Zeit, Masse, Energie, Gravitation und der Weltgeometrie verändert hat. Die Quantentheorie hingegen ist das Werk vieler Männer, unter denen Einstein einer der hervorragendsten ist; seine Beiträge, besonders seine Theorie der Photonen, sind vom Fortschritt der Zeit nicht überholt worden.

Ich habe einige der Ideen Einsteins in einfachen Worten zu erklären versucht: diejenigen, die einfach erklärt werden können, und diejenigen, die mehr als andere die Wissenschaft unseres Jahrhunderts beeinflußt haben.

Man könnte sich vielleicht darüber wundern, daß wir Einsteins Werk nach dem Jahr 1921 nur selten erwähnt haben. Alle grundlegenden Gedanken Einsteins über die Relativitäts- und die Quantentheorie waren Früchte seiner früheren Jahre. Doch hat Einstein während seines ganzen Lebens gearbeitet, gedacht und wissenschaftliche Abhandlungen geschrieben. Er denkt ohne Unterlaß über die Probleme der Physik nach.

Wenn wir den Einfluß von Einsteins Werk auf unser modernes Denken betrachten, ermessen wir die Größe dieses Einflusses. Wenn wir aber alle Bemühungen Einsteins und seine ganze wissenschaftliche Produktion betrachten, finden wir überraschenderweise, daß nur ein

verhältnismäßig kleiner Teil dieser Arbeiten die Entwicklung der Wissenschaft beeinflusst hat. Wieviele Abhandlungen hat Einstein geschrieben! Scharfsinnige Abhandlungen, die Ergebnisse von Arbeit, Denken, Arbeit und wieder Arbeit sind! Dennoch würde er heute selbst einige von ihnen als veraltet, unrichtig oder künstlich betrachten. Als ich gerade dieses Problem mit Einstein besprach, sagte er: „Ein Mensch hat nur begrenzte Möglichkeiten.“

In der Tat hat Einstein während der letzten dreißig Jahre wiederholt tiefe und schwierige Probleme in Angriff genommen, Theorien aufgebaut und wieder aufgebaut, sie abgelehnt und neu begonnen. Zeitweilig war er von seinen Ergebnissen befriedigt, dann wieder verwarf er sie, wenn sie seinen hohen Maßstäben der logischen Einfachheit und Schönheit nicht gerecht wurden. Seine Zähigkeit, an einem Problem jahrelang festzuhalten und zu dem Problem wieder und wieder zurückzukehren, ist das kennzeichnende Merkmal von Einsteins Genie.

Von 1918 bis 1950 hat Einstein an einem der tiefsten und schwierigsten Probleme der Wissenschaft gearbeitet: an dem Problem, eine Theorie zu finden, die sowohl die Erscheinungen in der Welt des Großen umfaßt (so wie dies seine alte Gravitationstheorie leistete) als auch die Erscheinungen in der Welt des Kleinen (bezüglich der Elementarbausteine der Atome). Viele Wissenschaftler glaubten und glauben noch immer, daß ein so ehrgeiziges Vorhaben niemals verwirklicht werden kann, daß die für die Sonnen und die Nebel geltenden Gesetze sich von denen unterscheiden, die für die Elektronen im Atom gelten, und daß kein vereinheitlichendes Prinzip, das beide umfaßt, möglich ist oder jemals möglich sein wird.

1949 wurde Einstein siebenzig Jahre alt. Er glaubt, daß er in jenem Jahr die Lösung fand, um die er sich dreißig Jahre lang bemühte. Die Ergebnisse dieses letzten entscheidenden Schrittes sind in einer Neuauflage des Buches „*Die Bedeutung der Relativität*“ erschienen.

Hat Einstein das schwierige Problem gelöst, ein gemeinsames Gesetz für die Erscheinungen im Großen und im Kleinen zu finden?

Vermutlich wird es noch lange dauern, bis die mathematische Untersuchung und die experimentelle Beobachtung ihr Urteil sprechen — bis wir die in Einsteins neuen Gleichungen verborgenen Schätze finden. Daher weiß noch niemand, ob eine neue Umwälzung in der Wissenschaft vollzogen worden ist.

Um das Problem, an dem Einstein dreißig Jahre lang gearbeitet hat, wenigstens in großen Zügen zu verstehen, müssen wir nochmals in das 19. Jahrhundert zurückkehren: in die Zeit von James Clerk Maxwell, der als erster eine erfolgreiche Feldtheorie geschaffen hat. Wir erinnern uns, daß Radio- und optische Wellen von denselben Gesetzen beherrscht sind, die durch Maxwells Gleichungen ausgedrückt werden. Diese geben uns an, wie sich das elektromagnetische Feld in Raum und Zeit ändert, wie sich die elektromagnetischen Wellen verbreiten und was ihre physikalischen Eigenschaften sind. Die Theorie Maxwells ist eine Feldtheorie, weil sie die Veränderungen in der Zeit und in unserem dreidimensionalen Raum berücksichtigt. Sie unterscheidet sich stark von einer mechanischen Theorie, die sich mit Problemen wie der Bewegung des Mondes um die Erde befaßt. In einer mechanischen Theorie sind die Körper und ihre Bewegungen wichtig, in einer Feldtheorie sind es die Veränderungen des Feldes im Raume und in der Zeit.

Doch haben wir nicht nur die Feldbegriffe verwendet, als wir uns im 19. und zu Anfang des 20. Jahrhunderts mit den elektromagnetischen Erscheinungen befaßten. Die Elektronen, also negativ geladene Teilchen, erzeugen ein elektromagnetisches Feld, wenn sie sich bewegen. So finden wir in der Theorie Maxwells und später in der Lorentzschen Theorie noch immer eine Mischung der Feld- und Teilchenaspekte. Teilchen (Elektronen) bewegen sich in einem elektromagnetischen Feld und beeinflussen das Feld durch ihre Bewegung. Doch ist die Feldbetrachtungsweise das neue und vorwiegende Kennzeichen der Theorie Maxwells.

Das elektromagnetische Feld wird an jedem Punkt des Raumes durch zwei Pfeile oder Vektoren gekennzeichnet. Einer von ihnen stellt

das elektrische, der andere das magnetische Feld dar. Aber ein Pfeil kann durch seine drei Projektionen auf drei gegeneinander senkrechte Achsen beschrieben werden. (Ein Pfeil in einer Ebene wird durch zwei Projektionen, in einem dreidimensionalen Raum durch drei Projektionen gekennzeichnet.) Daher wird das Feld an jedem Punkt (erinnern wir uns, daß wir zwei Pfeile haben!) durch sechs Zahlen dargestellt, von denen drei das elektrische und drei andere das magnetische Feld bezeichnen. Diese Zahlen ändern sich von Punkt zu Punkt. Die beiden Pfeile, und daher auch die sechs Zahlen, ändern sich am gleichen Punkt von Augenblick zu Augenblick. Die Gleichungen Maxwells geben uns die Gesetze für diese Veränderung an. Oder: Das elektromagnetische Feld ist durch sechs Funktionen von Raum und Zeit gekennzeichnet. Die Maxwell'schen Gleichungen geben uns an, wie sich diese Funktionen mit Raum und Zeit ändern.

Erinnern wir uns auch, daß Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie für die Erscheinungen der Gravitation dasselbe leistete wie die Theorie Maxwells für die elektromagnetischen Erscheinungen. In Einsteins Theorie ist das Schwerfeld durch zehn Funktionen charakterisiert, die sich in Raum und Zeit ändern. Sie spielen eine Rolle, die der Rolle der sechs Funktionen in der Theorie Maxwells ähnlich ist. Die Gravitationsgleichungen Einsteins geben uns an, wie sich diese Funktionen in Raum und Zeit verändern.

In der elektromagnetischen Theorie haben wir eine Mischung von Feld- und Teilchenbegriffen. Das Feld wird durch die Elektronen und ihre Bewegung hervorgebracht. Ähnlich wird das Schwerfeld in der ursprünglichen Theorie Einsteins durch die Körper (Sterne und Nebel) und ihre Bewegung erzeugt. So haben wir beim Vergleich der Theorien von Maxwell und Einstein die folgenden Analogien:

elektromagnetisches Feld	——	Schwerfeld
geladene Körper	——	schwere Massen
Bewegung geladener Körper	——	Bewegung schwerer Massen.

Unsere Analogie ist unvollständig und in gewisser Beziehung sogar irreführend. Wir müssen jetzt noch ein Merkmal der Feldgleichungen Einsteins erwähnen. Das Schwerfeld wird nicht nur durch die bewegten schweren Massen, sondern auch durch das elektromagnetische Feld selbst beeinflusst. Daher liegen die Quellen eines Schwerfeldes in bewegten Massen, in bewegten Ladungen und im elektromagnetischen Feld. Ein reines Schwerfeld kann ohne ein elektromagnetisches Feld bestehen. Aber ein reines elektromagnetisches Feld kann nicht ohne ein Schwerfeld bestehen.

Stellen wir uns nun auf den Boden der Auffassungen des Jahres 1920, als die Struktur der Relativitätstheorie vollendet war. Ohne diese Theorie können wir das spätere Geschehen nicht begreifen. Wir bemerken einen Wesensunterschied zwischen dem Schwerfeld und dem elektromagnetischen Feld. Das Schwerfeld ist ein geometrisches Feld, das elektromagnetische Feld ist ein physikalisches Feld.

Das Verständnis des Schwerfeldes als eines geometrischen Feldes ist das Ergebnis eines der größten und revolutionärsten Gedanken, die jemals in die Physik eingetreten sind: die zehn Funktionen, die die Geometrie unserer vierdimensionalen Welt kennzeichnen, sind die gleichen zehn Funktionen, die das Schwerfeld kennzeichnen. Eine Welt ohne Massen, ohne Elektronen, ohne ein elektromagnetisches Feld ist eine leere Welt, ist flach. Aber wenn Massen erscheinen, wenn geladene Teilchen erscheinen, wenn ein elektromagnetisches Feld erscheint, dann erscheint auch ein Schwerfeld. Wenn das Schwerfeld erscheint, dann krümmt sich unsere Welt. Ihre Geometrie ist die Riemanns und nicht die Euklids.

So kennzeichnen die gleichen zehn Funktionen die Metrik und das Schwerfeld. Das Wort „Metrik“ zeigt die Verknüpfung zwischen diesen zehn Funktionen und der Geometrie unserer Welt an. Das Wort „Schwerfeld“ zeigt an, daß die gleichen zehn Funktionen die Erscheinungen der Gravitation in unserer Welt beschreiben. Die Tatsache, daß wir das eine dieser Worte oder auch beide

verwenden können, zeigt an, daß das physikalische Schwerefeld sein geometrisches Gegenstück hat. Was das Schwerefeld betrifft, spiegelt sich die Physik als Geometrie wieder. Die Geometrie unserer Welt und das Schwerefeld werden durch bewegte Massen, durch Ladungen und durch das elektromagnetische Feld gestaltet und geformt. So existiert die Verbindung

### Physik — Geometrie

nur für das Schwerefeld.

Hermann Weyl, einer der größten Mathematiker unserer Zeit, betrachtete diesen Unterschied zwischen Schwerefeldern und elektromagnetischen Feldern als künstlich. Die Allgemeine Relativitätstheorie behandelt diese beiden Felder in vollkommen verschiedener Weise. Das Schwerefeld ist auch ein geometrisches Feld. Es gibt sozusagen eine physikalische und eine geometrische Betrachtungsweise für das Schwerefeld, aber es gibt nur eine physikalische Betrachtungsweise für das elektromagnetische Feld.

So stellte um das Jahr 1920 die Allgemeine Relativitätstheorie eine merkwürdige Mischung von Geometrie und Physik dar. Um Einsteins spätere Bemühungen zu verstehen, müssen wir zuerst verstehen, warum er mit den Feldtheorien, wie sie damals bekannt waren, unzufrieden war. In den Maxwell'schen Gleichungen haben wir:

gegeben: Ladungen und ihre Bewegung,  
unbekannt: das elektromagnetische Feld.

In der Relativitätstheorie Einsteins haben wir

gegeben: Massen und ihre Bewegungen,  
unbekannt: das Schwere- oder metrische Feld.

Aus der vorliegenden Untersuchung ist klar ersichtlich, dass für die Determination des Bewegungsgesetzes der Gravitationsmassen durch das <sup>Feldgesetz</sup> Gravitationsgesetz zwei Grundannahmen erforderlich sind:

- 1) die Welt-Linienart der Feldgleichungen
- 2) Die Naturannahme der Feldgleichungen.

Zu 1) ist zu bemerken: es existieren 10 Gleichungen für die 6 Gravitationspotentiale  $g_{\alpha\beta}$  (wir sprechen hier nur von 6 Gravitationspotentiale, weil von den 10 Gravitationspotentialen wegen der freien Koordinatenwahl in allgemein relativistischen Feldgleichungen vier ohne Beschränkung der Allgemeinart weglassbar fortgesetzt werden können, sodass in Wahrheit nur 6 Komponenten für die Beschreibung des metrischen Feldes notwendig sind).

Aus Albert Einsteins Originalmanuskript „Ableitung des Bewegungsgesetzes punktförmiger Massen aus dem Feldgesetz der Gravitation im leeren Raum“

In der Relativitätstheorie bilden die gegebenen und die unbekanntenen Größen eine merkwürdige Mischung. Die Masse und die Energie haben kein geometrisches Gegenstück. Aber das Feld hat eines!

### Die zwei Sünden

Die Allgemeine Relativitätstheorie wurde aus Einsteins Unzufriedenheit mit der klassischen Theorie geboren. Die neue Theorie wurde aus seiner Unzufriedenheit mit der Allgemeinen Relativitätstheorie geboren. Ihr schwacher Punkt war die künstliche Mischung geometrischer und physikalischer Begriffe. Aber dies war nicht der einzige schwache Punkt. Ein anderer ist vielleicht noch wichtiger.

Sowohl die Theorien des Elektromagnetismus als auch die der Gravitation sind dualistische (zwiespältige) Theorien. In beiden Theorien haben wir Quellen des Feldes (Ladungen, Körper) und das Feld selbst. So sehen wir in beiden Theorien eine Mischung zweier Begriffe: Materie und Feld. Es wäre philosophisch viel befriedigender, wenn wir eine einheitliche Theorie aufbauen könnten, die auf nur einem dieser Begriffe fußen würde. Die Triumphe der Feldtheorie waren zu groß, als daß man den Feldbegriff aufgeben konnte. So war es Einsteins Ziel, eine reine Feldtheorie aufzubauen. In einer solchen Theorie würden wir nur Feldbegriffe und Feldgleichungen haben. Aber wir könnten fragen: Wie können wir uns mit Feldgleichungen allein zufriedengeben? Wir wissen, daß die Materie so real wie der Stein ist, über den wir stolpern. Der Anhänger der einheitlichen Feldauffassung würde sagen, daß die Existenz dessen, was als Materie bekannt ist, aus den Feldgleichungen allein abgeleitet werden sollte. Was als Materie betrachtet wird, ist in Gebieten gelegen, in denen das Feld besonders stark ist. Die Bewegung von Materie bedeutet, daß die Gebiete, wo das

Feld besonders stark ist, sich mit der Zeit ändern. So muß ein ruhendes Elektron in einer einheitlichen elektromagnetischen Theorie durch ein kleines Gebiet dargestellt werden, innerhalb dessen das Feld sehr stark ist und außerhalb dessen es schnell abstirbt. Ein solches Gebiet mit einem starken, aber endlichen Feld stellt konzentrierte Energie, das heißt Materie dar.

So beschreibt und deutet eine gute Feldtheorie die Materie mit Hilfe von starken Feldern. Vom Standpunkt der logischen Einfachheit könnte ein großer Fortschritt erzielt werden, wenn sowohl die Theorie Maxwells als auch die Allgemeine Relativitätstheorie in reine Feldtheorien verwandelt würden. Eine derartige Theorie würde sich nur mit den Begriffen des elektromagnetischen Feldes, durch sechs Funktionen gekennzeichnet, und mit denen des Schwerefeldes, durch zehn Funktionen gekennzeichnet, befassen. Aber die Gesetze dieser Felder würden verändert werden müssen. Ungleich der Theorie Maxwells und der Allgemeinen Relativitätstheorie müßten solche neuen Theorien Lösungen zulassen, die Materie darstellen. Die alten Theorien haben das nicht geleistet.

Aber selbst wenn es uns gelänge, eine reine Feldtheorie zu formulieren, so wäre eine solche Theorie noch immer durch eine andere Sünde befleckt. Wir haben in den alten Theorien gesehen, daß das Schwerefeld auch ein geometrisches Feld war, während das elektromagnetische Feld ein rein physikalisches Feld war. Diese Trennung ist wieder künstlich, und nach Einstein sollte eine befriedigende Theorie die folgenden Kennzeichen haben:

1. Sie sollte eine reine Feldtheorie sein.
2. Sie sollte elektromagnetische und Schwerefelder auf derselben Basis behandeln, das heißt, beide sollten die Geometrie unseres Weltalls kennzeichnen.

So suchte Einstein die Sünde des doppelten Dualismus aus unseren Theorien zu beseitigen. Er glaubte, daß eine Suche nach einer einfachen Geometrie unseres Weltalls, die jedoch allgemeiner wäre als

die Riemannsche Geometrie, uns zu reinen Feldgleichungen führen würde, die die elektromagnetischen und Gravitationserscheinungen beschreiben. Ja noch mehr: wenn eine solche Theorie erfolgreich ist, sollte sie uns gleichzeitig die Eigenschaften der Elementarbausteine der Atome und die Bewegung der Planeten, Sterne und Nebel verraten.

### Am Ziel der Suche?

Einstein hält es für möglich, daß er dieses große Problem gelöst haben könnte. In der Tat ist seine neue Theorie eine vollkommen einheitliche Theorie. In ihr erscheint nur das Feld selbst, aber keine Quelle des Feldes. Die Existenz von Materie wird aus den Feldgleichungen abgeleitet werden müssen, indem man Lösungen findet, die große Konzentrationen des Feldes darstellen. Die neue Theorie ist eine rein geometrische Theorie. Während das elektromagnetische Feld in der Theorie Maxwells durch sechs Funktionen gekennzeichnet ist, während das Schwerefeld in der alten Theorie Einsteins durch zehn Funktionen gekennzeichnet ist, ist das metrische Feld in der neuen Theorie durch sechzehn ( $10 + 6$ ) Funktionen gekennzeichnet. Um es in der Fachsprache auszudrücken: das elektromagnetische Feld ist durch einen antisymmetrischen Tensor mit sechs Komponenten, das Schwerefeld durch einen symmetrischen Tensor mit zehn Komponenten und die Geometrie der neuen Welt Einsteins durch einen allgemeinen Tensor zweiter Ordnung mit sechzehn Komponenten gekennzeichnet.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie haben die Feldgleichungen Einsteins die Riemannsche Geometrie unserer Welt bestimmt. Aber nach der neuen Theorie Einsteins ist die Geometrie unserer Welt eine nicht-Riemannsche Geometrie. Die neuen Feldgleichungen Einsteins bestimmen diese neue nicht-Riemannsche Geometrie unserer Welt. Jeder Begriff, der in der neuen Theorie erscheint, hat sein geometri-

sches Bild. Die Unterscheidung zwischen rein physikalischen Begriffen und solchen mit einer geometrischen Deutung ist überholt. Auch die Unterscheidung zwischen Materie und Feld ist vorbei. Es gibt nur das Feld, das sowohl geometrisch als auch physikalisch ist. Es gibt nur die Feldgleichungen, die die Geometrie unserer Welt und die Gesetze der Physik darstellen.

Für schwache Felder gewinnen wir aus der neuen Theorie die Gesetze der alten Theorien zurück, also die Maxwellschen Gleichungen und die Gleichungen der Gravitation. Das muß auch so sein, weil jede neue Theorie die Erscheinungen erklären muß, die die aufgegebene Theorie erklärt hatte. Wie immer in solchen Fällen erscheint auch hier die verworfene Theorie als eine erste Näherung der neuen Theorie.

Obwohl Einsteins neue Theorie viele verlockende Züge trägt, wissen wir noch nicht, ob sie eine erfolgreiche Feldtheorie ist; wir wissen nicht, ob sie Lösungen enthält, die als Elementarteilchen gedeutet werden können. Wir wissen, daß die alten Theorien von Maxwell und Einstein keine Lösungen von Feldgleichungen gaben, die als Teilchen betrachtet werden konnten. Nach den alten Theorien mußte die Existenz der Materie unabhängig vom Feld angenommen werden. Wird die neue Theorie Erfolg haben, wo die alten Theorien versagten? Das ist eine entscheidende Frage, deren Antwort wir noch nicht kennen.

Aber die Lage ist noch komplizierter. Die moderne Entwicklung der Physik betrifft Quantengesetze, die innerhalb des Atoms gelten. Es ist nicht klar, ob und wie solche Gesetze aus der Feldtheorie Einsteins abgeleitet werden könnten. Dennoch sollte man nicht zu skeptisch sein. Einsteins Werk ist immer vorübergehendem Zweifel begegnet, weil sein Genie seiner Zeit voraus war. Dies ist zweimal geschehen und es kann an der Wende unseres Halbjahrhunderts wieder der Fall gewesen sein.

## Einstein, der Mensch und Philosoph

Einstein gilt nicht bloß als großer Physiker, sondern auch als bedeutender Philosoph. Die grundlegende Wandlung, die die Relativitätstheorie in den bisher geltenden Auffassungen von Raum, Zeit und Geometrie mit sich gebracht hat, nämlich die Ersetzung unfruchtbarer Spekulationen durch klare physikalische Fragestellungen, wird ein weithin sichtbarer Markstein auf dem Weg der menschlichen Erkenntnis bleiben. Doch ist damit die Philosophie Einsteins bei weitem nicht erschöpft.

Vor Jahren hörte ich in Prag anlässlich einer Tagung der Physikalischen Gesellschaft einen Vortrag von Professor Sommerfeld. Er erzählte einer großen Zuhörerschaft: „Ich habe Einstein, den ich für den größten lebenden Philosophen halte, gefragt: ‚Gibt es außerhalb unseres Bewußtseins eine reale Welt?‘ — und Einstein antwortete: ‚Ja, ich glaube daran!‘“

Einstein ist der Meinung, daß Physik nicht ohne die Vorstellung einer realen Außenwelt getrieben werden kann. Er bekundete vielfach seine Gegnerschaft gegen den offenen philosophischen Idealismus, der im Leitsatz des Bischofs Berkeley „esse est percipi“ („Sein ist Wahrgenommenwerden“) wurzelt, wie gegen dessen verschämteren phänomenologischen, positivistischen, empiriokritizistischen Nachfolger. In seinem 1939 in der „Zeitschrift für freie deutsche Forschung“ in Paris erschienenen Aufsatz „Physik und Realität“ drückt er seine Ansicht hierüber unter anderem wie folgt aus:

„... Für sie (die ‚phänomenologische‘ Physik) ist es charakteristisch, daß sie sich möglichst erlebnisnaher Begriffe bedient, dafür aber auf Einheitlichkeit der Grundlagen weitgehend verzichtet. Wärme, Elektrizität und Licht werden durch besondere Zustandsvariable und Materialkonstanten neben dem mechanischen Zustande beschrieben, und alle diese Variablen in ihrer gegenseitigen und zeitlichen Abhängigkeit zu bestimmen, war ein in der Hauptsache nur auf

empirischem Wege lösbares Problem. Viele Zeitgenossen von Maxwell sahen in einer solchen Darstellungsweise das Endziel der Physik, die sie wegen der relativen Erlebnisnähe der gebrauchten Begriffe für rein induktiv aus den Erlebnissen ableitbar hielten. St. Mill und E. Mach vertraten erkenntnistheoretisch ungefähr diesen Standpunkt.

Es ist nach meiner Ansicht die größte Leistung der Newtonschen Mechanik, daß ihre konsequente Anwendung zur Überwindung dieses (phänomenologischen) Standpunktes führte, und zwar auf dem Gebiet der Wärmeerscheinungen. Dies geschah durch die kinetische Gastheorie und durch die statistische Mechanik überhaupt. Erstere verknüpfte die Zustandsgleichung der idealen Gase, Viskosität, Wärmeleitung und Diffusion der Gase, Radiometererscheinungen der Gase und lieferte die logische Verbindung von Phänomenen, welche vom Erlebnisstandpunkte nicht das geringste miteinander zu tun hatten. Letztere lieferte eine mechanische Deutung der thermodynamischen Begriffe und Gesetze sowie die Erkenntnis von der Grenze des Anwendungsbereiches der Begriffe und Gesetze der klassischen Wärmelehre. Diese kinetische Theorie, welche die phänomenologische Physik bezüglich der logischen Einheitlichkeit der Grundlagen weit übertraf, lieferte ferner für die wahre Größe der Atome und Moleküle bestimmte Werte, die sich durch mehrere voneinander unabhängige Methoden ergaben und so jedem vernünftigen Zweifel entrückt wurden. Diese entscheidenden Fortschritte wurden dadurch erkauft, daß den materiellen Punkten reale Gebilde (Atome bzw. Moleküle) zugeordnet wurden, deren konstruktiv-spekulativer Charakter offenkundig war; niemand konnte hoffen, ein Atom ‚unmittelbar wahrzunehmen‘. Gesetze über beobachtungsnahe Zustandsgrößen (zum Beispiel Temperatur, Druck, Geschwindigkeit) aber wurden aus den Grundbegriffen durch komplizierte Rechnungen abgeleitet. So wurde die ursprünglich mehr ‚phänomenologisch‘ aufgebaute Physik (wenigstens ein Teil derselben) unter Zugrundelegung der Newtonschen Mechanik

für die Atome bzw. Moleküle auf eine erlebnisfernere, aber einheitlichere Basis zurückgeführt.“

Diese Grundhaltung führt Einstein zur Ablehnung der Auffassung, daß etwa durch die Heisenbergsche Unschärferelation der menschlichen Erkenntnis eine grundsätzliche Schranke auferlegt sei und daß die Quantentheorie eine „endgültige“ oder gar „vollständige“ Beschreibung der Vorgänge in der Natur liefern könne.

In das Begriffssystem der Quantentheorie gehen grundsätzlich nur Größen ein, die mit den heute vorhandenen Meßeinrichtungen bestimmt werden können, zum Beispiel Ladung, Masse, Energie, magnetisches Moment der Korpuskeln. Sie ist in diesem Sinne eine rein phänomenologische Theorie. Über die Struktur der Korpuskeln — darüber, wieso zum Beispiel manche Korpuskeln eine elektrische Ladung aufweisen, in welcher Weise diese Ladung in der Korpuskel verteilt ist, warum überhaupt Korpuskeln existieren — gibt diese Theorie keine Auskunft und kann keine geben.

Ebensowenig kann man aus der klassischen statistischen Mechanik einen Einblick in die innere Struktur des Atoms gewinnen. Zur Lebenszeit von Clausius, Boltzmann und Gibbs durchbrach die Wissenschaft die Schranken der phänomenologischen Physik, indem sie die reale Existenz von Atomen setzte, obwohl dafür noch kaum ein Beweis erbracht werden konnte. Später wurde die molekulare Struktur der Materie zur Gewißheit. Und Einstein glaubt daran, daß die heutige Wissenschaft in ähnlicher Weise die Schranken der Quantentheorie durchbrechen wird, indem sie sie ihres phänomenologischen Charakters entkleidet.

Einstein hat immer die Bedeutung der reinen Feldtheorie betont; er war immer überzeugt, daß eine weitere Ausdehnung und Verallgemeinerung der Relativitätstheorie die Schwierigkeiten der modernen Quantentheorie überwinden könnte. Auch seine neue Theorie ist ein Versuch in dieser Richtung. Er hofft, daß seine Gleichungen zu Lösungen führen, die die Struktur der Elementarteilchen und den

örtlichen und zeitlichen Ablauf ihrer Geschichte enthüllen werden.

Andererseits betrachten viele Physiker die Quantentheorie als eine Theorie rein statistischen Charakters, die sich auf Gesamtheiten und nicht auf Individuen bezieht. Mit dieser statistischen Interpretation der Quantentheorie ist Einstein nicht zufrieden, obwohl er zugibt, daß sie logisch korrekt ist. Er betrachtet die quantentheoretische Beschreibung der Natur als unvollständig und temporär. Einstein führt oft das folgende Beispiel an: Betrachten wir die Explosion eines radioaktiven Atoms, die durch eine Marke am Zählstreifen eines Geigerzählers vermerkt wird. Hier haben wir zwei Systeme: radioaktive Atome + Geigerzähler. Es wäre — zumindest theoretisch — möglich, daß physikalische Gesetze vorausbestimmen könnten, wann und wo die Marke auf dem Zählstreifen des Geigerzählers auftreten wird. Aber die quantentheoretische Beschreibung — die von Einstein als unvollständig bezeichnet wird — liefert uns nur eine Aussage über die *Wahrscheinlichkeit* des Auftretens der Marke. Einstein spricht diese Ansicht in folgenden Worten aus:

„Die Frage nach der Lage der Marke am Zählstreifen ist eine Angelegenheit, die zur Gänze dem Bereich der makroskopischen Vorstellungswelt gehört, im Gegensatz zur Frage nach dem Zeitpunkt des radioaktiven Zerfalls eines einzelnen Atoms. Wenn wir versuchen, diesen Tatbestand quantentheoretisch zu interpretieren und die quantentheoretische Beschreibung als vollständige Beschreibung des einzelnen Systems nehmen, sind wir zu der Auffassung gezwungen, daß die Lage der Marke am Streifen nichts mit dem System an sich zu tun hat, sondern daß sie wesentlich von der Ausführung einer Beobachtung an dem Streifen selbst abhängt. Eine derartige Auffassung ist natürlich vom rein logischen Standpunkt keineswegs absurd, doch ist es unwahrscheinlich, daß irgend jemand geneigt sein wird, sie ernstlich in Betracht zu ziehen. Denn in der makroskopischen Welt wird es einfach als sicher angesehen, daß man am Programm einer realistischen Beschreibung in Raum und Zeit festzuhalten hat; im

Bereich der mikroskopischen Vorgänge ist man viel eher geneigt, dieses Programm aufzugeben oder zumindest zu modifizieren.“ („*Expectations of a Definite Form*“, „*Physics Today*“, Feb. 1950.)

Und an anderer Stelle desselben Aufsatzes:

„Was ich an dieser Art der Argumentation (der Quantentheoretiker, die die Quantentheorie als vollständige Beschreibung der Elementarvorgänge auffassen) nicht leiden kann, ist die positivistische Grundhaltung, die von meinem Standpunkt aus unhaltbar ist und die, wie mir scheint, im Wesen das gleiche ist wie Berkeleys Prinzip ‚esse est percipi‘.“

Trotz dieser klaren Feststellung wird Einstein von Zeit zu Zeit als „idealistischer Philosoph“ bezeichnet. Aber sein Glaube an die Realität unserer Umwelt kommt in seinen Schriften immer wieder zum Ausdruck.

Einstein glaubt an die Fähigkeit des menschlichen Geistes, die Natur zu erkennen und nicht bloß wahrzunehmen. Dies meint er, wenn er davon spricht, daß die „Physik ein in Entwicklung begriffenes logisches Gedankensystem ist, dessen Grundlage nicht durch eine induktive Methode aus den Ergebnissen herausdestilliert, sondern nur durch freie Erfindung gewonnen werden kann. Die Berechtigung (der Wahrheitswert) des Systems liegt in der Bewährung von Folgesätzen an den Sinneserlebnissen, wobei die Beziehung der letzteren zu den ersteren nur intuitiv erfaßbar ist. Die Entwicklung vollzieht sich in Richtung wachsender Einfachheit des logischen Fundaments. Um diesem Ziel näher zu kommen, müssen wir uns damit abfinden, daß die logische Grundlage immer erlebnisferner und der gedankliche Weg von den Grundlagen bis zu jenen Folgesätzen, die ein Korrelat in Sinneserlebnissen finden, immer beschwerlicher und länger wird.“ („*Physik und Realität*“, 1939.)

Der stärkste Widerstand gegen Einsteins Lehre als eine idealistische Philosophie bezieht sich auf seinen Glauben, daß physikali-

sche Begriffe wie „materieller Punkt“, „starrer Körper“ usw. freie Erfindungen des menschlichen Geistes seien. Aber „frei“ versteht er nicht in dem Sinn, daß eine willkürliche Setzung getroffen wird, sondern im Sinn einer Abstraktion aus der Erfahrung, zu dem Zweck, von dieser Erfahrung zur Erkenntnis zu gelangen. Tatsächlich stellt er immer wieder fest, daß im Laufe der Entwicklung der Wissenschaft viele verschiedene Begriffe verwendet worden sind, um unsere Umwelt zu beschreiben. Ein typisches Beispiel solcher Wandlung der physikalischen Vorstellungen ist der Übergang von der Vorstellung einzelner materieller Punkte zur Vorstellung des Feldes. Obwohl der Zweck unserer Kenntnisse die Beschreibung unserer Umwelt ist, müssen wir rückblickend erkennen, wie oft wir in unserem Streben danach unsere Begriffe revidieren mußten. Aber das letzte — nur als äußerste Grenze erreichbare — Ziel ist die objektive Wahrheit über unsere Welt. Einstein glaubt, daß der Erkenntnis keine grundsätzlichen Schranken gesetzt sind und daß man die stets reicher und vielseitiger werdende Erfahrung durch eine stets besser den Wunsch nach Einheitlichkeit und logischer Geschlossenheit befriedigende Theorie in ihrem inneren Zusammenhang verstehen wird, so wie uns dies auch die bisherige Geschichte der Wissenschaft zeigt. Darin wechselten ständig revolutionierende Fortschritte, die mit einem Schlag eine Anzahl von Problemen lösten, mit Perioden scheinbar ruhiger Entwicklung ab, an deren Ende wieder eine Anzahl neuer unbeantworteter Fragen und Widersprüche eine neue Revolution auslösten. Auf diesem Weg gab es keinen Rückschlag, sondern nur Fortschritt zu immer höherer Einsicht in die Zusammenhänge der Natur. Es scheint, daß dieser Prozeß des Fortschrittes unserer Erkenntnis auch in aller Zukunft durch eine Folge von abwechselnd evolutionären und revolutionären Epochen gekennzeichnet sein wird. Das einzige Unfaßbare daran ist, daß dem so ist — oder, wie Einstein es ausdrückt: „Das ewig Unbegreifliche an der Welt ist ihre Begreiflichkeit.“

Einstein wirkt auf uns durch seine Lehre, durch seine Gedanken, durch das geschriebene Wort. Er ist seinem Wesen nach kein Mann der Tat. Doch bezweifle ich, daß es jemals in der Wissenschaft einen Mann gab, der so wie Einstein die Phantasie der Menschen auf der ganzen Welt angeregt hat.

Seit dem Ende des ersten Weltkrieges ist Einsteins Name in aller Munde. Die Bestätigung, die seine Voraussagen über die Ablenkung der Lichtstrahlen im Schwerefeld der Sonne durch die britische Sonnenfinsternisexpedition erfahren hatte, erzwang eine weltweite Diskussion über die Grundlagen der Physik.

Im Jahr 1921, als ich zum Studium nach Berlin kam, wurde ich zu meinem Schrecken Zeuge der schändlichen Komödie, die Einsteins Ruhm begleitete. Es war dies zwölf Jahre, bevor Hitler zur Macht gelangte. Ich las konservative Tageszeitungen, deren Leitartikel Einsteins Theorie angriffen: „Wenn er an seine Theorie glaubt, dann soll er auf unsere Gegenargumente antworten. Wir werden fair sein und seine Antwort abdrucken.“ Ich sah Ankündigungen von Vorträgen gegen Einsteins Theorie in einem der größten Konzertsäle Berlins. Meine Neugier trieb mich, eine Eintrittskarte zu kaufen und der Veranstaltung beizuwohnen. Es war eine Doppelveranstaltung: zwei Professoren waren als Vortragende angesetzt. Vor übervollem Haus las ein Mann mit einem Bart in monotoner Stimme aus einem Manuskript vor. Er erklärte, wie dumm die Spezielle Relativitätstheorie mit ihrem Paradoxon von den Zwillingen sei; er sagte, sie sei der größte Betrug in der Geschichte der Wissenschaft und die Aufmerksamkeit, die ihr zugewandt werde, widerspreche dem wahren deutschen Geist. Zu jener Zeit hielt man es noch nicht für richtig, Einstein offen wegen seines Judentums anzugreifen, dennoch geschah es nicht bloß einmal, sondern hundertmal in etwas verhüllter Form. Nach außen hin war Deutschland die Weimarer Republik, aber unter der fadenscheinigen Oberfläche erkannte man die Anzeichen des kommenden Umsturzes.

Ich erinnere mich auch, daß in der Pause zwischen den beiden Vorträgen alle Leute zur Loge hinaufschauten, in der Einstein saß. Ich weiß nicht, warum er hingekommen war, aber es schien ihm großes Vergnügen zu machen, Bekannte zu begrüßen und ungeniert laut zu lachen und durch seine bloße Anwesenheit die Veranstaltung zu beherrschen.

Die weitere Entwicklung war erstaunlich. Auf der ganzen Welt wurden populäre Vorträge über die Relativitätstheorie gehalten. Man konnte damit sogar Geld verdienen. Eine amerikanische Zeitschrift — ich habe ihren Namen vergessen — stiftete einen Preis von einigen tausend Dollar für den besten Aufsatz, der die Relativitätstheorie in 3000 Worten erklärte. Für Studenten in einem Land, in dem Inflation herrschte, lag eine solche Summe fast jenseits des Vorstellungsvermögens. Ich half meinem Freund mit seinem Beitrag; in meinem elenden kleinen Zimmer gaben wir dem Aufsatz den letzten Schliff. Während wir die Worte zählten, träumten wir von dem goldenen Regen, den die Relativitätstheorie und die USA über uns ausgießen würden. Aber wir gewannen den Preis nicht.

Als ich später nach Polen zurückkehrte, fand ich zu meiner Überraschung dort dieselbe Stimmung vor. Der Ruhm der Relativitätstheorie überrannte alle Grenzen. Sie war damals Gegenstand ebenso ausgedehnter und leidenschaftlicher Diskussionen, wie sie heute der Kommunismus auslöst. Mein Mathematikprofessor Zaremba — ein sehr bedeutender Mathematiker — hielt eine akademische Vorlesung und viele populäre Vorträge gegen die Relativitätstheorie. Er bezeichnete sie als unvereinbar mit der Definition der starren Körper. Ein starrer Körper ist ein Körper, der sich nicht zusammenzieht. Wie könnte daher ein starrer Stab in der Bewegung schrumpfen? Das war natürlich ein banales Argument, obwohl mein Professor es in sehr gewählter und gelehrter Sprache vorbrachte. Die einfache Tatsache, daß die von uns als starr bezeichneten Körper sich nach der klassischen Physik anders verhalten als nach der Speziellen Relativitätstheorie,

wurde vom alten Professor nicht verstanden, und ich hätte auch nicht gewagt, es ihm zu erklären. Er wurde in einer sehr groben Form von einem anderen Professor namens Banachiewicz angegriffen, der ebenfalls ein hervorragender Mathematiker und Astronom war. Er nannte Zaremba blind und seine Argumente dumm. Was sich in der kleinen Universitätsstadt Krakau abspielte, ist nur deshalb interessant, weil dasselbe auf der ganzen Welt geschah. Populäre Vorträge über die Relativitätstheorie zogen große Menschenmengen an, und ein verwirrtes Publikum lauschte den Argumenten und Gegenargumenten. Sogar Einstein selbst ließ sich dazu überreden, öffentliche Vorträge über die Relativitätstheorie zu halten. Er war nicht sehr geschickt im Popularisieren seiner Lehre. Trotzdem war das Publikum entzückt, ihn zu sehen und seiner schönen Stimme zuzuhören. Bei einem seiner Vorträge spielte er mit einem Stab, der auf dem Tisch lag. Eine Dame im Zuschauerraum fragte ihre Nachbarin: „Warum läßt er diesen Stock nicht in Ruhe?“ Aber bald wußte sie Bescheid. Als Einstein demonstrierte, wie ein Stab sich bewegt und schrumpft, flüsterte die Dame erleichtert: „Ich wußte nicht, daß das der schrumpfende Stab ist!“

Ich selber war bereit und gewillt, mich an diesen Diskussionen zu beteiligen, und kränkte mich, wenn ich nicht dazu aufgefordert wurde. Ein Jahr später (1922) unterrichtete ich an der Mittelschule einer kleinen polnischen Stadt. Die Erregung über die Relativitätstheorie war sogar bis dorthin vorgedrungen, und ich hatte die seltene Ehre, der einzige in der Stadt zu sein, der etwas über die Relativitätstheorie wußte. Ich hielt eine Serie von vier Vorträgen, und viele Leute mußten fortgeschickt werden, weil der Saal die Menschenmenge nicht faßte. Nach der Veranstaltung gab einer meiner Freunde das Bonmot von sich: „Mir wäre es lieber gewesen, Einstein über Infeld sprechen zu hören.“

Allmählich ließen die Argumente gegen die Relativitätstheorie nach. Heutzutage zweifelt kein Physiker daran, daß die Grundsätze der

Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie denen der klassischen Physik überlegen sind. Er mag bezweifeln, daß die Umwälzung radikal genug war, aber niemand mit normalem Verstand hält einen Rückzug zu den Positionen der klassischen Physik für möglich. Sogar unter Hitlers Herrschaft wurden in Deutschland Arbeiten über die Relativitätstheorie veröffentlicht; man ließ dies unter der Voraussetzung zu, daß der Name ihres Schöpfers nicht genannt wurde . . .

Selbst wenn man die Ursache von Einsteins plötzlich aufsteigendem Ruhm versteht, kann man nicht so leicht verstehen, daß er unvermindert anhält. Es gibt dafür mehrere Gründe. Einer davon liegt nach meiner Meinung darin, daß einige Herren Professoren Einstein um eine Spur zu gehässig anfeindeten und damit das Gegenteil ihres Zieles erreichten. Der andere Grund ist Einsteins Vitalität. Man spürt sie, wenn man eines seiner Bilder betrachtet. Würde man Einstein in einer Gesellschaft kennenlernen, ohne zu wissen, wer er ist, wäre man dennoch vom Leuchten seiner Augen fasziniert, von seiner schüchternen Sanftmut, von seinem erfrischenden Humor, von seiner Fähigkeit, Banalitäten in Weisheiten umzuwandeln, und von der Tatsache, daß alle seine Aussprüche das Ergebnis seines eigenen Denkens sind — unbeeinflußt vom Geschrei der Mitwelt. Man fühlt, daß man einen Mann vor sich hat, der selbständig denkt. Er hat Millionen beeinflußt, aber er selbst kann in einem tieferen Sinn von niemandem beeinflußt werden.

Wenn wir ein vollständiges Bild von Einsteins Einfluß auf unsere Welt gewinnen wollen, dürfen wir seinen Einfluß als Mensch nicht unterschätzen.

Seine Einstellung hat er selbst wie folgt umschrieben:

„Mein leidenschaftliches Interesse für soziale Gerechtigkeit und soziale Verantwortung stand stets in merkwürdigem Gegensatz zu meiner ausgeprägten Wunschlosigkeit in Hinblick auf die persönliche Beziehung zu Männern und Frauen. Ich bin ein Einzelgänger, nicht für Gemeinschaftsarbeit geschaffen. Ich habe nie mit ganzem Herzen

einem Land oder einem Staat angehört, auch nicht meinem Freundeskreis oder selbst meiner Familie. Diese Bindungen waren immer von einem unbestimmten Gefühl des Losgelöstseins begleitet und der Wunsch, mich in mich selbst zurückzuziehen, nimmt mit den Jahren zu.

Solch eine Vereinsamung ist manchmal bitter, doch bedaure ich nicht, das Verständnis und die Sympathie der Umwelt zu entbehren. Gewiß verliere ich damit etwas, doch wird dieser Verlust dadurch aufgewogen, daß ich von den Gewohnheiten, Meinungen und Vorurteilen anderer unabhängig bin und nicht in Versuchung komme, meinen inneren Frieden auf derart schwankende Fundamente zu gründen.“ („*The World as I see it*“, 1934.)

Die äußeren Umstände von Einsteins Leben sind daher für sein Wirken von geringer Bedeutung.

Während des ersten Weltkrieges und danach sah man Einstein die politische Arena betreten, um für den Weltfrieden zu wirken. Seither nimmt er Partei. Für Gewalt, Terror, Aggression, Ungerechtigkeit hat er nur Verachtung. „Verachtung“ dürfte die richtige Bezeichnung sein — es wäre falsch, sie durch das Wort „Haß“ zu ersetzen. Er ist immer gütig. Da er einer starken Beanspruchung durch seine Umwelt ausgesetzt ist, wahrt er die Konventionen höflichen Interesses und läßt niemanden seine innere Losgelöstheit fühlen. Seine äußere Erscheinung unterstützt diese Haltung. Wenn man mit ihm spricht, wird man leicht getäuscht durch dieses Gesicht eines großen Künstlers oder Propheten, durch diese Augen, die zu strahlen scheinen. Aber ihre Strahlung ist weit in die Ferne gerichtet — in das Weltall und seine Gesetze, nicht auf irgendwelche persönlichen Probleme. Trotzdem wird er immer gerne, mit einer geistreichen Bemerkung und fröhlichem Lachen, einen Empfehlungsbrief schreiben — sofern er keinen sicheren Beweis dafür hat, daß es sich um einen Schwindler

oder Nichtskönner handelt. Er glaubt, was man ihm sagt, weil er gütig ist und gütig sein will, und weil glauben viel einfacher ist als mißtrauen. Man könnte meinen, daß Einstein sich leicht von etwas überzeugen ließe, doch wird er halsstarrig und unnachgiebig, sobald er merkt, daß er es mit einem Faschisten zu tun hat. Und er wird mißtrauisch, wenn man ihm mit einem Projekt kommt, das für ihn selbst und nicht für den Überbringer vorteilhaft erscheint.

Im Jahr 1914 weigerte er sich, das chauvinistische Manifest der deutschen Wissenschaftler zu unterschreiben. Nach dem ersten Weltkrieg war er der erste deutsche Wissenschaftler, der nach Frankreich eingeladen wurde.

Nach dem Krieg war er viele Jahre lang Präsident der Deutschen Liga für Menschenrechte. Auch heute, mit über 70 Jahren, erhebt er unermüdlich seine Stimme zum Protest gegen Unmenschlichkeit und Unrecht und unterstützt durch sein öffentliches Auftreten die Kampagnen gegen die Lynchjustiz, die an amerikanischen Negeren unter dem Schein der Legalität verübt wird.

Die Forschungsergebnisse Einsteins haben schon heute die Entwicklung der Welt auch in materiellem Sinn tiefgreifend beeinflusst und schwerwiegende Fragen politischer und moralischer Natur aufgeworfen. Die Entwicklungsgeschichte der Atomenergie beginnt mit Einsteins Gleichwertigkeitsbeziehung zwischen Masse und Energie. Einstein gehörte auch zu den ersten, die sich nach der Entdeckung der Kernspaltung des Urans der ungeheuren Möglichkeiten der Atomenergie und der Gefahr ihres Mißbrauchs bewußt wurden. In einem Brief vom 2. August 1939 an Präsident Roosevelt sprach Einstein bereits die Überzeugung aus, „daß das Element Uran in unmittelbarer Zukunft in eine neue und wichtige Energiequelle umgewandelt werden kann“, und betonte die Gefahr, die eine Atombombe in der Hand Hitlers für die ganze Welt mit sich brächte. „Eine einzige Bombe von diesem Typus . . . in einem Hafen zur Explosion gebracht . . . kann wohl den ganzen Hafen mitsamt seiner Umgebung zerstören.“

Seit Jahren nun kämpft Einstein leidenschaftlich gegen die Gefahr des Mißbrauchs der Atomenergie zu militärischen Zwecken und für die Aufrechterhaltung des Weltfriedens. Nach dem Krieg hat er an das amerikanische Volk eine Botschaft gerichtet, in der es heißt: „*Auf uns Wissenschaftlern, die diese ungeheure Kraft entjesselt haben, liegt die überwältigende Verantwortung dafür, die Atomenergie so zu lenken, daß sie dem Wohl der Menschheit und nicht ihrer Vernichtung dient.*“

In diesen düsteren Zeiten, da die Luft von leeren Banalitäten und dummen Argumenten erfüllt ist, erfrischt es, eine klare Stimme der Vernunft zu hören. Es ist das Weltgewissen, das zu uns spricht:

„Die Wissenschaft hat diese Gefahr heraufbeschworen, aber das eigentliche Problem liegt in den Hirnen und Herzen der Menschen. Wir werden die Herzen unserer Mitmenschen nicht auf mechanischem Wege verändern, sondern dadurch, daß wir unsere eigenen Herzen verändern und den Mut zum Sprechen haben.

Wir müssen der Welt gegenüber großzügig sein und ihr unser Wissen, unsere Kenntnisse über die Naturkräfte preisgeben, nachdem wir Schutzmaßnahmen gegen deren Mißbrauch getroffen haben.

Wir müssen nicht nur bereit sein, sondern aktiv darauf ausgehen, uns einer bindenden Autorität zu unterwerfen, die für die Sicherheit der Welt notwendig ist.

Wir müssen erkennen, daß wir nicht gleichzeitig für den Krieg und für den Frieden planen können.

Erst wenn wir in unseren Herzen und in unserem Geist klar sind—erst dann werden wir den Mut finden, die Furcht, von der die Welt heimgesucht wird, zu überwinden.“ („*Only Then Shall We Find Courage.*“)

In seinem unaufhörlichen Bemühen um Völkerverständigung und die Aufrechterhaltung des Weltfriedens gibt sich Einstein volle Rechenschaft über die Kräfte, die diesem Bestreben entgegenwirken. In einem Brief an Sigmund Freud vom 30. Juli 1932 schreibt er über die zum Krieg treibenden Kräfte:

„... Einige dieser Kräfte liegen offen zutage. Das Machtbedürfnis der jeweils herrschenden Schichte eines Staates widersetzt sich einer Einschränkung der Hoheitsrechte desselben. Dieses politische Machtbedürfnis wird häufig genährt aus einem materiell-ökonomisch sich äußernden Machtstreben einer anderen Schicht. Ich denke hier vornehmlich an die innerhalb jedes Volkes vorhandene kleine, aber entschlossene, sozialen Erwägungen und Hemmungen unzugängliche Gruppe jener Menschen, denen Krieg, Waffenherstellung und Handel nichts als eine Gelegenheit sind, persönliche Vorteile zu ziehen, den persönlichen Machtbereich zu erweitern.“

Einstein macht für die heutige Krise der Gesellschaft, als deren Inbegriff ihm das Verhältnis des einzelnen zur Gemeinschaft erscheint, das kapitalistische System verantwortlich. Als schlimmstes Übel betrachtet er die durch den Kapitalismus hervorgerufene Lähmung des sittlichen Bewußtseins. Nach seiner Überzeugung

„... gibt es nur ein Mittel gegen dieses Übel, nämlich die Wirtschaft auf sozialistischen Grundsätzen aufzubauen und die Menschen dafür zu erziehen und reif zu machen. In einer solchen Wirtschaft sind die Produktionsmittel Eigentum der Gemeinschaft und werden von ihr nach wohlüberlegten Plänen benutzt. Die Produktion wird nach dem Bedarf organisiert und die Arbeit auf alle Arbeitsfähigen verteilt, so daß jedem Mann, jeder Frau und jedem Kind der Lebensunterhalt gesichert ist. Aufgabe der Erziehung wird es sein, neben den angeborenen Fähigkeiten den Sinn der Verantwortung des einzelnen für seine Mitmenschen zu entwickeln, an Stelle der heutigen Verherrlichung von Macht und Erfolg.“ („*Monthly Review*“, 1950.)

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren, acht Jahre nachdem Bismarck Frankreich besiegt hatte, acht Jahre nach der Pariser Kommune. Er erlebte zweimal den Aufstieg des deutschen Imperialismus und zweimal dessen Niederlage.

Er war ein schüchternes, wenig geselliges Kind, an dem keine besondere Begabung auffiel. Er hatte sehr spät sprechen gelernt. Er hatte keine große Begabung für Fremdsprachen und spricht auch heute noch Englisch schwerfällig und mit Akzent; seine Manuskripte verfaßt er immer in deutscher Sprache. Seine Kameraden nannten ihn den „Biedermeier“, weil er sehr langsam und behäbig sprach. Sehr früh scheint er begonnen zu haben, mit ehrfürchtigem Staunen die Phänomene der Natur zu beobachten. Er erzählt oft, welchen tiefen Eindruck auf ihn eine Magnethadel machte, die ihm sein Vater, als er etwa fünf Jahre alt war, zum Spielen gab. Seine Leistungen in der Schule blieben auch nur mittelmäßig, als er in München, wohin seine Eltern übersiedelt waren, das Luitpold-Gymnasium besuchte. Angeregt durch verschiedene äußere Umstände, vor allem durch seinen Onkel, den Ingenieur Jakob Einstein, begann er sich damals außerhalb des Schulunterrichtes mit Mathematik zu beschäftigen und fand große Befriedigung in der Lösung von algebraischen Aufgaben. In dieser Zeit beginnt er auch, unter dem Einfluß seiner musikalischen Mutter, Violinunterricht zu nehmen. Seine Geige begleitet ihn von da an sein ganzes weiteres Leben. Es entspricht seinem ganzen Wesen, daß er klassische Kammermusik jeder anderen Art von musikalischer Betätigung vorzieht und daß er Bach und Mozart besonders liebt.

Als er 15 Jahre alt war, übersiedelten seine Eltern nach Mailand. Er benutzte die Gelegenheit, um während einiger Monate durch Ober- und Mittelitalien zu wandern und starke Eindrücke von Natur und Menschen zu sammeln. In dieser Zeit faßte er den Entschluß, Lehrer zu werden. Bei der Aufnahmeprüfung an der Lehramtsabteilung des Züricher Polytechnikums glänzte er zwar in Mathematik und Physik, sein Wissen in den beschreibenden Naturwissenschaften und in den Sprachen war jedoch mangelhaft, so daß er vorerst die Kantonschule in Aarau besuchen mußte, um sich dort auf den Eintritt in die Hochschule vorzubereiten. Dort befaßte er sich erstmals mit den Proble-

men, deren Lösung später die Grundlagen unseres Weltbildes revolutionierten.

Während seines Studiums an der Technischen Hochschule in Zürich traten die für seine spätere Arbeit charakteristischen Züge bereits in Erscheinung, vor allem Selbständigkeit. Sein Wissen erlangte er weniger durch den Besuch der Vorlesungen als durch Selbststudium, wobei vor allem die Werke von Boltzmann auf ihn Eindruck machten. Nach Abschluß seiner Studien war es ihm vorerst nicht möglich, eine Existenz zu finden. Man hatte ihm wohl Aussicht auf die eine oder andere Assistentenstelle gemacht, aber keine dieser Hoffnungen verwirklichte sich. Er war seit der Übersiedlung seiner Eltern nach Mailand eigentlich staatenlos. Das und seine jüdische Herkunft waren für den mittellosen jungen Mann keine Empfehlung. So brachte er sich vorerst recht kümmerlich als Hauslehrer in Schaffhausen und Bern durch, bis er nach einem Jahr das Bürgerrecht der Stadt Zürich erwarb und über eine Empfehlung seines Freundes Marcel Großmann im Jahre 1902 eine Anstellung als Vorprüfer am Eidgenössischen Patentamt in Bern erhielt. Er war dort sieben Jahre tätig. Ein vorbildlicher Beamter wird er nicht gewesen sein; aber es scheint, daß seine Vorgesetzten doch mehr Wert auf wissenschaftliche Qualifikation als auf bürokratische Bewährung legten. Einstein hatte jedenfalls Zeit, sein Physikstudium an der Universität Bern fortzusetzen und es im Jahre 1905, als seine bedeutenden Arbeiten fast gleichzeitig in den „Annalen der Physik“ erschienen, mit dem Doktorat abzuschließen. Im Jahre 1903 hatte er eine südslawische Studienkollegin geheiratet. Diese Ehe, der zwei Söhne entstammten, wurde später geschieden.

Einstein beabsichtigte, sich an der Universität Bern als Privatdozent zu habilitieren. Doch gelang ihm das vorerst nicht; seine Bedeutung war noch nicht erkannt und für den jungen Beamten ohne Protektion hatte man keinen Platz. Erst knapp vor seiner Berufung als außerordentlicher Professor an die Universität Zürich im Jahre 1909

wurde ihm die Lehrbefugnis erteilt. Inzwischen war auch die wissenschaftliche Welt auf ihn aufmerksam geworden. Vor allem setzten sich Henri Poincaré und Madame Curie für ihn ein. Sein Ruhm wuchs ständig. Nach einjährigem Wirken als Ordinarius in Prag war er wieder von 1911 bis 1913 Professor in Zürich, nämlich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Im Frühjahr 1914 wurde er als Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften mit freier Lehrbefugnis an der Universität nach Berlin berufen. Dort heiratete er seine inzwischen verstorbene Cousine Else Einstein. In Berlin wirkte er bis 1933. Als Hitler zur Macht kam, war Einstein gerade in Belgien. Seine Bücher wurden von Goebbels öffentlich verbrannt, sein Eigentum als das eines Juden, „Kulturbolschewiken“ und Pazifisten beschlagnahmt. Er emigrierte in die Vereinigten Staaten, wo er seither lebt. Er wurde Professor am Institut für Fortgeschrittene Studien in Princeton. Im Jahre 1945 hat er sich zurückgezogen, ohne jedoch damit seine wissenschaftliche Arbeit aufzugeben oder das Interesse an öffentlichen Fragen zu verlieren.

In illustrierten Zeitungen sehen wir manchmal das Bild eines weißhaarigen Mannes, der einfach oder sogar ärmlich gekleidet ist und dessen Augen von den kleinen Dingen der Welt weg auf die Sterne gerichtet zu sein scheinen.

Einstein arbeitet nicht für sein persönliches Wohlergehen. Er kümmert sich wenig um all die Dinge, die uns in unserem Privatleben so wichtig erscheinen. Wenn er sich für eine Idee einsetzt, dann tut er es nicht um des Ruhmes willen.

Vielleicht liegt Einsteins wahre Größe in seiner Menschlichkeit, in der einfachen Tatsache, daß er, obwohl er sein Leben lang zu den Sternen hinauf sah, immer auch versucht hat, seinen Mitmenschen Güte und Mitgefühl entgegenzubringen.

## Ereignisse im Leben Einsteins

- 1879 Geboren in Ulm (Bayern).
- 1880—1894 Lebt in München, wo er das Gymnasium besucht.
- 1894 Die Familie übersiedelt nach Mailand.
- 1896—1901 Studiert an der Technischen Hochschule Zürich.
- 1901—1903 Wird Schweizer Staatsbürger; arbeitet im Patentamt in Bern; erste Ehe.
- 1905 Erscheinen der Arbeiten über die Quantentheorie, Relativitätstheorie und Brownsche Bewegung. Wird Privatdozent an der Universität Bern.
- 1909 Außerordentlicher Professor an der Universität Zürich.
- 1910 Professor der Theoretischen Physik an der Deutschen Universität Prag.
- 1912 Professor der Theoretischen Physik an der Technischen Hochschule Zürich.
- 1913 Mitglied der Preußischen Akademie; übersiedelt nach Berlin.
- 1916 Arbeit an der Allgemeinen Relativitätstheorie im wesentlichen vollendet; zweite Ehe.
- 1919 Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie durch die Beobachtung der Lichtablenkung im Schwerefeld.

- 1919—1932 Besucht USA, England, Frankreich, China, Japan, Palästina, Spanien. Erhält 1922 den Nobelpreis für seine Theorie des photoelektrischen Effekts.
- 1933 Tritt von der Preußischen Akademie zurück; wird Professor am „Institut für Fortgeschrittene Studien“ in Princeton, New Jersey.
- 1945 Tritt offiziell in den Ruhestand.
- 1949 Kündigt seine neue verallgemeinerte Gravitationstheorie an.

S. LILLEY  
(Universität Birmingham)

# Menschen und Maschinen

*Eine Geschichte der Technik  
von der Erfindung des Ackerbaus  
bis zur Atomspaltung*

Mit 51 Illustrationen und einer Tabelle der wichtigsten Erfindungen  
seit 5500 v. Chr.

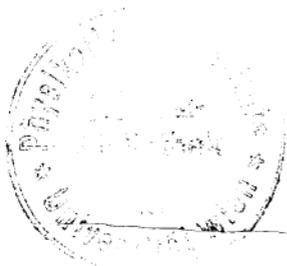
Dieses Buch gibt eine einzigartige Darstellung des jahrtausendealten Kampfes der Menschheit um die Herrschaft über die Natur durch die Entwicklung der Technik. Von der Steinzeit bis zum „Elektronengehirn“ sind sämtliche für den Fortschritt der menschlichen Gesellschaft ausschlaggebenden Erfindungen verzeichnet. Es wird überzeugend dargelegt, warum in bestimmten historischen Epochen der Fortschritt der Technik rapid ist und warum er in anderen stagniert. Zum erstenmal ist hier der Begriff der „relativen Erfindungsdichte“ geprägt und für die Zeit von 5500 v. Chr. bis heute graphisch veranschaulicht.

An jedem Punkt der geschichtlichen Entwicklung werden die technischen Erfindungen in ihrer Wechselbeziehung zu den gesellschaftlichen Verhältnissen dargestellt. Am Ende dieses umfassenden Überblicks über den technischen Fortschritt von sieben Jahrtausenden und seine Auswirkungen auf die Lebensweise der Menschen steht der wissenschaftlich begründete Glaube an eine Zukunft, in der Krieg und Armut überwunden sein werden — der Glaube an eine kommende Welt des Überflusses für alle.

288 Seiten, 28 Kunstdruckbeilagen

SCHÖNBRUNN-VERLAG WIEN





ZBPH



+P8063606