

Richard P. Feynman

Vom Wesen physikalischer Gesetze

Vorwort zur deutschen Ausgabe von Rudolf Mößbauer

Aus dem Amerikanischen von Siglinde Summerer
und Gerda Kurz

Mit 33 Abbildungen



Piper
München Zürich

Wissenschaftliche Beratung für die deutsche Ausgabe: Johann Plankl

Das Umschlagfoto zeigt den Autor während eines Vortrags an der Universität Wuppertal im Jahr 1977.

Die Originalausgabe erschien 1967 unter dem Titel »The Character of Physical Law« bei The M.I.T. Press, Cambridge/Massachusetts und London.

ISBN 3-492-03321-0

© 1965 by Richard Feynman

Deutsche Ausgabe:

© R. Piper GmbH & Co. KG, München 1990

Gesetzt aus der Times-Antiqua

Satz: Fotosatz Otto Gutfreund, Darmstadt

Druck und Bindung: May & Co, Darmstadt

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort zur deutschen Ausgabe	7
Vorwort	13
Einführung durch den Rektor der Cornell University . .	17
1. Das Gravitationsgesetz – Schulbeispiel für ein physikalisches Gesetz	19
2. Die Beziehung zwischen Mathematik und Physik . .	48
3. Die großen Erhaltungssätze	77
4. Die Symmetrie im physikalischen Gesetz	106
5. Die Unterscheidung von Vergangenheit und Zukunft	135
6. Wahrscheinlichkeit und Unbestimmtheit – Natur in quantenmechanischer Sicht	157
7. Auf der Suche nach neuen Gesetzen	183
Register	213

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Zu den Höhepunkten im Leben einer amerikanischen Universität zählen zweifellos jene Veranstaltungen, bei denen auswärtige Redner über Themen von allgemeinem Interesse berichten. Solche Vorträge oder Vortragsserien, die sich vielleicht mit der Bezeichnung Studium Generale umschreiben lassen, sind bei Studenten und Professoren gleichermaßen beliebt, vermitteln sie doch, über den Horizont der eigenen Tätigkeit hinausgehend, Einblicke in andere Wissensbereiche und in übergeordnete Zusammenhänge. Ein Beispiel hierfür sind die alljährlich veranstalteten »Messenger Lectures« an der Cornell-Universität in Ithaca (Staat New York), einer jener privaten amerikanischen Universitäten, die landesweit die Standards setzen, an denen sich auch staatliche Universitäten messen lassen müssen.

Es war im Jahre 1964, als Richard Feynman, Professor für Theoretische Physik an dem gleichfalls privaten California Institute of Technology, an seine ehemalige Hochschule in Ithaca zurückkehrte, um dort im Rahmen von sieben »Messenger Lectures« über das *Wesen physikalischer Gesetze* zu berichten. Richard Feynman, oder Dick Feynman, war einer der Giganten der Physik dieses Jahrhunderts. Sein enormes weltweites Ansehen resultierte nicht nur aus seiner wissenschaftlichen Tätigkeit, sondern beruhte auch auf seinem großen didaktischen Geschick, das gleichermaßen Kollegen, Studenten und eine allgemeine Öffentlichkeit in seinen Bann ziehen konnte. Zu seinen wissenschaftlichen Arbeiten zählen neben seinen fundamentalen Beiträgen zur Entwicklung der Quantenelektrodynamik, die ihm 1965 zusammen mit Tomo-

naga und Schwinger den Nobelpreis eingebracht haben, seine gleichermaßen fundamentalen Beiträge zur Theorie der schwachen Wechselwirkung und zu vielen anderen Bereichen der Physik, insbesondere die von ihm entwickelten berühmten Feynman-Diagramme, die heute in jedem Laboratorium zur übersichtlichen graphischen Beschreibung und zur mathematischen Formulierung von Reaktionen und Wechselwirkungen verwendet werden.

Generationen von Studenten in aller Welt benützen für ihr Studium die berühmten Feynman Lectures. Sie sind ein ganz ungewöhnlich gut durchdachter Querschnitt durch die Grundlagen der Physik. Die ungeheure, ihm auch von den Studenten entgegengebrachte Wertschätzung und Verehrung fand ihren Ausdruck in einem riesigen Banner, das die Studenten seiner Hochschule am Morgen nach seinem Todestag am Turm der Bibliothek anbrachten und das die Aufschrift trug: »We love you Dick«.

Ein wesentlicher Teilaspekt seiner vielfältigen Persönlichkeit war die einmalige Fähigkeit, sein tiefgehendes Verständnis physikalischer Phänomene und seine fundamentalen Einsichten an Kollegen und Schüler weiterzugeben. Auch die hier präsentierten Vorlesungen geben Zeugnis von seinen außerordentlichen didaktischen Fähigkeiten. Jeder, der wie der Autor dieser Zeilen das Glück hatte, in seiner Nähe zu arbeiten, kann den ungeheuren Verlust ermessen, den die gesamte wissenschaftliche Welt erlitt, als Dick Feynman am 15. Februar 1988 im Alter von 70 Jahren von uns ging. Er war ein ganz ungewöhnlicher theoretischer Physiker, der nicht nur souverän die mathematischen Hilfsmittel seines Metiers zu handhaben wußte, sondern darüber hinaus auch laufend bemüht war, eine Übertragung abstrakter physikalischer Gedankengänge in eine anschauliche und allgemein verständliche Sprache vorzunehmen. Es ist ja häufig ein langer Weg von der Entdeckung einer neuen physikalischen Erscheinung oder einer neuen Theorie bis hin zu ihrem vollständigen Verständnis. Die berühmte Strahlungsformel von Max Planck, zunächst auf

mathematischer Grundlage entstanden und erst sehr viel später in ihrem physikalischen Gehalt erkannt, ist hierfür ein bekanntes Beispiel. Häufig ist es dann nochmals ein weiter Weg bis zu einer anschaulichen Interpretation längst bekannter physikalischer Sachverhalte. Musterbeispiele hierfür sind die Interpretationen der Einsteinschen Theorien der Relativität. Feynman war über alle Maßen befähigt und auch willens, komplizierte physikalische Gedankengänge auf einfache Weise zu deuten. Sein fortlaufendes Bemühen, physikalische Prozesse zu durchdenken, war eng verknüpft mit seiner Bereitschaft, zu jeder Zeit über jedes beliebige Problem zu diskutieren. Berühmt war ein wöchentliches Seminar, bei dem die Teilnehmer aufgefordert waren, wissenschaftliche Fragen zu stellen, deren Beantwortung er dann ohne jede Vorbereitung aus dem Stegreif formulierte.

Gleich am ersten Tag nach Aufnahme meiner eigenen Tätigkeit in Pasadena überschüttete mich Dick bei einem Mittagessen geradezu mit Vorschlägen für neue Experimente, wobei ich damals große Mühe hatte, seinem amerikanischen Akzent zu folgen. Bereits eine Woche später verbrachte ich einen ganzen Tag in dem mit einer großen Wandtafel ausgestatteten Keller seines Hauses, um seine Hilfe für die Lösung offener Probleme in Anspruch zu nehmen. Er als Theoretiker untersagte mir bei diesen Diskussionen zu meinem größten Erstaunen die Verwendung von mathematischen Formulierungen mit der Begründung, daß die Mathematik ja dann nachgeholt werden könne, wenn die Lösungen erst einmal klar wären. Dies war typisch für seine intuitive Denkweise, die ihn auch für uns Experimentalphysiker zu einem idealen Gesprächspartner machte. Ungeachtet seines leidenschaftlichen Engagements im Bereich der Physik, war Feynman keineswegs ein einseitig orientierter Mensch. Zu seinen vielen Aktivitäten gehörte unter anderem auch ein einjähriger Aufenthalt als Student am Biologie-Department seiner kalifornischen Hochschule, zählte sein professionell betriebenes Studium des Aktzeichnens ebenso wie seine effiziente Teilnahme an der

Untersuchungskommission zur Aufklärung der Ursachen des Absturzes der amerikanischen Raumfähre »Challenger«.

Angesichts der inzwischen verstrichenen 26 Jahre entsprechen die hier in Übersetzung vorliegenden »Messenger Lectures« aus dem Jahre 1964 ihrem Inhalt nach natürlich nicht überall dem neuesten Stand. So gab es damals eine Fülle von Elementarteilchen, und es war noch nicht bekannt, daß alle diese Teilchen sich auf eine kleine Zahl von Grundbausteinen, die sogenannten Quarks und die Leptonen, zurückführen lassen. Ebenfalls noch nicht entwickelt waren die modernen Eichtheorien, die heute eine entscheidende Rolle bei der Deutung der in der Natur auftretenden Wechselwirkungen spielen. Feynmans Vorträge beschäftigen sich jedoch in erster Linie mit den hinter den physikalischen Gesetzen stehenden übergeordneten Prinzipien. Eben solche Prinzipien sind heute noch gültig, wenn auch ihre Erforschung in der Zwischenzeit große Fortschritte gemacht hat, Fortschritte, an denen Feynman einen nicht unwesentlichen Anteil hat. Für die meisten Menschen, die Physik in ihrer Gymnasialzeit erleben durften oder mußten, ist dieses Fach sicher ein Sammelsurium von unzusammenhängenden Erscheinungen geblieben. Es hat bei vielen gerade deswegen einen abschreckenden Eindruck hinterlassen. Auch mir ist es in dieser Hinsicht nicht anders gegangen, und wenn ich dennoch Physik studiert habe, so lag dies nur daran, daß ich doch irgendwie das Gefühl hatte, hinter dem Ganzen müsse mehr an Ordnung und Schönheit herrschen, als in der Schule vermittelt wurde.

Es sind gerade diese ordnenden Prinzipien, die Feynman in seinen »Messenger Lectures« einem allgemeinen akademischen Publikum nahebringen wollte. Werner Heisenberg machte den vergeblichen Versuch, die ganze Physik auf eine Weltformel zurückzuführen. Dick Feynman ist hier bescheidener, aber auch realistischer. Zwar ist er durchaus der Meinung, daß die zwei Kulturen C. P. Snows letztlich dadurch entstanden sind, daß ein Verständnis naturwissenschaftlicher Prozesse nur auf mathematischer Basis möglich ist und diese

damit für eine der beiden Kulturen notwendig ein Buch mit sieben Siegeln bleiben. Doch versteht er es in seinen hier präsentierten Vorlesungen meisterhaft, unter fast vollständiger Vermeidung mathematischer Begriffe dem Leser darzulegen, welche allgemeinen Prinzipien hinter jenen Naturgesetzen stehen, wie wir sie heute kennen. Feynman befleißigte sich in allen seinen verbalen Äußerungen nie einer hochgestochenen Sprache. Er drückte sich immer einfach und klar aus. Seine Vorträge waren nie akademisch-würdevoll, sie boten vielmehr ein sprühendes Feuerwerk von Gedanken und Ideen, das seine Zuhörer intellektuell anregen und zu Begeisterungstürmen hinreißen konnte. Leider kann das geschriebene Wort nur einen matten Abglanz von der Wirkung dieses ungewöhnlichen Lehrers und Wissenschaftlers vermitteln, der für alle, die ihn erleben durften, Vorbild war und dies auch immer bleiben wird.

Garching, im März 1990

Rudolf Mößbauer

Vorwort

Bei den sieben Kapiteln des vorliegenden Buches handelt es sich um Vorträge, die im Rahmen der von der Cornell University (USA) seit 1924 alljährlich veranstalteten »Messenger Lectures« gehalten wurden. Die Zuhörerschaft waren Studenten, die ganz allgemein mehr *Vom Wesen physikalischer Gesetze* wissen wollten. Den Vorlesungen lag kein ausgearbeitetes Manuskript zugrunde, sie wurden anhand einiger Notizen *ex tempore* gehalten.

Die von Hiram J. Messenger, Doktor und Professor der Mathematik, gestiftete Einrichtung soll der Cornell University die Möglichkeit bieten, hervorragende Persönlichkeiten aus aller Welt zu einer »Vorlesung oder Vorlesungsreihe über die Entwicklung der Zivilisation« einzuladen. Zweck der Vorträge ist, »den moralischen Standard unseres politischen, beruflichen und gesellschaftlichen Lebens zu heben«.

Im November erging die Einladung, die Vorlesungen für 1964 abzuhalten, an den bekannten Physiker und Pädagogen Professor Richard P. Feynman, ehemals selber Professor an der Cornell University, heute Professor für Theoretische Physik am California Institute of Technology und seit kurzem Ausländisches Mitglied der Royal Society. Professor Feynman hat sich nicht nur durch seinen Beitrag zum gegenwärtigen Verständnis der physikalischen Gesetze, sondern auch durch seine Fähigkeit, das Thema Nichtphysikern nahezubringen, einen Namen gemacht.

Die folgenden Kapitel sind Niederschriften der Vorträge, die Professor Feynman vor überfülltem Auditorium auf einer großen Bühne hielt, auf der er seinem bekanntermaßen durch

Ausdruckskraft und Gestik mitreißenden Vortragsstil ungehindert freien Lauf lassen konnte.

Das vorliegende Buch bietet sich jenen, die die Vorlesungen am Fernsehschirm verfolgen möchten, als Führer oder Gedächtnisstütze an. Wiewohl in keiner Weise als Lehrbuch gedacht, wird es dem um ein klareres Verständnis der Gesetze bemühten Physikstudenten dank der Fülle seiner Argumente eine Hilfe sein.

Den Hörern von BBC-1 ist Richard Feynman bereits aus Philip Dalys Physiker-Sendung *Men at the Heart of Matter* sowie durch seinen großartigen Beitrag zu *Strangeness minus three*, einer der faszinierendsten Reihen über die jüngsten wissenschaftlichen Entdeckungen von 1964, bekannt.

Die Nachricht, daß der für seine Vorlesungen weit über die Grenzen der Vereinigten Staaten hinaus berühmte Professor in diesem Jahr die »Messenger Lectures« halten werde, rief sofort das Science und Features Department der BBC auf den Plan. Es wurde beschlossen, die Reihe im Rahmen des Fortbildungsprogrammes der BBC-2 in Fortsetzung der Vorlesungen so namhafter Leute wie Bondi (über Relativität), Kendrew (über Molekularbiologie), Morrison (über Quantenmechanik) und Porter (über Thermodynamik) auszustrahlen.

Die von meiner Assistentin Fiona Holmes und mir nach den Vorlesungen zusammengestellte Niederschrift wurde von Professor Feynman auf ihren wissenschaftlichen Gehalt überprüft. Wir hoffen, daß das Buch Anklang findet. Mit Richard Feynman zusammenzuarbeiten, gehört zu den ersprießlichen Erfahrungen, und wir zweifeln nicht, daß Fernsehzuschauer wie Leser großen Gewinn aus diesem Projekt ziehen werden.

Alan Sleath, *Producer BBC Outside Broadcasts*
Science and Features Department, Juni 1965

Die BBC dankt dem Cornell University News Bureau für die Erlaubnis, Tafel 2 und dem California Institute of Technology für die Genehmigung andere, in Vorlesung 1 zugrunde gelegte Fotografien und Zeichnungen zu reproduzieren.

Studenten, die sich eingehender mit Professor Feynmans Arbeit befassen möchten, seien darauf hingewiesen, daß die vom Leiter in der Einführung erwähnten Bücher unter dem Titel *The Feynman Lectures in Physics* vom California Institute of Technology herausgebracht wurden.

Einführung des Vortragenden der »Messenger Lectures« 1964 durch den Rektor der Cornell University, Dale R. Corson

Meine Damen und Herren, ich habe die Ehre, Ihnen Professor Richard P. Feynman vom California Institute of Technology vorzustellen, der die diesjährigen »Messenger Lectures« halten wird.

Professor Feynman hat sich in der theoretischen Physik einen Namen gemacht und einen wesentlichen Beitrag zu der spektakulären Entwicklung der Physik in der Nachkriegszeit geleistet, war er doch maßgeblich daran beteiligt, daß Ordnung in das Durcheinander kam. Von den vielen Ehrungen und Auszeichnungen, die ihm zuteil wurden, möchte ich hier nur den Albert Einstein Award von 1954 erwähnen. Diese alle drei Jahre verliehene Auszeichnung besteht aus einer Goldmedaille und einer ansehnlichen Geldsumme.

Professor Feynman, der am M.I.T. studiert und in Princeton promoviert hat, arbeitete am Manhattan Projekt in Princeton und später in Los Alamos mit. 1944 nahm er den Ruf zum Assistant Professor in Cornell an, obwohl er sich erst nach Kriegsende hier niederließ. Neugierig, was im Protokoll über seine Ernennung stand, suchte ich die Sitzungsberichte unseres Treuhänderausschusses heraus und ... fand nichts. Die späteren Eintragungen, gut zwanzig, bezogen sich auf Beurlaubungen, Gehaltserhöhungen und Beförderungen. Eine Notiz sprang mir besonders ins Auge. Am 31. Juli 1945 schrieb der Vorsitzende der Fachschaft Physik an den Dekan der Geisteswissenschaften: »Dr. Feynman ist ein hervorragender Lehrer und Forscher, wie sich so schnell kein zweiter fin-

det.« Für ein solch ausgezeichnetes Mitglied der Fakultät erschien ihm ein Jahresgehalt von dreitausend Dollar denn doch etwas zu wenig und so schlug er eine Erhöhung um neunhundert Dollar vor. In einer Anwendung von ungewohnter Großzügigkeit und ohne Rücksicht auf den Etat der Universität strich der Dekan neunhundert aus und macht einen runden Tausender daraus. Sie sehen, was uns Professor Feynman schon damals wert war. Ende 1945 zog Feynman dann nach Cornell und brachte fünf äußerst fruchtbare Jahre an unserer Fakultät zu. 1950 wechselte er an das Cal. Tech. über, wo er seitdem lehrt.

Bevor ich ihn selber zu Wort kommen lasse, möchte ich Sie noch etwas mit seiner Persönlichkeit vertraut machen. Vor drei oder vier Jahren übernahm er am Cal. Tech. einen Einführungskursus in Physik, der seinem Ruhm eine neue Dimension hinzufügte. Diese Vorlesungen, die das Thema auf eine herzerquickend unbekümmerte Weise angehen, liegen in zwei Bänden gedruckt vor.

Im Vorwort dieses Werks findet sich ein Foto von Feynman, das ihn beim Schlagen der Bongo zeigt. Wenn man meinen Bekannten vom Cal. Tech. glauben darf, taucht er in Los Angeles ab und an in einem Nachtlokal auf und übernimmt den Part des Trommlers; Professor Feynman allerdings bestreitet das. Eine andere Spezialität von ihm ist, Safes zu knacken. So soll er einmal an geheimem Ort ein Geheimdokument aus einem Safe entwendet und einen Zettel hinterlassen haben: »Wer könnte es wohl gewesen sein?« Auch über die Zeit, als er Portugiesisch lernte, ehe er eine Vorlesungsreihe in Brasilien hielt, gäbe es einiges zu berichten, aber das Gesagte umreißt den Mann wohl hinreichend.

So möchte ich nun noch meiner Freude darüber Ausdruck verleihen, Professor Feynman wieder in Cornell begrüßen zu dürfen, und das Thema seiner Vorlesungsreihe bekanntgeben: *Vom Wesen Physikalischer Gesetze*. Heute abend wird er über »Das Gravitationsgesetz – Schulbeispiel für ein physikalisches Gesetz« sprechen.

1. Das Gravitationsgesetz – Schulbeispiel für ein physikalisches Gesetz

Es ist seltsam, aber in den wenigen Fällen, da ich in der Öffentlichkeit als Trommler auftrat, hat es nie jemand für nötig erachtet, meine Tätigkeit als theoretischer Physiker zu erwähnen. Wahrscheinlich, weil wir die Künste höher veranschlagen als die Naturwissenschaften. In der Renaissance forderten die Künstler den Menschen auf, sich in erster Linie mit seinesgleichen zu beschäftigen, und doch gibt es eine ganze Reihe anderer Dinge in der Welt, die unser Interesse verdienen. Selbst die Künstler schätzen Sonnenuntergänge, den Wellengang des Ozeans und den Lauf der Gestirne am Himmel. Mit Fug und Recht können wir also gelegentlich auch über etwas anderes reden. Schon die Betrachtung dieser Dinge bereitet uns ein ästhetisches Vergnügen. Darüber hinaus durchwaltet ein Rhythmus, eine dem leiblichen Auge unsichtbare Regelmäßigkeit zwischen den Naturerscheinungen die Welt, die nur durch die Analyse sichtbar wird und die wir physikalische Gesetze nennen. Ich möchte in dieser Vorlesungsreihe das allgemeine Wesensmerkmal dieser physikalischen Gesetze vorstellen. Wir begeben uns damit, wenn Sie so wollen, auf eine noch oberhalb der Gesetze selbst liegende Ebene der Verallgemeinerung. In Wirklichkeit betrachte ich die Natur dabei als Resultat detaillierter Analysen, auch wenn ich hauptsächlich über ihre allerallgemeinsten Eigenschaften sprechen werde.

Nun läuft man bei einem solchen Thema leicht Gefahr, allzu philosophisch zu werden, und in der Tat gilt es als Ausweis hoher Philosophie, sich in Allgemeinheiten auszu-

drücken, die jedermann begreift. Ich für meinen Teil möchte lieber etwas spezieller bleiben, denn ich will eindeutig und nicht verschwommen verstanden werden. Deshalb werde ich in der ersten Vorlesung versuchen, mich nicht nur allgemein über physikalische Gesetze auszulassen, sondern gleich ein Beispiel anführen. Daran kann ich in der Folge die allgemeinen Aussagen von Fall zu Fall festmachen und so die Realität in eine sonst allzu abstrakte Betrachtung einbeziehen. Als Beispiel für ein physikalisches Gesetz habe ich die Gravitationstheorie, die Phänomene der Schwerkraft, auserkoren. Warum gerade die Schwerkraft, weiß ich selber nicht. Dieses große Gesetz wurde jedenfalls als eines der ersten entdeckt und hat eine interessante Geschichte. Nun sagen Sie vielleicht: »Alles schön und gut, aber das ist ein alter Hut, ich möchte etwas über die modernere Wissenschaft hören.« Über die jüngere vielleicht, aber nicht über die modernere. Die moderne Naturwissenschaft steht exakt in derselben Tradition wie die Entdeckungen des Gravitationsgesetzes. Wir würden lediglich über Entdeckungen aus jüngerer Zeit reden. Ich komme mir mit einer Vorlesung über die Schwerkraft keineswegs altmodisch vor, denn bei der Beschreibung ihrer Geschichte und Methoden, der Art ihrer Entdeckung, ihrer Eigenschaft, bin ich durchaus modern.

Dieses Gesetz wurde als »die bedeutendste Verallgemeinerung« bezeichnet, »die dem menschlichen Geist je geglückt ist«, und wie Sie nach meinen einleitenden Worten bereits ahnen, geht es mir nicht so sehr um den menschlichen Geist als um das Wunder einer Natur, die sich an solch ein elegantes und einfaches Gesetz wie das der Schwerkraft halten kann. Deshalb werden wir unser Augenmerk weniger darauf richten, wie klug wir, die wir all das herausgefunden haben, doch sind, als vielmehr darauf, wie klug die Natur ist, die es befolgt.

Das Gesetz der Gravitation besagt, daß zwei Körper eine Kraft aufeinander ausüben, die umgekehrt proportional dem Quadrat ihrer Entfernung und direkt proportional dem Pro-

dukt ihrer Massen ist. Mathematisch ausgedrückt lautet das große Gesetz:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

(F = Kraft)

eine Konstante multipliziert mit dem Produkt der beiden Massen, dividiert durch das Quadrat der Entfernung. Füge ich nun noch hinzu, daß ein Körper auf eine Kraft durch Beschleunigung reagiert beziehungsweise seine Geschwindigkeit pro Sekunde umgekehrt proportional zu seiner Masse verändert oder, anders gesagt, daß er seine Geschwindigkeit um so mehr verändert, je geringer seine Masse ist, dann habe ich alles Wissenswerte über das Gravitationsgesetz gesagt. Alles andere entpuppt sich als mathematische Folge dieser beiden Dinge. Da ich indessen weiß, daß Sie nicht alle Mathematiker sind und deshalb die Konsequenzen dieser beiden Aussagen nicht auf Anhieb durchschauen können, möchte ich die Geschichte der Entdeckung kurz skizzieren, einige der Konsequenzen aufzeigen und darlegen, wie sich die Entdeckung auf die Weiterentwicklung der Naturwissenschaften ausgewirkt hat und welche Geheimnisse mit einem solchen Gesetz verbunden sind. Schließlich möchte ich noch einen Blick auf die von Einstein vorgenommenen Verfeinerungen werfen und soweit möglich kurz auf die Beziehung zu den anderen Gesetzen der Physik eingehen.

Die Geschichte ist schnell erzählt. Schon in der Antike hatte man die scheinbare Bewegung der Planeten am Himmel beobachtet und daraus geschlossen, daß sie zusammen mit der Erde die Sonne umkreisen. Doch mit der Zeit war diese Entdeckung in Vergessenheit geraten. Als sie später – davon unabhängig – von Kopernikus wieder gemacht wurde, erhob sich die Frage: Wie hat man sich diesen Umlauf um die Sonne genau vorzustellen? Beschreiben die Planeten einen Kreis mit der Sonne im Mittelpunkt oder irgendeine andere Kurve? Wie schnell bewegen sie sich? Und so weiter. Das zu entdecken,

beanspruchte mehr Zeit. Vor allem kam es nach Kopernikus erst einmal zu heftigen Debatten, ob die Planeten und die Erde die Sonne tatsächlich umkreisten oder ob nicht vielmehr die Erde den Mittelpunkt des Universums bildete. Schließlich fand ein Mann namens Tycho Brahe* einen Weg, diese Frage zu beantworten. Er kam auf den Gedanken, erst einmal sehr, sehr sorgfältig zu beobachten, wo die Planeten am Himmel auftauchen, diese Beobachtungen gewissenhaft aufzuzeichnen und dann anhand dieser Aufzeichnungen die alternativen Theorien zu unterscheiden. Damit hatte er den Schlüssel zur modernen Wissenschaft gefunden. Dank diesem Einfall, die Dinge anzuschauen und die Einzelheiten aufzuzeichnen in der Hoffnung, durch die so erlangte Information auf die eine oder andere theoretische Interpretation verwiesen zu werden, begann man die Natur wirklich zu verstehen. Tycho Brahe, ein reicher Mann, der eine Insel bei Kopenhagen besaß, stattete seine Insel mit großen Messingkreisen und speziellen Beobachtungsposten aus und zeichnete Nacht für Nacht den Stand der Planeten auf. Einzig durch so harte Arbeit können wir etwas herausfinden.

Anhand dieser gesammelten Daten versuchte dann Kepler**, die Art der Bewegung der Planeten um die Sonne zu bestimmen. Dazu bediente er sich der Methode des Ausprobierens und Ausklammerns von Irrtümern. Einmal glaubte er schon, die Lösung gefunden zu haben: Die Planeten schienen eine Kreisbahn um die nicht direkt im Mittelpunkt liegende Sonne zu beschreiben. Doch da zeigte sich, daß einer der Planeten, wenn ich nicht irre, war es Mars, acht Bogenminuten abwich, und einen derart großen Fehler traute er Tycho Brahe nicht zu. So schloß er diese Möglichkeit aus und setzte im Vertrauen auf die Präzision der Experimente seine Versuche fort, bis er schließlich dreierlei herausfand.

* Tycho Brahe, 1546–1601, dänischer Astronom

** Johann Kepler, 1571–1630, deutscher Astronom und Mathematiker, Brahes Assistent

Erstens, daß die Planeten eine Ellipse um die in einem Brennpunkt liegende Sonne beschreiben. Eine Ellipse ist eine allen Künstlern wohlbekannte Kurve, da sie ein perspektivisch verkürzter Kreis ist. Ja selbst Kinder verstehen sie zu zeichnen nach dem Rezept: Man ziehe eine Schnur durch einen Ring, befestige die beiden Enden auf einem Blatt Papier, stecke einen Bleistift durch den Ring und fange an zu malen (Abb. 1).

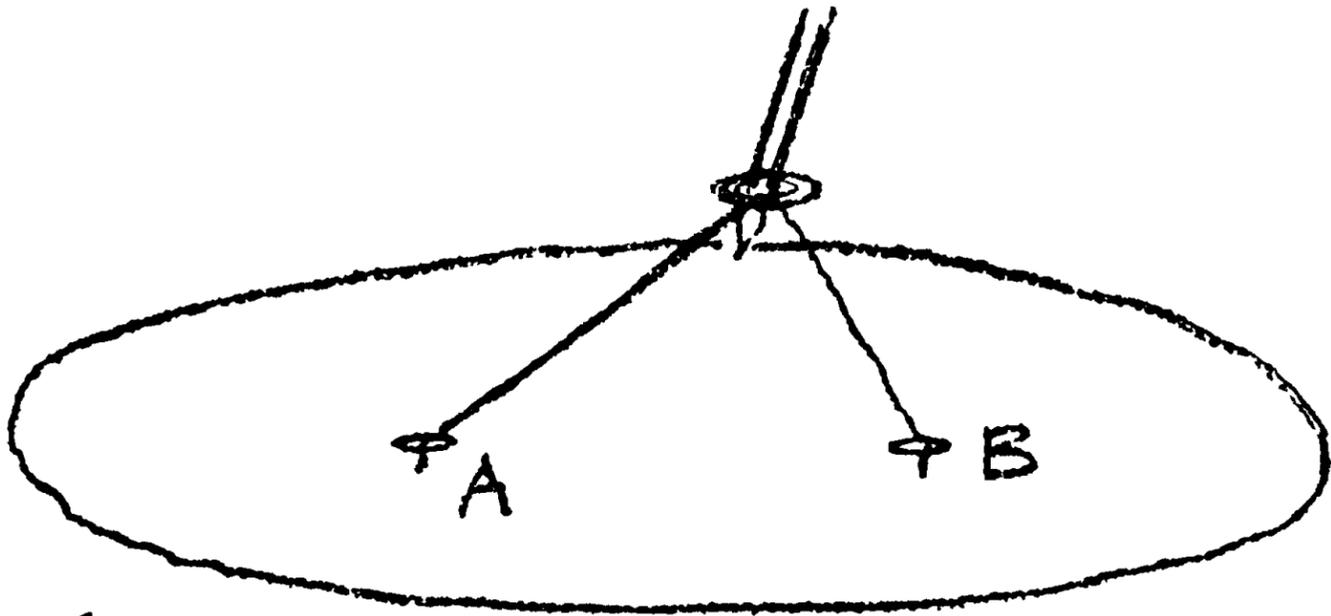


Abbildung 1

Die beiden Punkte A und B sind die Brennpunkte der Ellipse beziehungsweise der Planetenbahn um die in einem dieser Punkte liegenden Sonne. Die nächste Frage lautet: Wie durchläuft der Planet diese Ellipsenbahn? Läuft er schneller, wenn er sich in der Nähe der Sonne befindet? Verlangsamt er sein Tempo, wenn er weiter weg ist? Auch hierauf fand Kepler die Antwort (Abb. 2).

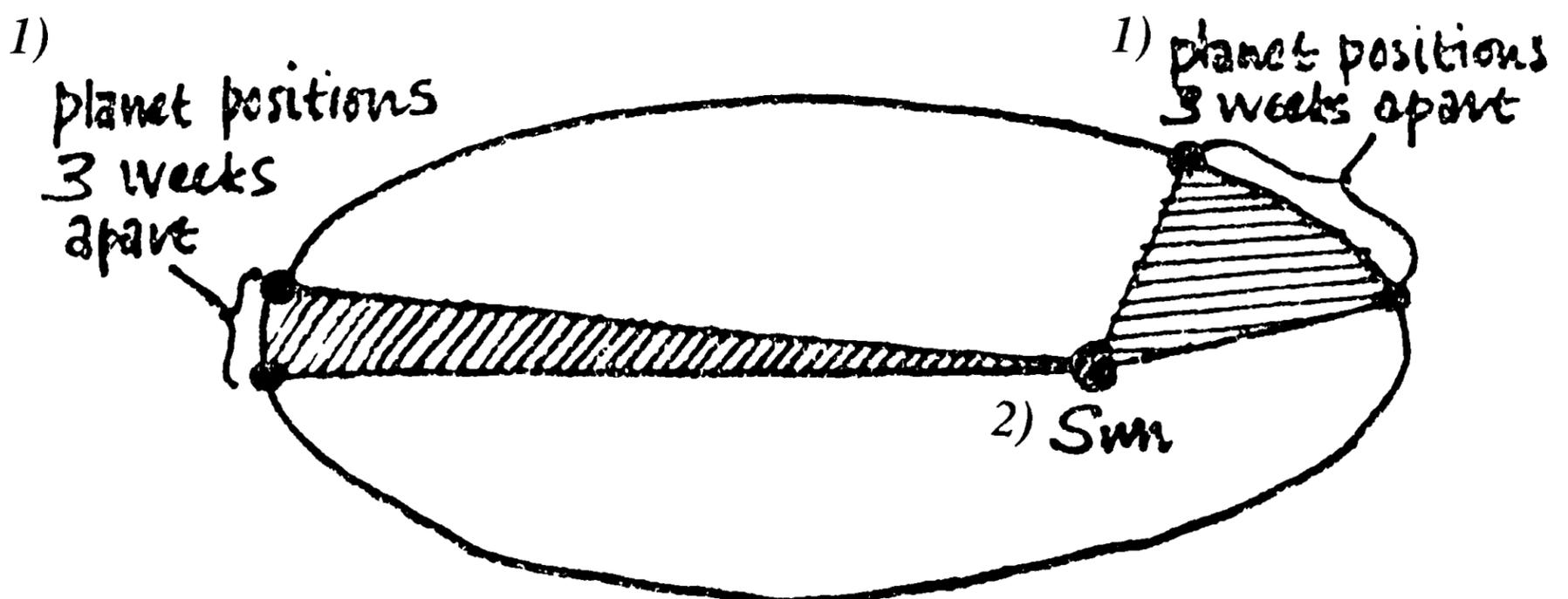


Abbildung 2 1) Stand des Planeten im Abstand von 3 Wochen 2) Sonne

In einem bestimmten Zeitraum, sagen wir drei Wochen, notierte er sich den Stand eines Planeten zu zwei getrennten Zeitpunkten und wiederholte diesen Vorgang an einem anderen Ort der Umlaufbahn. Dann verband er die Sonne durch sogenannte Radiusvektoren mit diesen Punkten und stellte fest, daß die von Umlaufbahn und Radiusvektoren eingeschlossene Fläche in beiden Fällen gleich groß ist. Damit die Fläche an jedem beliebigen Ort der Umlaufbahn unter den gleichen Umständen gleichgroß sein kann, muß der Planet seine Umlaufgeschwindigkeit erhöhen, wenn er näher bei der Sonne ist und verlangsamen, wenn er weiter von ihr entfernt ist.

Einige Jahre später fand Kepler ein drittes Gesetz, das nicht nur die Bewegung eines einzigen Planeten um die Sonne erfaßte, sondern verschiedene Planeten zueinander in Beziehung setzte. Es besagt, daß die Zeit, die der Planet braucht, um die Sonne ganz zu umlaufen, von der Größe der Umlaufbahn abhängt, und daß diese Zeiten mit den Quadratwurzeln der Kuben der Größe der Umlaufbahn variieren, wobei die Größe der Umlaufbahn durch die große Halbachse bestimmt wird. Grob zusammengefaßt lauten die drei Keplerschen Gesetze: *Die Umlaufbahn beschreibt eine Ellipse; in gleichen Zeiten werden gleiche Flächen überstrichen, und die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten variieren mit der dritten Potenz der großen Halbachsen ihrer Bahnen.* Diese drei Gesetze liefern eine vollständige Beschreibung der Bewegung der Planeten um die Sonne.

Als nächstes erhob sich die Frage: Was veranlaßt die Planeten, sich um die Sonne zu bewegen? Manche Zeitgenossen Keplers vermuteten hinter den Planeten Engel, die sie durch den Schlag ihrer Flügel auf ihrer Bahn vorantrieben – eine Antwort, die, wie Sie sehen werden, gar nicht so abwegig ist. Nur daß die Engel an einer anderen Stelle sitzen und ihre Flügel nach innen schlagen.

Mittlerweile erforschte Galilei die Bewegungsgesetze ganz gewöhnlicher Gegenstände auf der Erde. Zu diesem Zweck

führte er eine Reihe von Experimenten durch, um zu sehen, wie Kugeln geneigte Flächen hinunterlaufen, Pendel schwingen und dergleichen mehr und entdeckte dabei ein großes Gesetz: das Trägheitsgesetz. Danach bewegt sich ein Gegenstand, der sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit geradlinig fortbewegt, bis in alle Ewigkeit geradlinig fort, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt. So unglaublich das für jemanden klingt, der einmal versucht hat, einen Ball bis in alle Ewigkeit rollen zu lassen, so trifft doch zu, daß dieser mit gleicher Geschwindigkeit ewig weiterrollen würde, wenn die idealen Bedingungen gegeben wären, das heißt wenn keine Reibung oder dergleichen auf ihn einwirkte.

Daran anknüpfend warf Newton die Frage auf: »Was ist, wenn er sich nicht geradlinig fortbewegt?« Und antwortete: Damit sich die Geschwindigkeit in irgendeiner Weise ändern kann, ist eine Kraft erforderlich. Schubst man beispielsweise eine Kugel in die Richtung, in die sie rollt, wird sie ihre Geschwindigkeit beschleunigen. Stellt man fest, daß sie ihre Richtung ändert, muß eine Kraft seitlich auf sie eingewirkt haben. Diese Kraft kann gemessen werden als das Produkt zweier Faktoren. Dazu mißt man den Betrag, um den sich die Geschwindigkeit in einem kurzen Zeitintervall ändert (diese Änderung nennt man Beschleunigung), multipliziert diesen mit dem als Masse eines Körpers bezeichneten Koeffizienten, dem sogenannten Trägheitskoeffizienten, und erhält so die meßbare Kraft. Man braucht nur einmal einen Stein an einer Schnur über dem Kopf im Kreis herumzuschwingen, um herauszufinden, daß man einen Zug ausüben muß. Der Grund dafür ist, daß der Stein bei der Kreisbewegung zwar nicht seine Geschwindigkeit, aber seine Richtung verändert; es muß eine ständig nach innen ziehende Kraft vorhanden sein, und diese ist proportional zur Masse. Deshalb müßten wir, wenn wir zwei verschiedene Objekte nacheinander mit derselben Geschwindigkeit um den Kopf schwingen wollten, beim einen mehr Kraft aufwenden als beim anderen, und zwar proportional zum Unterschied in der Masse. So lassen sich die

Massen mit Hilfe der zur Veränderung der Geschwindigkeit erforderlichen Kraft messen. Daraus leitete Newton ab, daß, wenn ein Planet die Sonne, um das Beispiel zu vereinfachen, auf einer Kreisbahn umläuft, *keine Kraft erforderlich ist, um ihn seitlich, tangential, von dieser Bahn abweichen zu lassen*; und daß er, wenn keinerlei Kraft auf ihn einwirkt, auf dieser Linie weiterfliegt. Das aber tut er gerade nicht; er befindet sich später mitnichten irgendwo draußen im All, wohin er eilen würde, wenn es keine Kraft gäbe, sondern weiter unten in Richtung Sonne (Abb. 3).

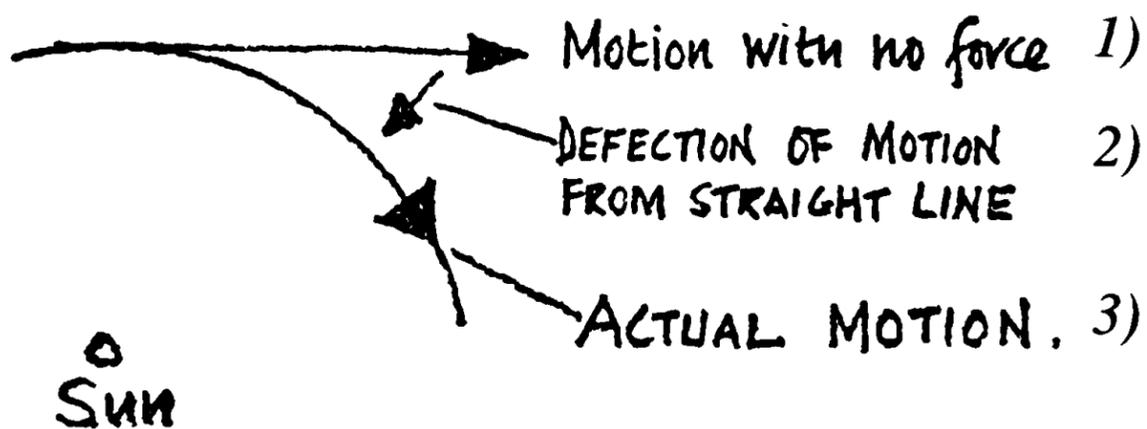


Abbildung 3 1) Bewegung ohne Krafteinwirkung 2) Abweichung der Bewegung von der geraden Linie 3) wirkliche Bewegung

Mit anderen Worten, seine Geschwindigkeit, seine Bewegung, wurde zur Sonne hin abgelenkt. Die Engel müssen ihre Flügel also fortwährend zur Sonne hingewandt schlagen.

Was aber den Planeten geradlinig vorantreibt, wissen wir nicht. Man hat nie herausgefunden, warum sich die Dinge bis in alle Ewigkeit auf dieser Linie fortbewegen. Der Ursprung des Trägheitsgesetzes liegt im dunkeln. Die Bewegung setzt sich fort, obwohl es keine Engel gibt. Um aber den Prozeß des Fallens einzuleiten, ist eine Kraft erforderlich. Der Ursprung dieser Kraft mußte offensichtlich in Richtung Sonne zu suchen sein. Mehr noch, Newton konnte sogar nachweisen, daß sich aus dieser einfachen Vorstellung als unmittelbare Folge der Flächensatz ableiten ließ, daß also, wenn alle Veränderungen der Geschwindigkeit, auch im Fall der Ellipse, exakt auf die Sonne gerichtet sind, in gleichen Zeiten gleiche Flächen überstrichen werden müssen. Wie das im einzelnen zusammenhängt, werde ich Ihnen in der nächsten Vorlesung zeigen.

Von diesem Gesetz ausgehend, bestätigte Newton die Auffassung, daß die Kraft sonnenwärts wirkt. Weiß man nun, wie die Umlaufzeiten der verschiedenen Planeten mit der Entfernung von der Sonne variieren, so kann man bestimmen, wie sich diese Kraft je nach der Entfernung abschwächt. Newton konnte nachweisen, daß sich die Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung verändert.

Damit hatte Newton noch nichts Neues gesagt; er hatte lediglich zwei Aussagen von Kepler mit anderen Worten bekräftigt. Seine eine Behauptung deckt sich mit der Aussage, daß die Kraft in Richtung Sonne wirkt, und die andere mit der Feststellung, daß die Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ist.

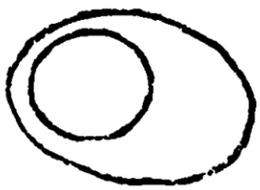
Man hatte aber mit dem Teleskop beobachtet, daß Jupiter von Satelliten umkreist wird und fast so etwas wie ein kleines Sonnensystem bildet, geadeso als würden die Satelliten vom Jupiter angezogen. Auf die gleiche Weise wird der Mond, der die Erde umkreist, von der Erde angezogen. Allem Anschein nach wird alles von allem angezogen. Als nächstes wurde diese Beobachtung verallgemeinert zu dem Satz, daß jeder Körper jeden anzieht. Trifft das zu, muß die Erde den Mond anziehen wie die Sonne die Planeten. Daß die Erde die Dinge anzieht, ist jedoch bekannt – andernfalls würden Sie hier nicht fest auf Ihren Plätzen sitzen, obgleich Sie lieber in der Luft schwebten. Die Anziehungskraft der Erde auf irdische Objekte gehörte zu den durchaus bekannten Phänomenen der Schwerkraft, und da nun verfiel Newton auf die Idee, daß die Kraft, die den Mond auf seiner Umlaufbahn hält, dieselbe Schwerkraft sein könnte, die die Gegenstände zur Erde zieht.

Es ist kein Kunststück auszurechnen, wie weit der Mond in einer Sekunde fällt: Wir kennen die Größe der Umlaufbahn, wir wissen, daß der Mond für eine Umrundung der Erde einen Monat braucht; somit können wir auch sagen, welchen Weg er in einer Sekunde zurücklegt. Haben wir das ausgerechnet, können wir feststellen, um wieviel die Bahn des Mondes unter die gerade Linie gefallen ist, auf der er sich ohne die Anzie-

hungskraft der Sonne fortbewegen würde. Diese Entfernung beträgt 0,127 Zentimeter. Der Mond ist sechzigmal so weit vom Erdmittelpunkt entfernt wie wir. Bei uns beträgt die Entfernung 6436 Kilometer, beim Mond 386 160 Kilometer. Stimmt das Gravitationsgesetz, müßte ein Körper auf der Erdoberfläche in einer Sekunde um $0,127 \text{ Zentimeter} \times 3600$ (dem Quadrat von 60) fallen, da sich die Kraft, bis sie zum Mond hinauskommt, gemäß dem Gravitationsgesetz um 60×60 abgeschwächt hat. $0,127 \text{ Zentimeter} \times 3600$ ergibt knapp fünf Meter. Die Fallgeschwindigkeit auf der Erde beträgt, das wußte man bereits seit Galileis Messungen, rund fünf Meter pro Sekunde. Das bedeutete, daß sich Newton auf dem richtigen Weg befand. Nun gab es kein Zurück mehr, hatte sich doch gezeigt, daß ein neues, zuvor als völlig unabhängig betrachtetes Faktum, die Umlaufzeit des Mondes und die Entfernung der Mondbahn von der Erde, mit einem anderen Faktum, der Fallgeschwindigkeit pro Sekunde auf der Erdoberfläche, zusammenhing. Das war die dramatische Probe aufs Exempel, daß alles stimmte.

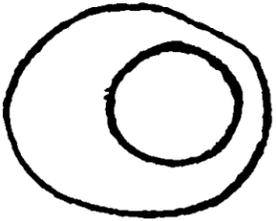
Darüber hinaus machte Newton noch eine Fülle anderer Vorhersagen. So konnte er berechnen, welche Bahn der Planet beschreiben mußte, falls das Gravitationsgesetz zutrifft, und stellte fest, daß es in der Tat eine Ellipse war. Damit hatte er gewissermaßen drei Fliegen mit einer Klappe geschlagen. Außerdem konnte man sich mit einemmal verschiedene neue Phänomene erklären. Beispielsweise die Gezeiten. Sie waren eine Folge der Anziehungskraft des Mondes auf die Erde und ihre Meere. Eine solche Möglichkeit hatte man auch früher schon in Betracht gezogen, war jedoch an der Schwierigkeit gescheitert, daß, falls das Wasser wirklich durch die Anziehungskraft des Mondes aufgestaut wurde, es pro Tag nur eine Flut hätte geben dürfen, und zwar auf der Seite, auf der der Mond stand (Abb. 4).

Wir wissen aber, daß die Gezeiten grob alle zwölf Stunden einsetzen, und daß es pro Tag zwei Fluten gibt. Aufgrund dieser Beobachtung kam eine andere Denkschule zu einem ande-

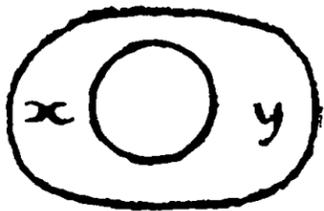


Water pulled partly
away from earth by moon 1)

o Moon 4)



earth pulled partly
away from waters by moon 2)



Actual situation 3)

Abbildung 4

- 1) Mond zieht Wasser teilweise von der Erde weg
- 2) Mond zieht Erde teilweise vom Wasser weg
- 3) wirkliche Situation
- 4) Mond

ren Schluß. Ihrer Theorie zufolge zog der Mond die Erde vom Wasser weg. Der erste, der begriff, was wirklich vor sich geht, war Newton; nämlich daß der Mond bei gleichem Abstand auf Erde und Wasser mit der gleichen Kraft einwirkt und daß das Wasser bei y dem Mond näher, bei x vom Mond weiter entfernt ist als die starre Erde. Deshalb wird bei y das Wasser stärker und bei x weniger vom Mond angezogen als die Erde, so daß sich durch die Kombination beider Bilder die doppelten Gezeiten ergeben. Wodurch aber wird die vom Mond auf die Erde ausgeübte Anziehungskraft im Gleichgewicht gehalten? Dadurch, daß sich die Erde desselben Tricks bedient wie der Mond und sich, genau wie dieser, um ein Gegengewicht gegen die Anziehungskraft des anderen Himmelskörpers zu schaffen, im Kreis bewegt. Der Mittelpunkt dieses Kreises liegt im Erdinneren. Beide, Erde und Mond, kreisen also um denselben Mittelpunkt, wodurch sich die Anziehungskräfte für die Erde ausgleichen, während das Wasser in x weniger und in y stärker vom Mond angezogen wird und so auf beiden Seiten anschwillt. Damit waren nicht nur die Gezeiten und die

Tatsache, daß sie zweimal pro Tag einsetzen, erklärt, sondern noch eine Reihe anderer Dinge: daß die Erde rund ist, weil alles nach innen gezogen wird, aber wiederum nicht ganz rund ist, weil sie sich um die eigene Achse dreht, wodurch die Außenseite ein ganz klein wenig hinausgedrückt wird; warum Sonne und Mond kugelförmig sind und so fort.

In dem Maße, in dem sich die Naturwissenschaften weiterentwickelten und genauere Messungen möglich wurden, mußte sich das Newtonsche Gesetz immer strengere Prüfungen gefallen lassen. Die ersten sorgfältigen Tests beschäftigten sich mit den Jupitermonden. Genaue Beobachtungen ihrer Bewegungen über lange Zeiträume sollten Newtons Formel bestätigen. Die Erwartungen erfüllten sich nicht: einmal eilten die Jupitermonde den errechneten Werten um acht Minuten voraus, einmal hinkten sie um acht Minuten hinterdrein. Und zwar waren sie – eine ziemlich sonderbare Beobachtung – der errechneten Zeit immer dann voraus, wenn sich Jupiter in der Nähe der Erde befand, und später dran, wenn er sich weit von unserem Planeten entfernt hatte. Olaus Römer* vertraute dem Gravitationsgesetz dennoch und kam zu dem interessanten Schluß, daß das Licht eine gewisse Zeit braucht, um von den Jupitermonden zur Erde zu gelangen, daß wir im Teleskop also nicht die Monde sehen, wie sie jetzt sind, sondern wie sie vor der Zeit waren, während der das Licht zu uns unterwegs war. Da das Licht weniger lang braucht, wenn sich Jupiter in unserer Nähe befindet, als wenn er sich weit von uns entfernt hat, konnte Römer die Beobachtungen um die Zeitunterschiede korrigieren und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Monde so viel zu früh oder so viel zu spät waren, die Lichtgeschwindigkeit errechnen. Das war der erste Beweis, daß sich das Licht nicht instantan ausbreitet.

Diese Geschichte habe ich erzählt, um Ihnen zu zeigen, daß ein Gesetz, wenn es richtig ist, zum Aufspüren eines anderen benutzt werden kann. Wenn wir unbeirrbar auf seine Richtig-

* Ole (Olaus) Römer, 1644–1710, dänischer Astronom

keit vertrauen, kann es uns, obwohl etwas nicht zu stimmen scheint, auf ein anderes Phänomen hinweisen. Hätten wir das Gesetz von der Schwerkraft nicht gekannt und mithin nicht gewußt, was wir von den Jupitermonden zu erwarten haben, hätten wir viel länger gebraucht, um die Lichtgeschwindigkeit zu berechnen. Dieser Prozeß hat sich lawinenartig fortgesetzt, eine Entdeckung andere nach sich gezogen, denn jede neue Entdeckung liefert uns das Handwerkszeug für immer weitere. Und so geht es nun seit vierhundert Jahren munter weiter, und noch heute reißt uns diese Lawine mit großer Geschwindigkeit mit sich fort.

Schon tauchte das nächste Problem auf: Die Planetenbahnen sollten keine wirklichen Ellipsen sein, da sie dem Newtonschen Gesetz zufolge nicht allein von der Sonne, sondern auch geringfügig voneinander angezogen werden – ein ganz klein wenig nur, doch genug, damit sich die Bahn um eine Kleinigkeit verändert. Die großen Planeten Jupiter, Saturn und Uranus waren bekannt, und so machte man sich daran, die durch die gegenseitige Anziehung bewirkte geringfügige Abweichung von der von Kepler beschriebenen perfekten Ellipsenbahn zu berechnen. Nach Abschluß der Berechnungen und Beobachtungen stellte sich heraus, daß Jupiter und Saturn der errechneten Bahn folgten, während Uranus gewissermaßen aus der Reihe tanzte. Wieder schienen Zweifel an Newtons Gesetzen angebracht; aber keine Angst! Zwei Männer, Adams und Leverrier*, die die Berechnungen unabhängig voneinander und nahezu zeitgleich durchführten, schlossen aus den Unregelmäßigkeiten der Uranusbewegung auf die Anwesenheit eines unsichtbaren Planeten und schrieben ihren Sternwarten: »Richtet Euer Teleskop auf den und den Ort am Himmel und Ihr werdet einen Planeten finden.« »Wie absurd«, sagte man im einen Observatorium, »da sitzt irgendwo ein Kerl mit gespitztem Bleistift vor einem Blatt Papier und

* John Couch Adams, 1819–1892, englischer Astronom und Mathematiker. Urbain Leverrier, 1811–1877, französischer Astronom

will uns sagen, wo wir einen neuen Planeten finden!« Im anderen Observatorium war man dagegen weniger ... nun, es wurde anders geführt, und man fand Neptun!

In jüngerer Zeit, zu Beginn des 20. Jahrhunderts, zeigte sich, daß auch die Bewegungen des Planeten Merkur nicht ganz der Regel entsprachen. Das verursachte viel Kopfzerbrechen, bis Einstein entdeckte, daß Newtons Gesetze einer kleinen Modifikation bedurften.

Bleibt die Frage nach dem Gültigkeitsbereich des Gravitationsgesetzes. Gilt es nur im Sonnensystem oder darüber hinaus? Tafel 1 beweist, daß sich die Schwerkraft nicht nur im Sonnensystem auswirkt. Auf einer dreiteiligen Bildfolge sehen Sie einen sogenannten Doppelstern. Zum Glück ist noch ein dritter Stern mit im Bild, so daß kein Zweifel daran besteht, daß sie sich wirklich drehen und nicht einfach die Fotos verdreht wurden, was bei astronomischen Aufnahmen leicht einmal passieren kann. Die Sterne drehen sich also tatsächlich, und zwar in der auf Abbildung 5 dargestellten Kurve. Sie

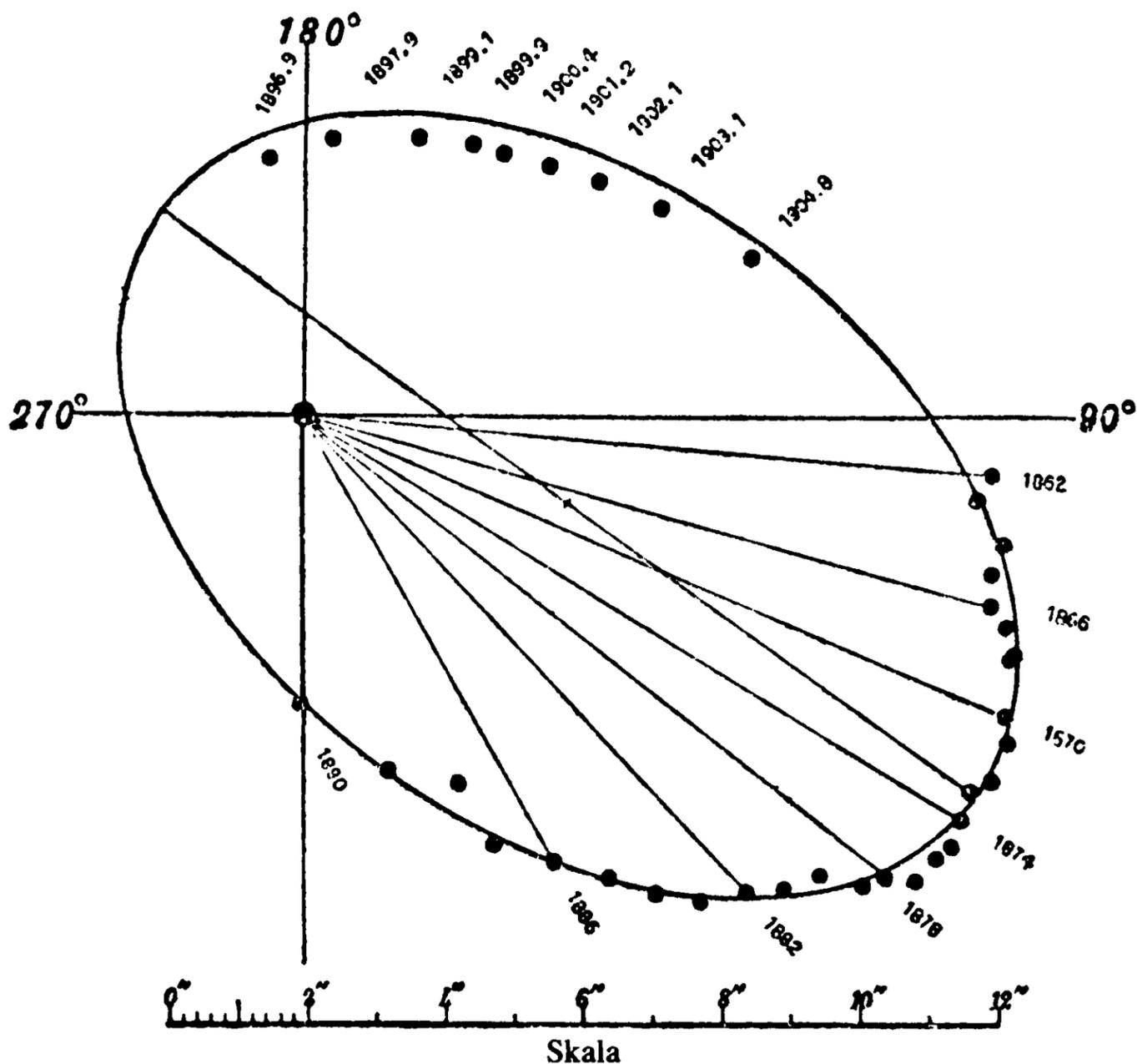
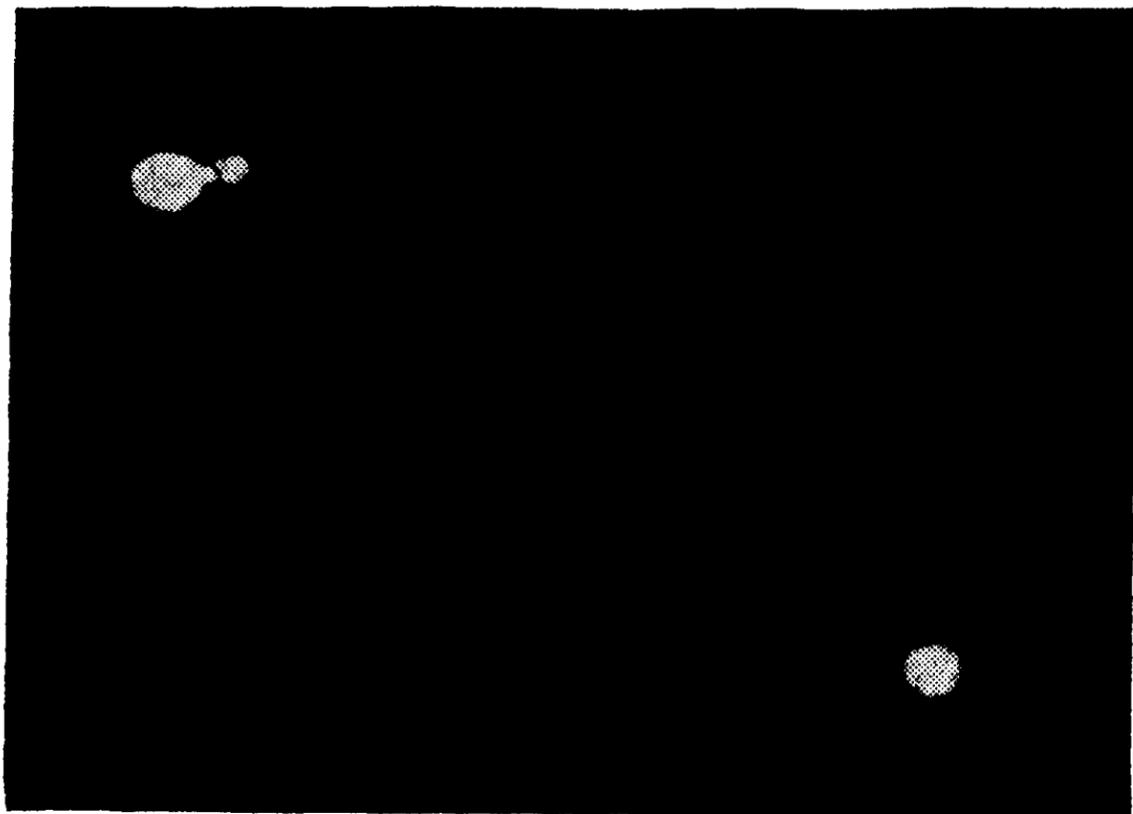


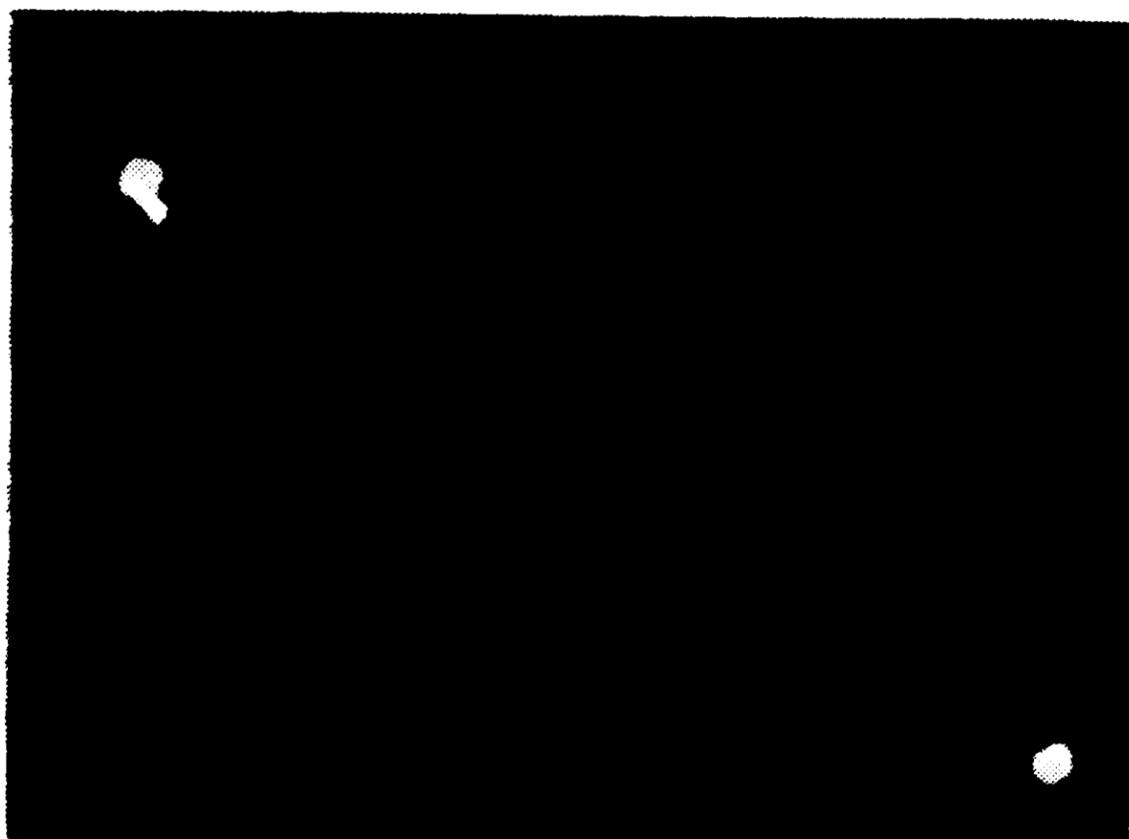
Abbildung 5



21. Juli 1908

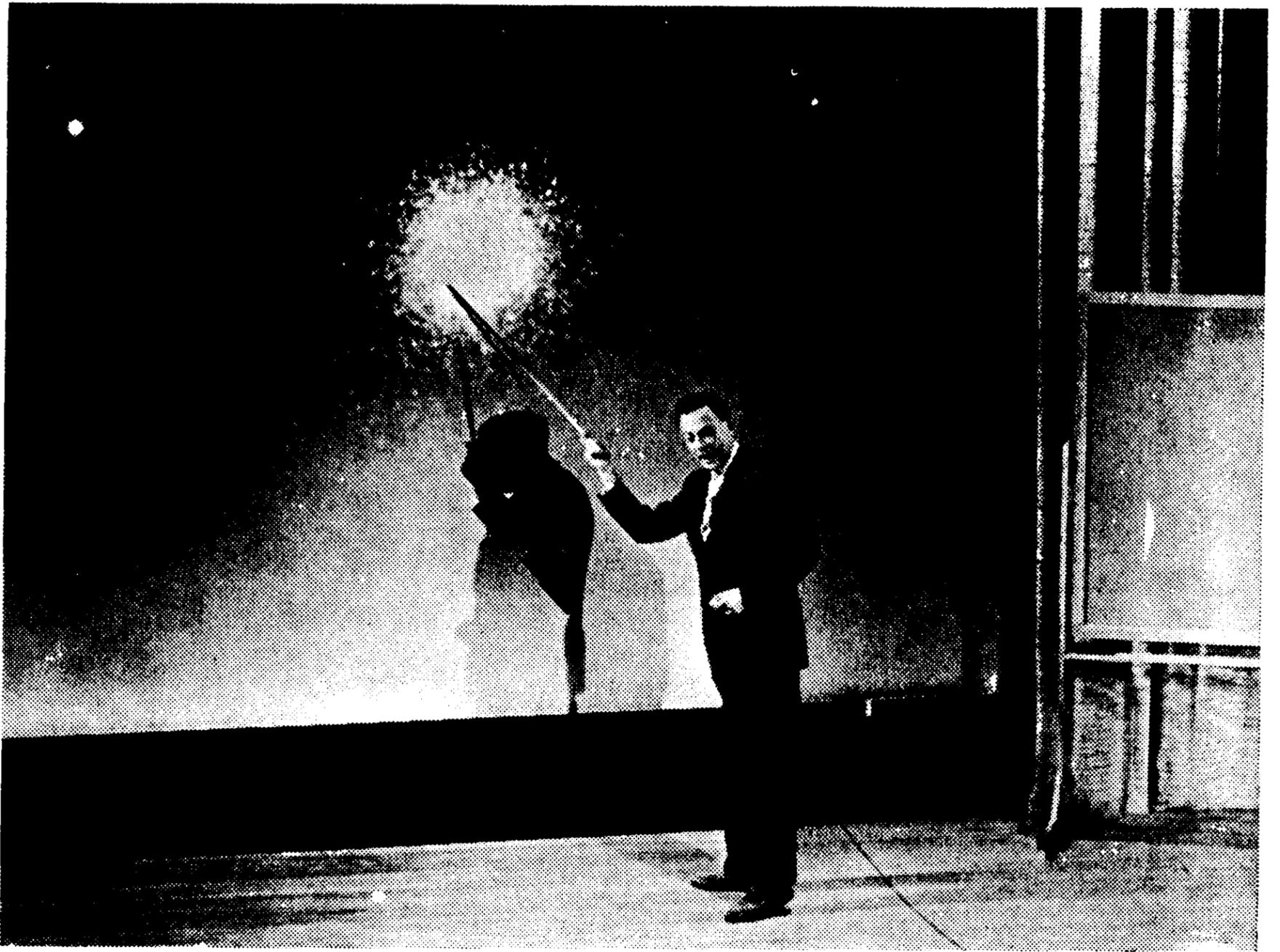


September 1915

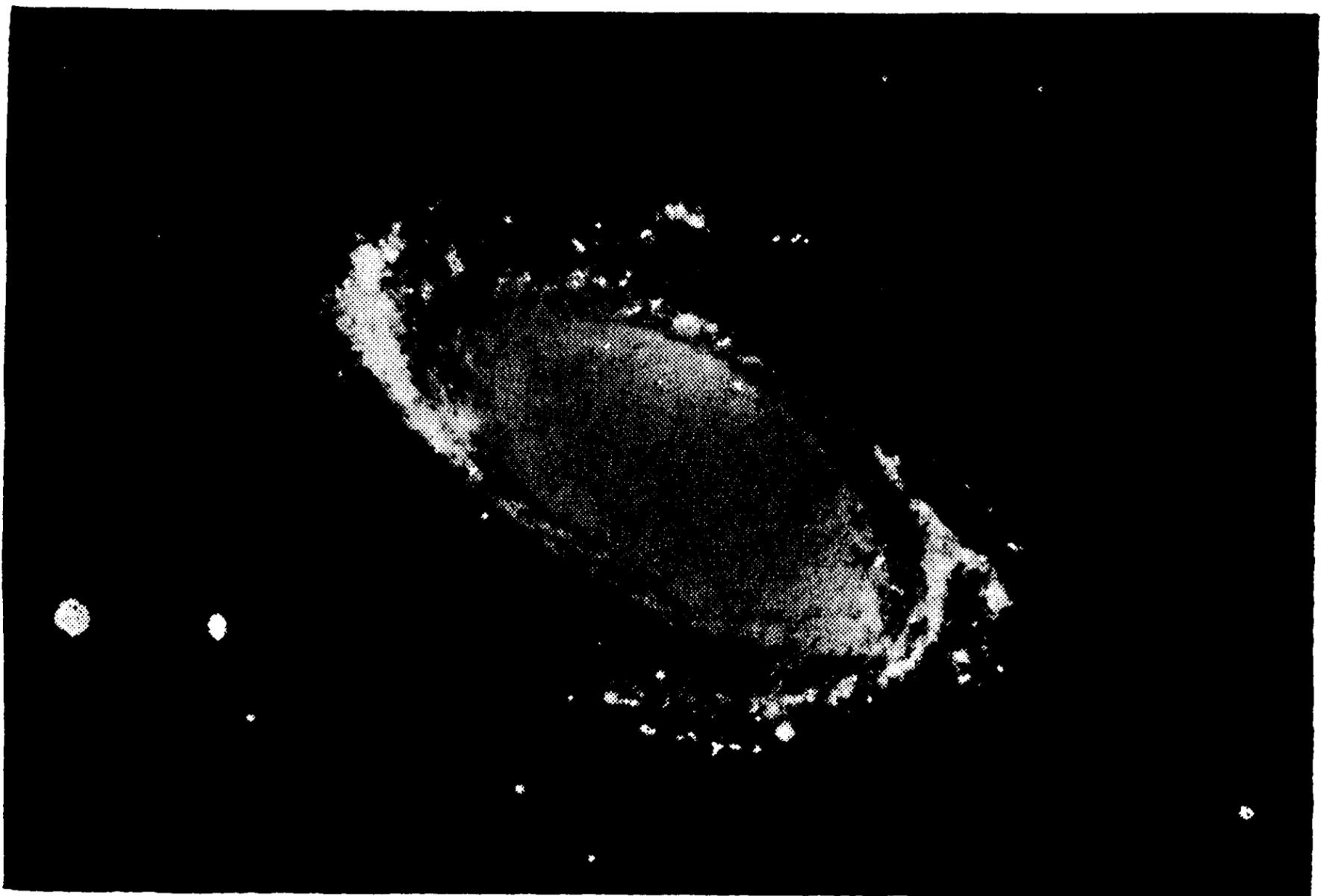


10. Juli 1920

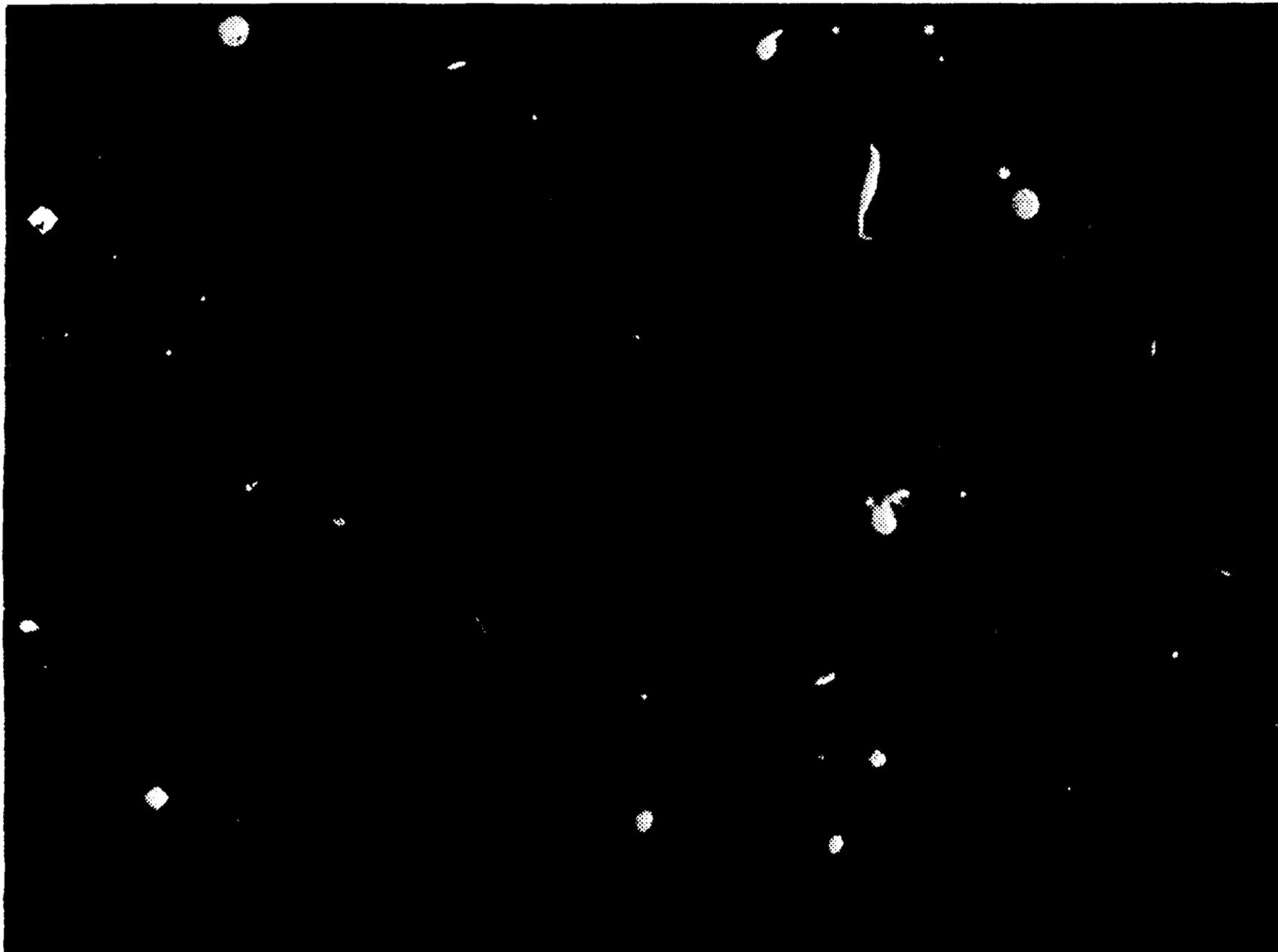
Tafel 1 *Drei zu verschiedenen Zeitpunkten entstandene Aufnahmen vom selben Doppelsternsystem*



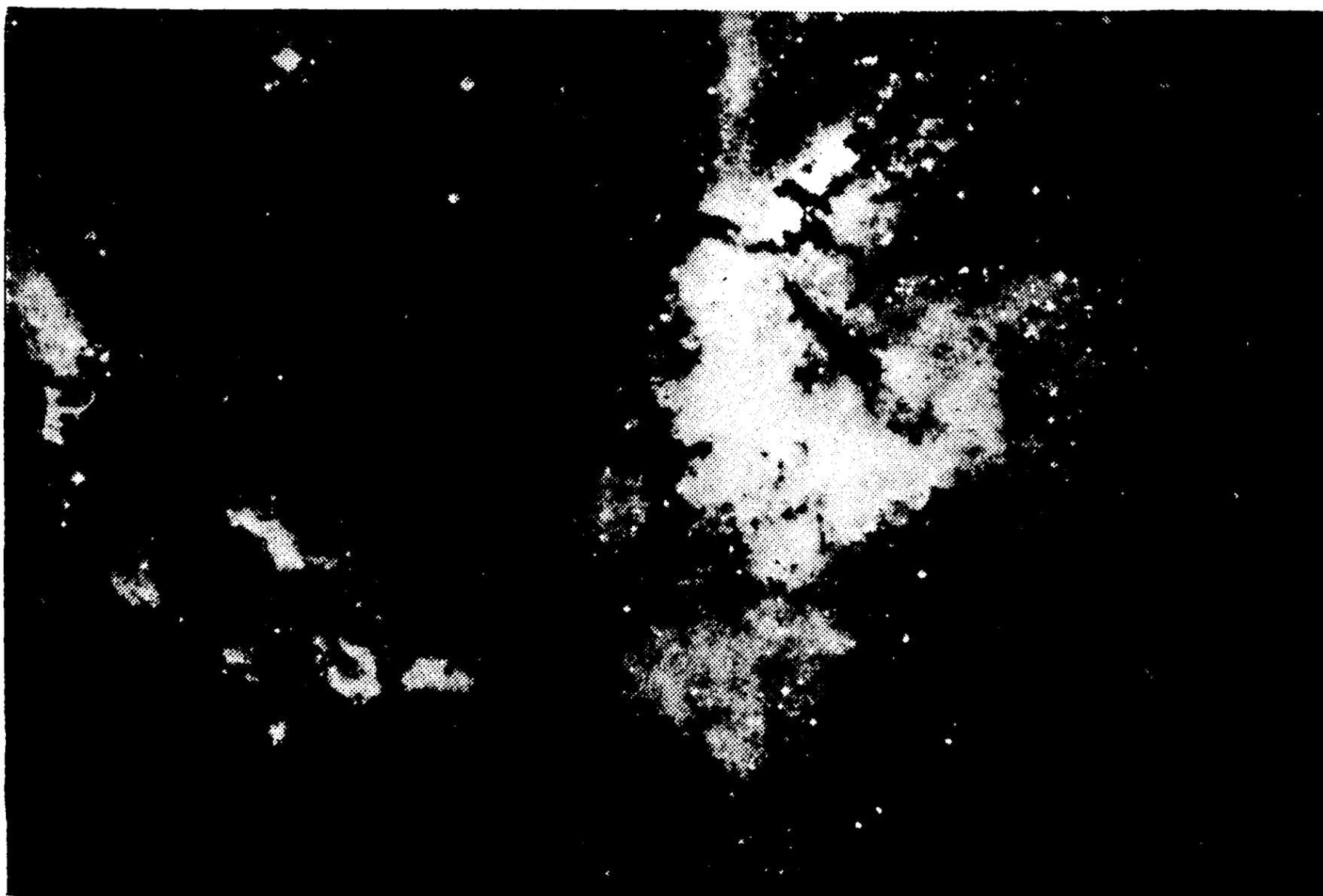
Tafel 2 *Kugelförmiger Sternhaufen*



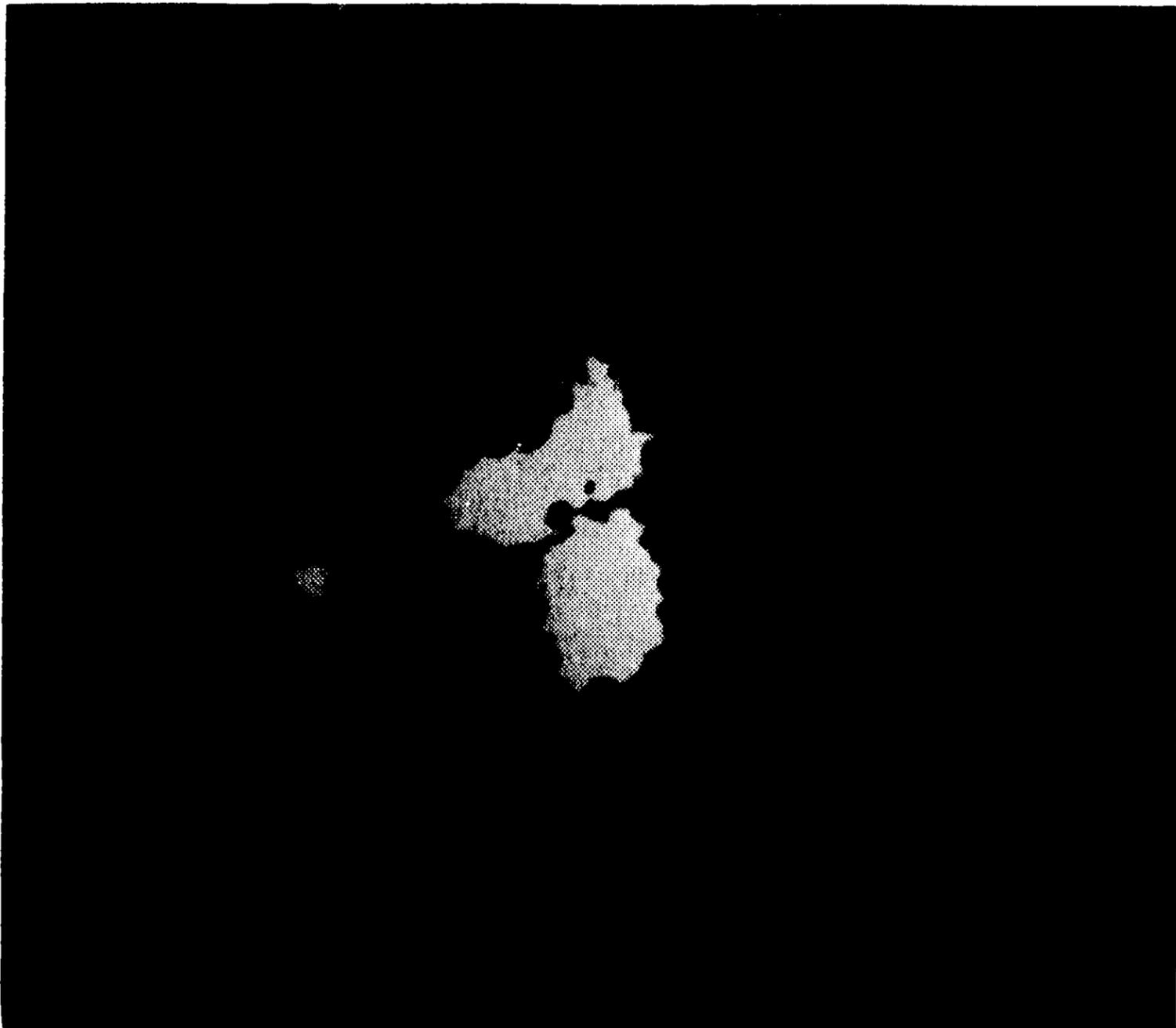
Tafel 3 *Spiralnebel*



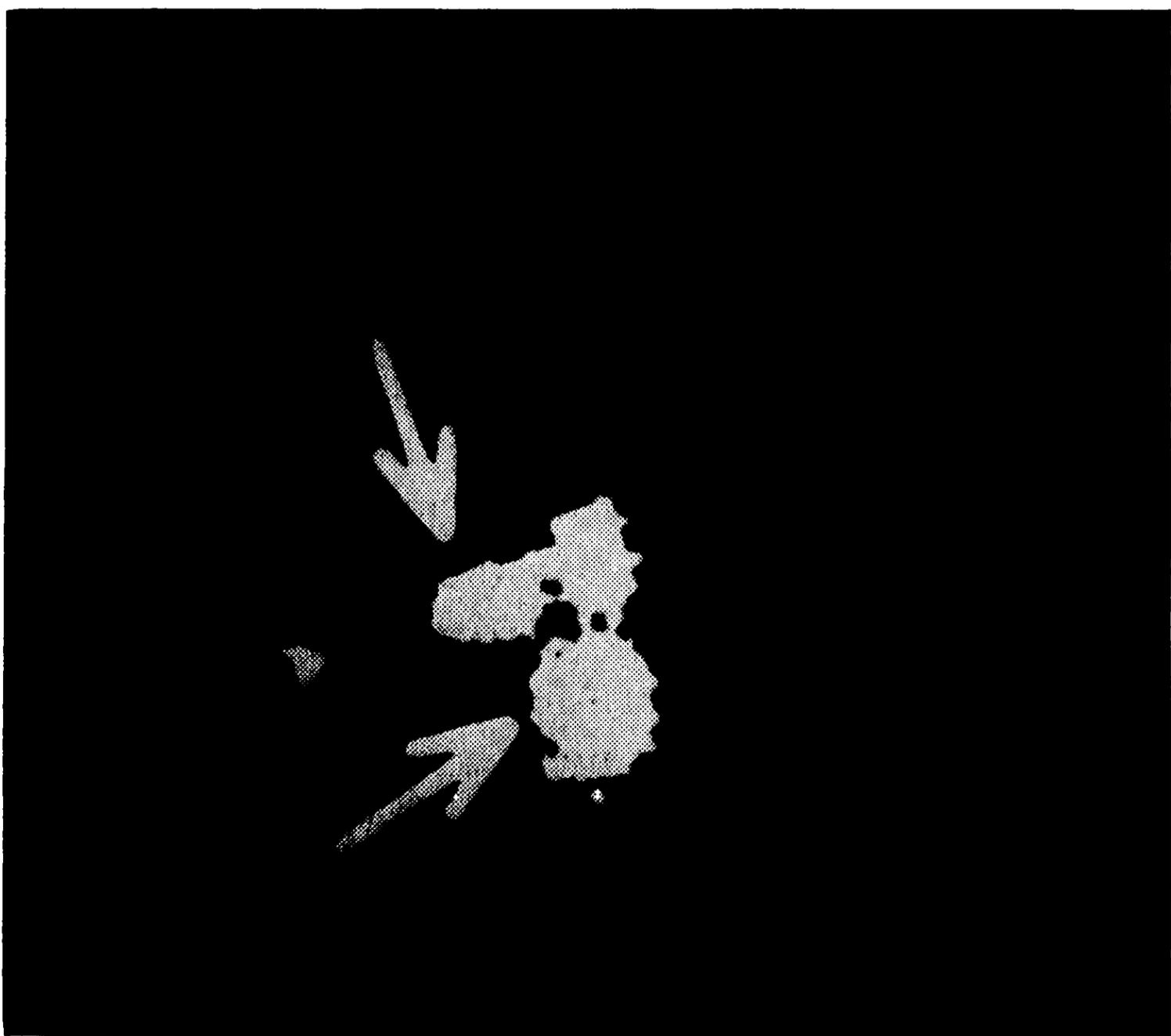
Tafel 4 *Galaxienhaufen*



Tafel 5 *Galaktischer Nebel*



1947



1954

Tafel 6 *Beweis für die Entstehung neuer Sterne*

ziehen einander offensichtlich gegenseitig an und beschreiben, wie erwartet, eine ellipsenförmige Bahn. Die Punkte geben den Ort des im Uhrzeigersinn umlaufenden Gespanns zu verschiedenen Zeitpunkten an. Das alles kommt Ihnen bekannt vor, bis Sie bemerken, falls Sie es nicht schon bemerkt haben, daß der Mittelpunkt nicht in einem Brennpunkt der Ellipse liegt, sondern ein ganzes Stück daneben. Stimmt das Gesetz also doch nicht? Nein, nein, es ist alles in bester Ordnung. Der liebe Gott hat uns die Bahn nur nicht in der Draufsicht präsentiert, sondern in einem absonderlichen, gekippten Winkel. Nehmen Sie eine Ellipse, markieren Sie den Brennpunkt, kippen Sie die Ellipse in einen ungewöhnlichen Winkel und betrachten Sie die auf diese Weise entstandene Projektion: Sie werden feststellen, daß der Brennpunkt der Ellipse nicht im Brennpunkt der Projektion zu sein braucht – weil nämlich die Bahnebene im Raum geneigt ist.

Und wie steht es bei größeren Entfernungen? Wir wissen nun, daß sich die Anziehungskraft zwischen zwei Sternen auswirkt; geht sie womöglich über Entfernungen von zwei oder drei Durchmessern des Sonnensystems hinaus? Auf Tafel 2 haben wir ein Gebilde, das im Durchmesser 100 000mal so groß ist wie das Sonnensystem und sich aus einer Unzahl von Sternen zusammensetzt. Dieser große weiße Fleck ist kein fester weißer Fleck; er sieht nur so aus, weil das Auflösungsvermögen der Instrumente versagt. In Wirklichkeit besteht er aus lauter winzig kleinen Pünktchen, wie andere Sterne auch, die, säuberlich voneinander getrennt, sich selbst dann nicht berühren, wenn sie sich in diesem großen Kugelhafen hin- und herbewegen. Er gehört zu den schönsten Dingen am Himmel und steht der Meeresbrandung oder den Sonnenuntergängen an Schönheit nicht nach. Wir kennen die Verteilung der Materie und wissen, was diese Galaxie zusammenhält: die Anziehungskraft, die die Sterne aufeinander ausüben. Die Verteilung der Materie und unser Gefühl für Entfernungen erlaubt uns, grob zu berechnen, welchem Gesetz die Kraft zwischen den Sternen gehorcht ... natürlich

nimmt sie mit dem Quadrat der Entfernung ab. Solche Berechnungen und Messungen können es an Genauigkeit nicht im entferntesten mit denen innerhalb unseres Sonnensystems aufnehmen.

Die Kraft der Gravitation reicht aber weiter. Dieser Kugelhaufen war nicht mehr als ein Pünktchen in der gewaltigen Galaxie auf Tafel 3, einer ganz normalen Galaxie. Auch hier gibt es keinen Zweifel, daß sie durch eine Kraft zusammengehalten wird, und als vernünftiger Kandidat kommt einzig die Schwerkraft in Betracht. Bei solchen Größenordnungen haben wir keine Möglichkeit der Überprüfung mehr, ob diese Kraft ebenfalls mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Aber es scheint außer Frage zu stehen, daß sich die Schwerkraft selbst über solche Entfernungen bis in diese großen Sternansammlungen erstreckt – diese Galaxien haben immerhin einen Durchmesser von 50 000 bis zu 100 000 Lichtjahren (zum Vergleich: die Entfernung Erde/Sonne beträgt nur acht Lichtminuten). Tafel 4 liefert den Beweis, daß die Schwerkraft sogar noch weiter reicht. Hier haben wir einen sogenannten Galaxienhaufen, zu dem sich, wie beim Kugelhaufen Sterne, in diesem Fall die auf Tafel 3 abgebildeten Riesenbabys zusammengeklumpt haben.

Damit haben wir einen direkten Beweis dafür, daß die Gravitationskräfte noch bei Größenordnungen wirksam sind, die ein Zehntel oder ein Hundertstel der Größe des Universums ausmachen. Der Schwerkraft der Erde sind also keine Grenzen gesetzt, auch wenn Sie in der Zeitung manchmal lesen können, daß etwas aus dem Schwerefeld hinausgerät. Es schwächt sich lediglich mit dem Quadrat der Entfernung ab, das heißt, es wird jedesmal, wenn Sie sich doppelt so weit entfernen, durch vier geteilt, bis es sich im Wirrwarr der Schwerefelder anderer Sterne verliert. Gemeinsam mit den Sternen in seiner Umgebung zieht es die anderen Sterne an und trägt so zur Galaxienbildung bei. Und alle zusammen ziehen wieder andere Galaxien an und bilden einen Galaxienhaufen. Das Schwerefeld der Erde hat also kein Ende, sondern erschöpft

sich ganz allmählich gemäß einem präzisen Gesetz, vielleicht erst am Rande des Universums.

Das Gravitationsgesetz unterscheidet sich von vielen anderen. Offensichtlich ist es für die Ökonomie, für das Getriebe, des Universums von großer Bedeutung. Im All gibt es viele Orte, wo die Schwerkraft eine praktische Anwendung findet. Davon aber abgesehen – und das ist ganz und gar untypisch für die Gesetze der Physik – kann man mit seiner Kenntnis im praktischen Leben relativ wenig anfangen. So betrachtet habe ich mit der Schwerkraft also ein atypisches Beispiel für ein physikalisches Gesetz gewählt. Es ist, nebenbei bemerkt, unmöglich, irgend etwas auszuwählen, was nicht in irgendeiner Hinsicht untypisch wäre. Das macht ja das Wunder der Welt aus. Die einzigen Bereiche, in denen sich die Kenntnis des Gravitationsgesetzes anwenden läßt, sind meines Wissens die Geophysik und die Berechnung der Gezeiten; dazu kommt in unseren Tagen die Berechnung der Satellitenumlaufbahnen sowie der Bahn der Planetensonden und, ebenfalls als moderne, von Astrologen weidlich genutzte Möglichkeit, die Berechnung der Planetenpositionen für die Erstellung von Horoskopen in Magazinen. Wir leben schon in einer sonderbaren Welt, die alle Fortschritte, die wir im Naturverständnis gemacht haben, für die Pflege des seit 2000 Jahren überlieferten Unsinn ausschachtet.

Zu der nicht unbedeutenden Rolle, die die Gravitation im Universum spielt, muß ich noch etwas nachtragen. Ist es nicht interessant, daß sie an der Entstehung neuer Sterne beteiligt ist? Tafel 5 zeigt eine interstellare Gaswolke in unserer Milchstraßengalaxie; es handelt sich nicht um einen Sternhaufen, sondern um eine Ansammlung von Gas. Die schwarzen Tupfer sind Stellen, wo sich das Gas verdichtet oder selbst angezogen hat. In Gang gesetzt wird dieser Vorgang möglicherweise durch eine Art Dichtewellen; den Rest besorgt jedoch die Schwerkraft, die das Gas mehr und mehr zusammenzieht, wobei sich große Mengen Gas und Staub ansammeln und kugelförmig zusammenballen; da sie immer weiterfallen, erwärmen

und entzünden sie sich schließlich, so daß sie als Sterne zu leuchten beginnen. Diesen Vorgang können wir bis zu einem gewissen Grad auf Tafel 6 verfolgen.

Sterne werden also geboren, wenn sich durch die Schwerkraft zuviel Gas ansammelt. Manchmal entstehen sie auch aus dem Schmutz und Gas, die ein Stern ausspeit, wenn er explodiert – was fast nach *perpetuum mobile* klingt.

Wie wir oben gesehen haben, erstreckt sich die Schwerkraft über enorme Entfernungen, aber Newton behauptete, daß jedes Ding jedes andere anziehe. Trifft das tatsächlich zu? Und können wir das direkt in einem Test beweisen oder müssen wir erst umständlich die Planeten belauern? Cavendish* hat mit der auf Abbildung 6 dargestellten Vorrichtung die Probe aufs Exempel gemacht: An einem hauchdünnen Quarzfaden hängte er einen Stab mit zwei Kugeln an beiden Enden auf. Neben diesen Kugeln brachte er in der angegebenen Position zwei große Bleikugeln an, was, wie erwartet, eine geringfügige Drehung des Fadens bewirkte, kaum merklich, denn die Anziehungskraft zwischen gewöhnlichen Dingen ist außerordentlich gering. Dennoch gelang es, die zwischen den beiden Kugeln wirksame Kraft zu messen oder, wie Cavendish sein Experiment nannte, »die Erde zu wiegen«. Bei unseren pedantischen, gewissenhaften Lehrmethoden würden wir den Studenten heute eine solche Ausdrucksweise freilich nicht durchgehen lassen. Sie müßten von der »Messung der Erdmasse« sprechen. Cavendish hat direkt in einem Experiment die Anziehungskraft, die beiden Massen und ihren Abstand gemessen, und konnte so die Gravitationskonstante G bestimmen. »Alles schön und gut«, werden Sie sagen, »aber wir befinden uns hier in derselben Situation. Wir kennen die Anziehungskraft und die Masse des angezogenen Körpers, wir wissen auch, wie weit wir davon entfernt sind, doch wir kennen weder die Masse der Erde noch die Konstante, sondern lediglich die Kombination aus beiden.« Durch die Messung

* Henry Cavendish, 1731–1810, englischer Physiker und Chemiker

der Konstanten aber konnte er in Kenntnis der Fakten über die Anziehungskraft der Erde die Erdmasse bestimmen.

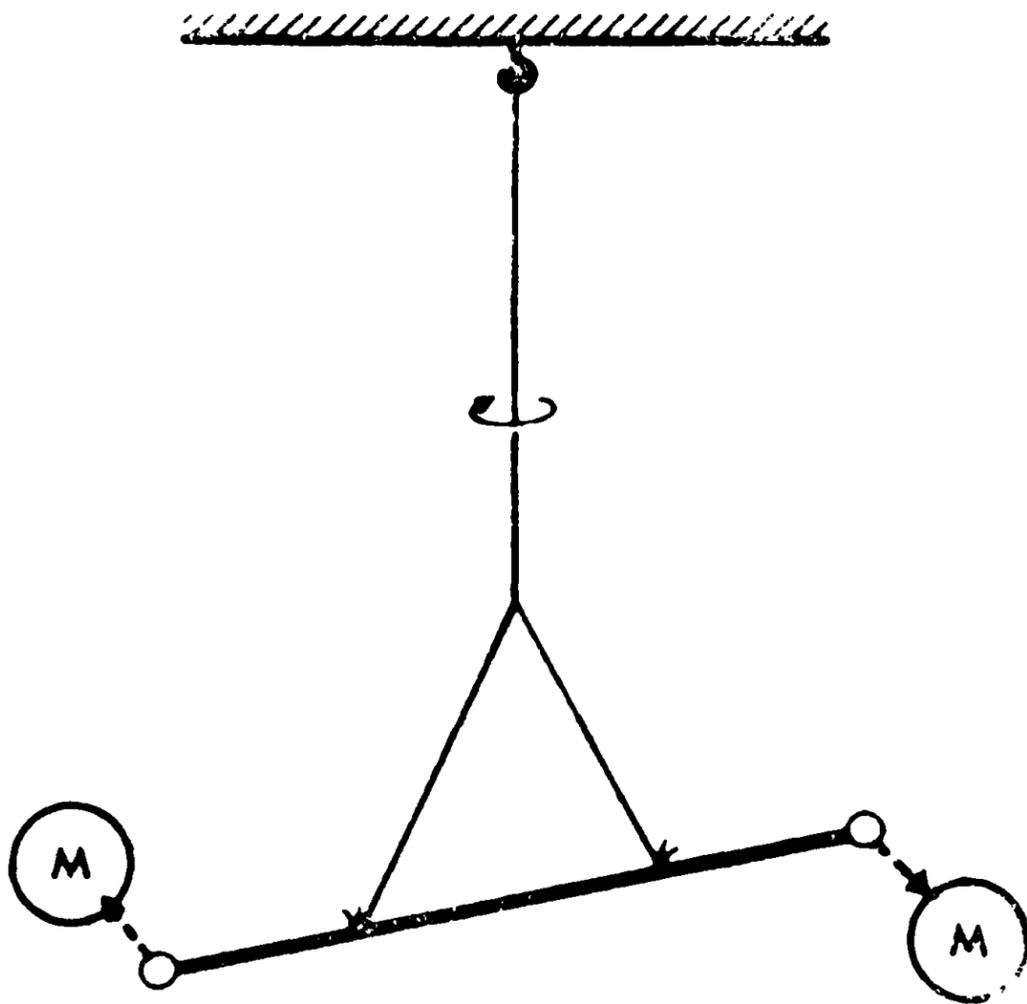


Abbildung 6

Indirekt war dieses Experiment das erste zur Bestimmung des Gewichts oder der Masse der Kugel, auf der wir leben. Das herauszufinden, war eine gewaltige Leistung, und deshalb glaube ich, hat Cavendish sein Experiment nicht »Bestimmung der Konstanten in der Gravitationsgleichung«, sondern »die Erde wiegen« genannt. Natürlich hat er bei dieser Gelegenheit die Sonne und alles andere gleich mit gewogen, läßt sich doch die Anziehung der Sonne auf die gleiche Weise feststellen.

Einen anderen, äußerst interessanten Test des Gravitationsgesetzes möchte ich noch erwähnen, die Frage, ob die Anziehung wirklich exakt proportional zur Masse ist. Ist das nämlich der Fall und ist die Reaktion proportional zur Anziehungskraft, dann sind auch die durch die Anziehungskräfte bewirkten Bewegungen, die Geschwindigkeitsveränderungen, proportional zur Masse. Das bedeutet, daß zwei Körper von unterschiedlicher Masse ihre Geschwindigkeit in einem Schwerefeld gleichermaßen ändern oder daß zwei Körper,

egal von welcher Masse, in einem Vakuum in gleicher Weise zur Erde fallen. Hier haben wir es mit Galileis Experiment vom schiefen Turm zu Pisa zu tun. Zum Beispiel bedeutet das auch, daß ein Objekt in einem von Menschenhand hergestellten Satelliten die Erde auf derselben Art Bahn umkreist wie ein Gegenstand auf der Satellitenaußenseite und demnach in der Mitte des Satelliten schwebt. Eine äußerst interessante Folge aus der Tatsache, daß die Anziehungskraft der Masse exakt proportional ist und daß die Reaktionen umgekehrt proportional zur Masse sind.

Was genau heißt exakt? Um das festzustellen, führte 1909 ein gewisser Eötvös* ein Experiment durch und vor nicht allzu langer Zeit präzisierte Dicke** das Ergebnis noch: Exakt heißt auf ein 10000000000stel genau. Die Anziehungskräfte sind also wirklich exakt proportional zur Masse. Wie aber ist es möglich, mit einer solchen Genauigkeit zu messen? Nehmen wir an, Sie wollten messen, ob das auch für die Anziehung der Sonne gilt. Natürlich wissen Sie, daß uns die Sonne alle anzieht, auch die Erde. Sie aber möchten wissen, ob die Anziehung exakt proportional zur Trägheit ist. Das einschlägige Experiment wurde erstmals mit Sandelholz, dann mit Blei und Kupfer durchgeführt; heute nimmt man Polyethylen dafür. Da sich die Erde um die Sonne bewegt, werden Dinge durch die Trägheit nach außen geschleudert, und zwar in dem Maße, als die beiden Objekte Trägheit besitzen. In dem Maße aber, als Dinge eine Masse besitzen, werden Sie gemäß dem Gesetz der Anziehung zur Sonne hingezogen. Werden sie also von der Sonne in anderem Maße angezogen, als sie von der Trägheit hinausgeschleudert werden, würde zum Beispiel eines zur Sonne hingezogen und ein anderes von ihr weg geschleudert werden. Hängt man sie nun an den beiden Enden eines Stabes an einem Cavendish-Quarzfaden auf, wird sich die Vorrichtung zur Sonne drehen. Sie dreht sich jedoch nicht

* Baron Roland von Eötvös, 1848–1919, ungarischer Physiker

** Robert Henry Dicke, amerikanischer Physiker

mit dieser Genauigkeit, und so wissen wir, daß die von der Sonne auf die beiden Objekte ausgeübte Anziehungskraft exakt proportional zur Zentrifugalkraft, das heißt der Trägheit, ist; deshalb ist die Anziehungskraft auf einen Körper exakt proportional zu seinem Trägheitskoeffizienten, mit anderen Worten, zu seiner Masse.

Etwas ist besonders interessant: Das Gesetz von der umgekehrten Proportionalität zum Quadrat der Entfernung taucht wieder an anderer Stelle auf, zum Beispiel unter den elektrischen Gesetzen. Auch die Elektrizität übt Kräfte aus, die umgekehrt zum Quadrat der Entfernung wirksam werden, in diesem Fall zwischen Ladungen; und man könnte auf den Gedanken verfallen, dieser Zusammenhang müsse irgendeine tiefere Bedeutung haben. Bisher ist es aber niemandem gelungen, Elektrizität und Schwerkraft zu zwei verschiedenen Aspekten ein und derselben Sache zu machen. Unsere heutigen Physiktheorien, die Gesetze der Physik, bestehen aus einer Vielzahl verschiedener Teile, die nicht allzu gut zusammenpassen. Wir haben nicht eine einzelne Struktur, von der sich alles ableiten ließe; wir verfügen nur über einige Bruchstücke, die sich noch nicht recht zusammenfügen wollen. Aus diesem Grund kann ich Ihnen in dieser Vorlesungsreihe auch nichts über *das Gesetz* der Physik schlechthin sagen, ich kann lediglich über die Gemeinsamkeiten der verschiedenen Gesetze reden. Der Zusammenhang zwischen ihnen entzieht sich unserem Verständnis. Ausgesprochen merkwürdig ist, daß sich gewisse Dinge in allen Bereichen wiederfinden. Werfen wir noch einmal einen Blick auf das Gesetz der Elektrizität.

In beiden Fällen wirkt die Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung; frappant aber ist der gewaltige Unterschied zwischen der Stärke der elektrischen Kraft und der Schwerkraft. Wer Elektrizität und Schwerkraft auf einen gemeinsamen Nenner zurückzuführen versucht, muß feststellen, daß die Elektrizität so viel stärker ist als die Gravitation, daß es schwerfällt, sich vorzustellen, die beiden könnten denselben Ursprung haben. Wie aber kann ich behaupten, das

Frage: Wie groß ist das Verhältnis von Schwerkraft und elektrischer Kraft? Die Antwort illustriert Abbildung 7: eine Zahl mit einem Schwanz von 42 Stellen nach dem Komma. Das sieht nach einem großen Geheimnis aus. Woher könnte eine solch unglaubliche Zahl kommen? Sollten Sie sich eine Theorie über einen gemeinsamen Ursprung der beiden Kräfte zurechtgezimmert haben, müssen Sie sich fragen, wie ein solches Mißverhältnis zustande kommen kann. Welche Gleichung hat eine Lösung, die für zwei Arten von Kräften eine Anziehung und eine Abstoßung in einem solch phantastischen Verhältnis aufweist?

Nun hat man sich umgesehen, ob ein solches Verhältnis noch anderswo auftaucht, und ist auf der Suche nach einer anderen großen Zahl darauf verfallen, den Durchmesser des Universums zum Durchmesser eines Protons in Beziehung zu setzen. Verblüffenderweise kommt ebenfalls eine Zahl mit 42 Stellen nach dem Komma heraus. Daraufhin wurde der interessante Vorschlag gemacht, das oben genannte Verhältnis könnte dasselbe sein wie das zwischen der Größe des Universums zum Durchmesser eines Protons. Das All dehnt sich aber mit der Zeit aus, was bedeuten würde, daß sich auch die Gravitationskonstante mit der Zeit verändern müßte, wofür wir, obwohl es durchaus möglich wäre, keine Anhaltspunkte haben. Im Gegenteil deutet manches darauf hin, daß sie sich nicht auf diese Weise verändert hat. Damit bleibt die ungeheure Zahl ein Geheimnis.

Abschließend möchte ich zur Theorie der Schwerkraft noch zwei Dinge anmerken. Erstens, daß Einstein die Gesetze der Schwerkraft in Übereinstimmung mit den Prinzipien der Relativität abändern mußte. Im Gegensatz zu Newtons Theorie, daß die Kraft überall sofort wirkt, lautet Einsteins erster Grundsatz, daß sich »x« nur mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Doch die von Einstein durchgeführten Modifizierungen der Newtonschen Gesetze haben nur ganz geringe Auswirkungen. Eine Änderung besagt, alle Massen fallen, Licht hat Energie, und Energie und Masse sind äquivalent.

Mithin fällt Licht, und das bedeutet, daß Licht in der Nähe der Sonne abgelenkt werden muß, was auch der Fall ist. Außerdem ist in Einsteins Theorie die Interpretation der Schwerkraft etwas modifiziert, so daß auch das Gesetz ganz leicht modifiziert wurde, gerade genug, um die leichte Abweichung in der Bewegung des Merkur zu erklären.

Zweitens haben wir im Zusammenhang mit den Gesetzen der Physik im kleinen Maßstab herausgefunden, daß das Verhalten der Materie im kleinen völlig anderen Gesetzen gehorcht als im großen. Somit erhebt sich die Frage, wie sieht das Gesetz der Schwerkraft im kleinen, das, was wir die Quantentheorie der Gravitation nennen, aus? Eine solche besitzen wir nicht, ist es doch bis jetzt nicht gelungen, eine wirklich überzeugende Theorie aufzustellen, die die Unschärferelation und die Prinzipien der Quantenmechanik berücksichtigt.

Nun werden Sie sagen: »Gut, Sie haben uns zwar gesagt, was passiert; aber nicht, was die Schwerkraft ist und woher sie kommt. Sie wollen uns doch nicht weismachen, daß ein Planet zur Sonne schaut, feststellt, wie weit sie entfernt ist, zu rechnen anfängt und beschließt, sich mit einer Schnelligkeit zu bewegen, wie sie ihm das Gesetz befiehlt, also umgekehrt proportional zur Entfernung?« Mit anderen Worten, obwohl ich Ihnen das mathematische Gesetz gegeben habe, habe ich Ihnen nichts über den Mechanismus verraten. Diesen Punkt wollen wir uns für die nächste Vorlesung aufheben, in der die Beziehung zwischen Mathematik und Physik betrachtet werden soll.

Zum Schluß dieser Vorlesung möchte ich auf einige Eigenschaften hinweisen, die die Schwerkraft mit den anderen, im voraufgegangenen kurz gestreiften Gesetzen gemein hat. Erstens wird sie mathematisch ausgedrückt; die anderen ebenfalls. Zweitens ist das Gesetz nicht genau; Einstein mußte es modifizieren, und trotzdem stimmt es nicht ganz, da wir bekanntlich noch die Quantentheorie einarbeiten müssen. Dasselbe trifft auf all unsere anderen Gesetze zu – sie sind durch

die Bank nicht exakt. Bei allen bleibt ein Rest von Geheimnis, überall müßten wir noch etwas einflicken. Ob das nun eine Eigenart der Natur ist oder nicht, jedenfalls ist es für sämtliche uns heute bekannten Gesetze kennzeichnend. Durchaus möglich, daß es nur an unseren lückenhaften Kenntnissen liegt.

Am meisten beeindruckt an der Schwerkraft ihre Einfachheit. Es ist ohne weiteres möglich, die Prinzipien so vollständig zu erfassen, daß nicht der geringste Spielraum bleibt, um an den Gesetzen zu deuteln. Die Gravitation ist einfach und darum schön. Das heißt einfach in ihrer Struktur, nicht in den Auswirkungen. Die Bewegungen der verschiedenen Planeten, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen, zu bestimmen, kann ein hartes Stück Arbeit sein, und die Bahnen all der Sterne in einem Kugelhaufen zu verfolgen, übersteigt vollends unser Vermögen. In ihren Auswirkungen ist die Schwerkraft kompliziert; die Grundstruktur oder das zugrunde liegende System hingegen ist einfach – wie bei all unseren Gesetzen. Sie alle erweisen sich als einfach, wenngleich in ihren Auswirkungen als komplex.

Schließlich kommt noch die Universalität des Gravitationsgesetzes dazu und die Tatsache, daß es über solch enorme Entfernungen gültig ist. So konnte Newton, der ja an der Erforschung des Sonnensystems interessiert war, das Ergebnis von Cavendishs Experiment voraussagen. Ums Zehnmillionenmillionenfache vergrößert, wird Cavendishs kleines Modell des Sonnensystems mit den zwei einander anziehenden Kugeln zum Sonnensystem. Vergrößern wir dieses wiederum ums Zehnmillionenmillionenfache, erhalten wir Galaxien, die einander nach genau demselben Gesetz anziehen. Die Natur webt ihre Muster nur mit den längsten Fäden, so daß schon jede kleine Gewebeprobe die Struktur des gesamten Gewirks enthüllt.

2. Die Beziehung zwischen Mathematik und Physik

Denkt man über die Anwendungsbereiche von Mathematik und Physik nach, leuchtet ein, daß sich die Mathematik überall dort als nützlich erweist, wo es um große Zahlen in komplexen Sachverhalten geht. In der Biologie zum Beispiel ist die Einwirkung eines Virus auf ein Bakterium unmathematisch. Beobachtet man die beiden unter dem Mikroskop, dann sieht man, wie sich ein quirliges kleines Virus irgendwo an das sonderbar geformte Bakterium ansetzt – Bakterien haben alle eine andere Form – und ihm vielleicht seine DNA einpflanzt, vielleicht auch nicht. Wiederholen wir das Experiment mit Millionen und Abermillionen Bakterien und Viren, erfahren wir eine ganze Menge über die Viren, wenn wir Durchschnittswerte errechnen. Mit Hilfe der Mathematik können wir herausfinden, ob sich die Viren in den Bakterien entwickeln, welche neuen Spielarten entstehen und mit welchem Prozentsatz. Das heißt, sie hilft uns, Genetik, Mutationen und ähnliches zu erforschen.

Oder wählen wir ein trivialeres Beispiel. Nehmen wir ein Riesenschachbrett, auf dem man Schach oder Dame spielen kann. Um mit einer Figur einen Zug auszuführen, bedarf es keiner Mathematik – oder nur der allereinfachsten. Man kann sich aber vorstellen, daß man bei einem Riesenbrett mit einer Unmenge von Figuren – ist das Spiel nach satzsamer Überlegung durch den ersten Zug einmal eröffnet – durch tiefes Nachdenken die besten beziehungsweise die guten oder die schlechten Züge herausfinden möchte. Eine solche Analyse gerät unfehlbar zur Mathematik, zumal sie nicht ohne ab-

strakte Schlußfolgerungen auskommt. Nehmen wir ein anderes Beispiel: das Einschalten von Computern. Hat Ihr Rechner nur einen Schalter, dann ist das Gerät entweder ein- oder ausgeschaltet – mathematisch betrachtet nicht eben ein aufregender Tatbestand, auch wenn die Mathematiker bei ihren Überlegungen gern von diesem Punkt ausgehen. Wollen Sie dagegen feststellen, was in einem sehr großen System mit all den Querverbindungen und Drähten vor sich geht, ist das nur mit Hilfe von Mathematik möglich.

Um es kurz zu machen, die Rolle der Mathematik in der Physik ist bei der Diskussion der einzelnen Vorgänge in komplizierten Situationen gar nicht zu überschätzen; schließlich garantiert die Mathematik die Grundregeln des Spiels. Genau darüber würde ich mich am ausführlichsten auslassen, hätte ich ausschließlich über die Beziehung zwischen Mathematik und Physik zu sprechen. Da dieses Thema jedoch nur Teil einer Vorlesungsreihe über das Wesen von physikalischen Gesetzen ist, fehlt uns die Zeit für solche Betrachtungen, und ich wende mich gleich der Frage nach dem Wesen der fundamentalen Gesetze zu.

Kehren wir zu unserem Schachspiel zurück; hier sind die Grundgesetze gleichbedeutend mit den Regeln, nach denen die Steine zu bewegen sind. Nun kann man sich zwar der Mathematik bedienen, wenn man sich angesichts der komplexen Situation nach dem unter den gegebenen Umständen besten Zug fragt; der einfache fundamentale Gehalt der Grundregeln jedoch kommt mit sehr wenig Mathematik aus. Die Regeln des Spiels lassen sich mit schlichten Worten erklären.

Sonderbar an der Physik ist, daß wir, um die Grundgesetze auszudrücken, noch immer die Mathematik brauchen. Lassen Sie mich zwei Beispiele anführen, eins, bei dem wir sie nicht unbedingt brauchen und eins, bei dem wir ohne sie nicht auskommen. In der Physik gibt es ein Gesetz, das sogenannte Faradaysche Gesetz, das besagt, daß die bei der Elektrolyse abgeschiedene Stoffmenge proportional zum elektrischen Strom und zur Dauer des Stromflusses ist. Das heißt, die

Menge des abgeschiedenen Materials ist proportional zur Ladung, die durch das System fließt. Das klingt sehr mathematisch. In Wirklichkeit heißt es nichts weiter, als daß die Elektronen, die durch den Draht fließen, eine Ladung tragen. Sagen wir, um ein Atom abzuschneiden, bedarf es eines durchfließenden Elektrons, dann wäre die Zahl der Atome, die abgeschieden werden, notwendig gleich der Zahl der durch den Draht fließenden Elektronen und damit proportional zur Ladung, die durch den Draht fließt. So steckt hinter dem mathematisch wirkenden Gewand des Gesetzes im Grunde nichts Tiefgründiges, nichts, was höhere mathematische Kenntnisse verlangte. Daß für jedes Atom, das abgeschieden werden soll, ein Elektron gebraucht wird, ist vermutlich ein mathematischer Vorgang, aber nicht die Art Mathematik, von der ich hier spreche.

Nehmen wir nun andererseits das Newtonsche Gravitationsgesetz, dessen Aspekte ich in der letzten Vorlesung besprochen habe. Ich habe Ihnen die Gleichung:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

(F = Kraft)

vorgesetzt, um Ihren Sinn dafür zu schärfen, wie schnell sich durch mathematische Symbole Information übermitteln läßt. Die Kraft, habe ich gesagt, ist proportional zum Produkt der Massen zweier Körper und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands zwischen ihnen; ferner, reagieren Körper auf Kräfte, indem sie ihre Geschwindigkeit oder ihre Bewegung in der von der Kraft gewiesenen Richtung verändern, und zwar proportional zur Kraft und umgekehrt proportional zu ihrer Masse. Nun gut, das sind Worte; ich brauche also nicht unbedingt die Gleichung zu schreiben. Nichtsdestotrotz ist es in gewisser Weise ein mathematisches Gesetz, und man fragt sich, wie es den Rang eines fundamentalen Gesetzes beanspruchen kann. Was macht der Planet eigentlich? Schaut er

zur Sonne, um abzuschätzen, wie weit sie entfernt ist, und ermittelt auf seiner inneren Rechenmaschine, wie er sich bewegen muß, wenn er sich umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands bewegen will? Das ist mitnichten eine Erklärung des Räderwerks der Gravitation! Gerade das möchten Sie ja sehen. Zig Leute haben versucht, einen Blick hinter die Kulissen zu werfen und Newton vorgeworfen: »Was hat Ihre Theorie eigentlich zu bedeuten? Sie besagt doch nichts.« Worauf er erwiderte: »Sie sagt Ihnen, *wie* sich der Planet bewegt. Das sollte Ihnen genügen. Ich habe Ihnen gesagt, wie er sich bewegt, nicht warum!« Häufig aber wollen sich die Leute nicht zufriedengeben, ehe sie nicht den Mechanismus kennen. Sie erfinden Theorien von der Art, wie sie vielleicht auch Ihnen vorschweben. Eine solche Theorie, die das Gesetz als das Ergebnis einer großen Anzahl von Vorgängen deuten und damit seinen mathematischen Charakter erklären möchte, will ich Ihnen im folgenden vorführen.

Nehmen wir an, daß überall in der Welt eine Menge Teilchen herum- und mit großer Geschwindigkeit durch uns hindurchfliegen. Sie kommen gleichermaßen aus allen Richtungen, schießen vorbei, treffen uns aber immer wieder einmal wie bei einem Bombardement. Wir und die Sonne sind praktisch durchlässig für sie – praktisch, aber nicht vollständig, denn einige treffen. Schauen wir uns einmal an, was unter diesen Voraussetzungen passieren würde (Abb. 8).

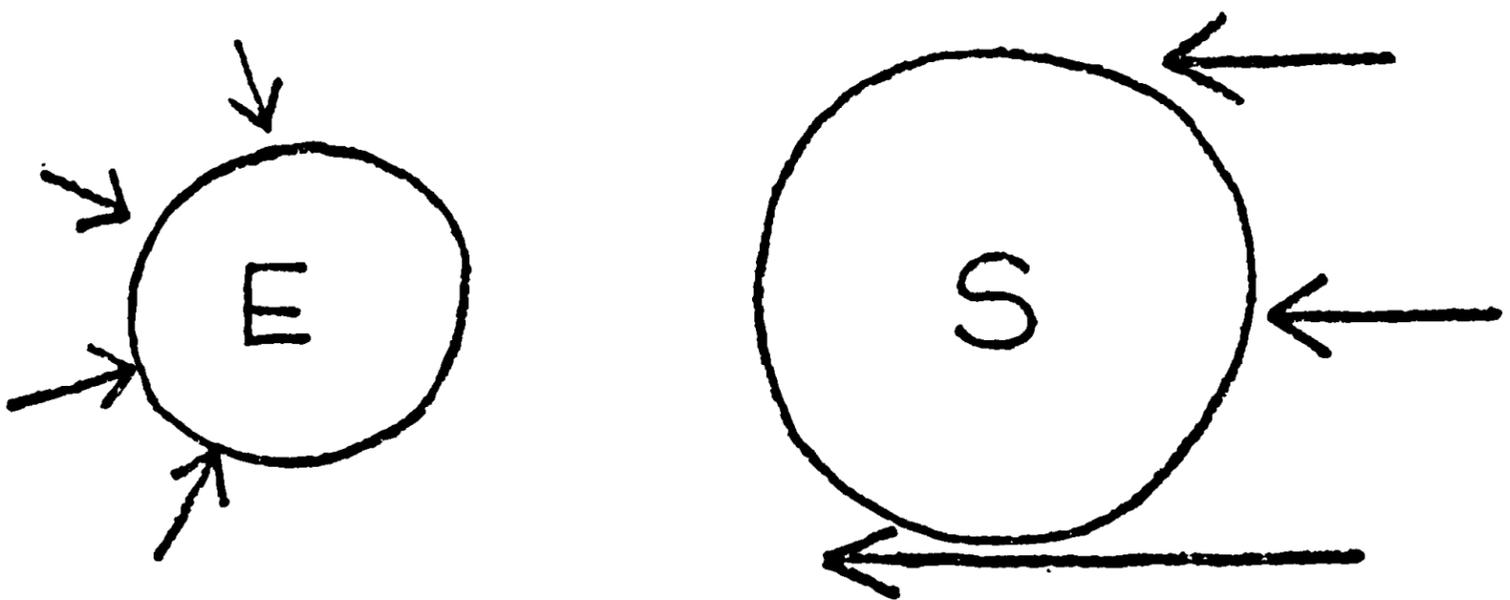


Abbildung 8

S ist die Sonne, E ist die Erde. Ohne unsere Sonne würde die Erde von allen Seiten gleichmäßig von Partikeln bombardiert und erhielte durch den Aufprall der wenigen, die treffen, bäng, bäng, kleine Impulse. Da von der einen Seite so viele kämen wie von der anderen, von oben so viele wie von unten, würde die Erde nicht in eine bestimmte Richtung bugsiert. Da jedoch die Sonne vorhanden ist, werden die aus dieser Richtung kommenden Partikel zum Teil absorbiert, weil einige die Sonne treffen und nicht passieren. Die Sonne bildet so etwas wie ein Hindernis, weshalb aus ihrer Richtung weniger Teilchen zur Erde kommen als von den anderen Seiten. Einleuchtend demnach, daß der von ihr zurückgehaltene Anteil an den von allen Seiten anstürmenden Partikeln abnimmt, je weiter sie von der Erde entfernt ist. Die Sonne wird kleiner erscheinen – um es genau zu sagen, umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands. Deshalb wird es einen Impuls auf die Erde zur Sonne hin geben, der umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands variiert. Und das ist das Ergebnis einer großen Anzahl ganz einfacher Vorgänge, einfacher Aufschläge aus allen Richtungen. Damit aber hat die mathematische Beziehung viel von ihrer Befremdlichkeit verloren, ist doch der Grundvorgang viel einfacher und hat in Wirklichkeit mit der Formel »umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands« nichts zu tun. Das Ganze ist im Grunde eine Sache anrennender Teilchen.

Die Geschichte hat nur einen Haken, sie funktioniert nicht, wenn auch aus anderen Gründen. Jede Theorie, die aufgestellt wird, muß auf *alle* möglichen Folgen analysiert werden; schließlich will man sichergehen, daß sie nicht etwas anderes vorhersagt. Und diese hier sagt in der Tat etwas anderes vorher. Da sich nämlich die Erde bewegt, wird unser Globus vorne von mehr Partikeln getroffen als von hinten. (Sie brauchen bloß einmal im Regen zu laufen, um festzustellen, daß Sie im Gesicht mehr abbekommen als am Hinterkopf, da Sie in den Regen hineinlaufen.) Genauso läuft die sich bewegende Erde in die auf sie zukommenden Teilchen hinein und vor

den sie von hinten verfolgenden weg. Aus diesem Grund wird sie von vorne von mehr Partikeln getroffen als von hinten, womit eine Kraft entsteht, die sich jeder Bewegung entgegenstemmt. Diese Kraft würde die Erde auf ihrer Bahn bremsen, so daß sie gewiß nicht (mindestens) drei oder vier Milliarden Jahre um die Sonne gekreist wäre. Damit aber ist diese Theorie erledigt. »Trotzdem«, sagen Sie, »war es eine gute Theorie, hat sie mich doch eine Zeitlang von der leidigen Mathematik befreit. Vielleicht kann ich mir eine bessere zurechtlegen.« Vielleicht gelingt es Ihnen, immerhin kennt niemand den letzten Grund. Seit Newtons Tagen hat allerdings niemand vermocht, die mathematischen Mechanismen hinter diesem Gesetz auf eine Weise zu beschreiben, die nicht auf dasselbe hinausliefere oder sich einer noch schwierigeren Mathematik bediente oder etwas Falsches vorhersagte. So haben wir bis heute kein anderes Modell der Gravitationstheorie als die mathematische Formel.

Wäre das Gravitationsgesetz das einzige dieser Art, wir fänden es ebenso interessant wie verdrießlich. Bei eingehenderen Nachforschungen, die uns tiefer in die Natur eindringen und mehr Gesetze entdecken lassen, zeigt sich jedoch, daß diese Krankheit durchgängig ist. Jedes unserer Naturgesetze ist eine rein mathematische Aussage einer ziemlich komplexen, abstrusen Mathematik. Newtons mathematische Fassung des Gravitationsgesetzes ist sogar noch relativ einfach. Je weiter wir vorankommen, desto abstruser und schwieriger geht es zu. Warum? Ich habe keine blasse Ahnung. Ich will Ihnen nur sagen, denn darin gerade besteht das Belastende der Vorlesung, daß ich Ihnen nichts anderes sagen kann. So leid es mir tut, es scheint nun einmal unmöglich zu sein, die Schönheiten der Naturgesetze ohne Schummelei auf eine Weise zu erklären, daß auch Nichtmathematiker sie empfinden können.

Nun könnten Sie sagen: »Na gut, wenn es schon keine Erklärung für das Gesetz gibt, so sagen Sie mir wenigstens die Quintessenz dieses Gesetzes. Sagen Sie es in Worten statt in Symbolen! Die Mathematik ist nichts anderes als eine Spra-

che, und ich möchte diese Sprache übersetzen können.« In der Tat kann ich sie Ihnen mit etwas Geduld übersetzen und habe es auch, bilde ich mir ein, zum Teil schon getan. Ich könnte noch etwas weitergehen und Ihnen die Gleichung detaillierter erklären, nämlich daß die Kraft bei doppeltem Abstand noch ein Viertel beträgt und so fort. Ich könnte alle Symbole durch Wörter ersetzen. Anders ausgedrückt, ich könnte nett und freundlich zu den Laien sein, die so erwartungsvoll an meinen Lippen hängen. So hat sich schon mancher einen Namen gemacht als einer, der sich aufs Popularisieren versteht. Deshalb greift der Nichtfachmann zu immer neuen Büchern in der Hoffnung, eines Tages die Schwierigkeiten umrunden zu können, die selbst beim besten Erklärer gegen Ende auftauchen. Im allgemeinen nimmt mit fortschreitender Lektüre die Verwirrung zu, häufen sich die schwierigen Aussagen, folgt ein schwer zu verstehender Satz scheinbar ohne Zusammenhang dem anderen. Die Geschichte wird immer dunkler, und der Leser setzt seine Hoffnung auf das nächste Buch. War es diesem Autor schon beinahe gelungen – warum sollte es da nicht ein anderer gänzlich schaffen.

Das allerdings halte ich für unmöglich, denn Mathematik ist eben *nicht* allein eine andere Sprache. Mathematik ist eine Sprache plus Schlußfolgerungen; sie ist gleichsam eine Sprache plus Logik. Mathematik ist ein Werkzeug, um Schlüsse zu ziehen. Sie ist eine gewaltige Sammlung logischer Denkresultate. Mit ihrer Hilfe kann man eine Aussage in Beziehung zu einer anderen setzen. Zum Beispiel kann ich sagen, die Kraft wirkt in Richtung der Sonne. Und, wie bereits dargelegt: Der Planet bewegt sich so, daß, wenn ich eine Linie von der Sonne zum Planeten ziehe und nach einem bestimmten Zeitraum, etwa nach drei Wochen, wieder eine, die vom Planeten überstrichene Fläche genau dieselbe ist wie die, die er in den nächsten drei Wochen oder den darauffolgenden drei Wochen und sofort auf seiner Bahn um die Sonne überstreichen wird. Beide Aussagen kann ich einwandfrei erklären; nicht erklären

kann ich dagegen, warum die Flächen dieselben sind. Das scheinbar so komplexe Wesen der Natur mit all ihren komischen Gesetzen und Regeln, die Ihnen alle einzeln umständlich erklärt werden müssen, ist in Wirklichkeit ein dicht verwobenes Geflecht. Ohne mathematische Kenntnisse jedoch verlieren Sie sich in diesem Gewirr von Fakten, in dem man nur mit Hilfe der Logik von einem Gesetz zum anderen gelangen kann.

Es mag unglaublich klingen, aber ich kann Ihnen beweisen, daß, wenn die Kräfte in Richtung Sonne wirken, in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen überstrichen werden. Lassen Sie mich Ihnen einen solchen Beweis vorführen, damit Sie über die Gesetze hinauszublicken lernen. Ich werde Ihnen zeigen, daß unsere beiden Gesetze so miteinander verbunden sind, daß Sie allein durch Schlußfolgerungen vom einen zum anderen gelangen, und daß die Mathematik letztlich nichts anderes ist als ein in Formeln gefaßter logischer Weg. Ihnen werden die Augen aufgehen für die Schönheit der Verknüpfung der verschiedenen Aussagen. Jetzt zur Beweisführung, daß eine Beziehung besteht zwischen der Tatsache, daß die Kräfte auf die Sonne gerichtet sind, und der, daß in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen überstrichen werden.

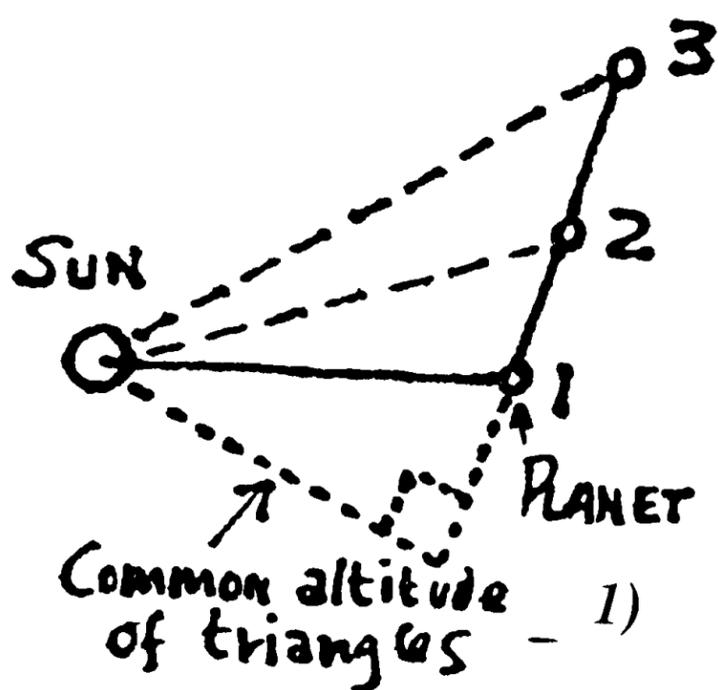


Abbildung 9 1) gemeinsame Höhe der Dreiecke

Wir gehen davon aus, daß wir eine Sonne und einen Planeten haben (Abb. 9) und der Planet sich zu einem bestimmten Zeit-

punkt in Position 1 befindet. Nach, sagen wir, einer Sekunde soll er sich zu Position 2 bewegt haben. Übte die Sonne keine Kraft auf den Planeten aus, würde er, getreu Galileis Trägheitsgesetz, in gerader Linie weiterfliegen. Das heißt nach dem gleichen Zeitraum, nach der nächsten Sekunde, hätte er, seinen geradlinigen Weg fortsetzend, genau die gleiche Entfernung bis zu Position 3 zurückgelegt. Als erstes wollen wir nun zeigen, daß, gäbe es *keine* Kraft, in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen überstrichen würden. Um Ihr Gedächtnis aufzufrischen, erinnere ich Sie daran, daß sich die Fläche eines Dreiecks aus der halben Länge der Grundlinie mal der Höhe errechnet und daß die Höhe der vertikale Abstand zur Grundlinie ist. Bei einem stumpfwinkligen Dreieck (Abb. 10) ist die Höhe die senkrechte Verbindung von A zur Grundlinie BC, also AD. Vergleichen wir nun die Flächen, die überstrichen würden, wenn die Sonne keinerlei wie immer geartete Kraft ausübte (Abb. 9).

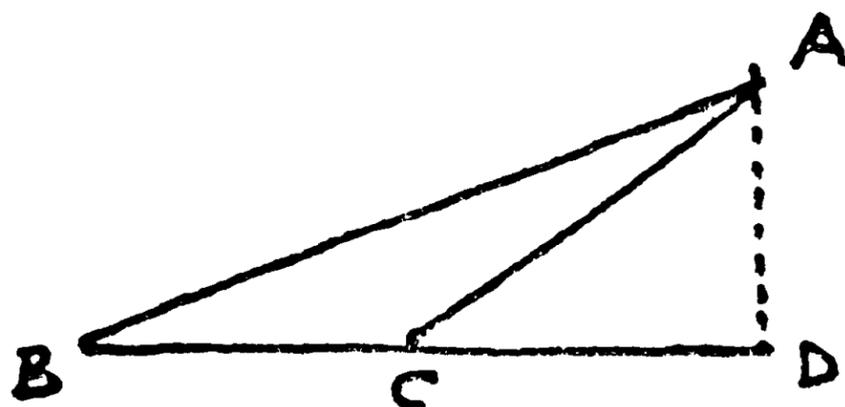


Abbildung 10

Die beiden Entfernungen 1–2 und 2–3 sollen gleich sein, Sie erinnern sich. Erhebt sich die Frage: Sind auch die Flächen gleich? Schauen Sie sich das von der Sonne und den Punkten 1 und 2 gebildete Dreieck an. Welche Fläche hat es? Um das festzustellen, müssen wir die Grundlinie 1–2 mit der halben lotrechten Höhe von der Grundlinie zu S multiplizieren. Und die Fläche des anderen Dreiecks, des Dreiecks, das sich durch die Bewegung von 2 nach 3 ergibt? Sie errechnet sich aus der Grundlinie 2–3 mal der halben lotrechten Höhe zu S. Die beiden Dreiecke haben dieselbe Höhe und, wie schon angedeutet, dieselbe Grundlinie und deshalb auch dieselbe Fläche. So

weit, so gut. Ginge von der Sonne keine Kraft aus, würden in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen überstrichen. Nun geht aber von der Sonne eine Kraft *aus*. Sie zieht den Planeten in dem Zeitraum 1–2–3 an und ändert dadurch seine Bewegung in verschiedenen Richtungen auf sich zu. Um einen guten Näherungswert zu erhalten, nehmen wir die mittlere oder durchschnittliche Position bei 2 und sagen, daß die zugehörige Kraft die Bewegung im Zeitraum 1–3 um einen gewissen Betrag in die Richtung der Linie 2–S geändert hat (Abb. 11).

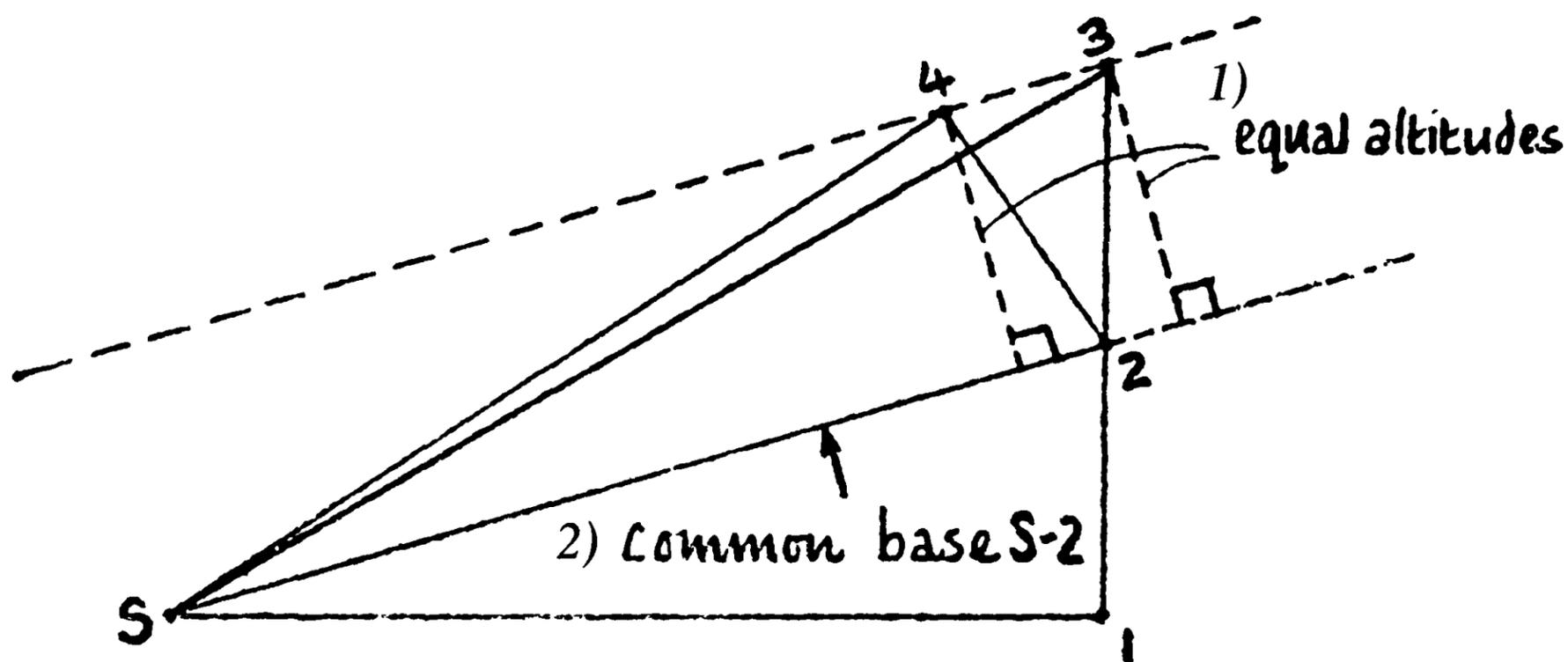


Abbildung 11 1) gleiche Höhen 2) gemeinsame Grundlinie S-2

Das bedeutet, daß der Planet, obwohl er sich auf der Linie 1–2 bewegte und in der nächsten Sekunde ohne äußere Krafteinwirkung auf derselben Linie fortbewegt hätte, aufgrund des Sonneneinflusses seine Bewegung um einen Betrag geändert hat, der ihn in eine Richtung parallel zur Linie 2–S stößt. Deshalb ist die nachfolgende Bewegung eine Überlagerung zwischen dem, was der Planet machen wollte und der von der Sonneneinwirkung bedingten Veränderung. So landet der Planet nicht in Position 3, sondern in Position 4. Als nächstes möchten wir die Flächen der Dreiecke 23S und 24S miteinander vergleichen, und ich werde Ihnen beweisen, daß sie gleich sind. Sie haben dieselbe Grundlinie, S–2. Wie steht es mit den Höhen? Die sind natürlich gleich, da sie zwischen Parallelen eingeschlossen sind. Die Entfernung von 4 zur Linie S–2 ist

gleich der Entfernung von 3 zur Linie S-2 (gestrichelt). Also ist die Fläche des Dreiecks S24 gleich der von S23. Daß S12 und S23 flächengleich sind, habe ich früher bewiesen, und so wissen wir jetzt, daß S12 gleich S24 ist. Demnach überstreicht der Planet auf seiner wirklichen Bahn in der ersten und in der zweiten Sekunde dieselbe Fläche. Folglich können wir durch Schlußfolgern eine Verbindung zwischen der Tatsache sehen, daß die Kraft in Richtung auf die Sonne wirkt, und der, daß die Flächen gleich sind. Wenn das nicht genial ist! Die Beweisführung stammt von Newton persönlich. Ich habe sie samt Diagramm und allem Drum und Dran aus seinen *Principia* übernommen. Einzig die Symbole habe ich geändert und anstelle von römischen arabische Zahlen verwendet.

Newton bediente sich für die Beweise ausschließlich der Geometrie. Heute ist sie durch eine Art analytischen Schlußfolgerns mit Symbolen verdrängt worden, obwohl es eine Portion Scharfsinn erfordert, korrekte Dreiecke zu zeichnen, die Flächengleichheit festzustellen und sich einfallen zu lassen, wie man sie beweist. Mittlerweile sind die Analysemethoden verbessert worden, mit ihnen arbeiten wir heute schneller und effizienter. In der modernen Mathematik, die nur noch mit einer Reihe von Symbolen hantiert, sieht unser Beweis so aus.

Uns interessiert, wie schnell sich die Fläche ändert, und wir bezeichnen diese Flächenänderung mit \dot{A} . Offensichtlich ändert sich die Fläche, wenn sich der Radius verändert; wie schnell sie sich ändert, hängt von der Geschwindigkeitskomponente ab, die in rechten Winkeln zum Radius steht, mal dem Radius. Anders gesagt, von der Komponente des radialen Abstands mal der Geschwindigkeit oder der Änderungsrate des Abstands.

$$\dot{A} = \dot{r} \times r$$

Die Frage ist nun, ob sich die Änderungsrate der Fläche selbst ändert. Dem Gesetz nach dürfte sie sich nicht ändern. So differenzieren wir sie wieder, das heißt, wir bedienen uns eines

kleinen Tricks und setzen ein paar Punkte an die richtige Stelle. Die Tricks freilich muß man lernen; sie sind nichts weiter als eine Reihe von Regeln, die irgendwelche Leute herausgefunden haben und die bei so etwas sehr nützlich sind. Wir schreiben:

$$\ddot{A} = \dot{\vec{r}} \times \dot{\vec{r}} + \vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = \frac{1}{r} \times \frac{\vec{F}}{m}$$

(F-force = Kraft)

Das erste Glied bestimmt die im rechten Winkel zur Geschwindigkeit stehende Geschwindigkeitskomponente. Diese Komponente ist null. Die Beschleunigung, die zweite Ableitung, das r mit den zwei Punkten, oder die Ableitung der Geschwindigkeit, ist die Kraft geteilt durch die Masse.

Das heißt also, daß die Änderungsrate der Flächenänderungsrate die in rechten Winkeln zum Radius stehende Komponente der Kraft ist; wenn aber die Kraft in die Richtung des Radius wirkt,

$$\vec{r} \times \frac{\vec{F}}{m} = 0 \text{ or } \ddot{A} = 0$$

(or = oder)

dann ist, wie Newton sagte, keine Kraft in rechten Winkeln zum Radius wirksam, und das bedeutet, daß sich die Flächenänderungsrate nicht verändert. So viel bloß zur Illustration, was die Analyse mit verschiedenen Arten der Bezeichnung alles vermag. Newton kannte dieses Vorgehen, wenngleich mit etwas anderen Bezeichnungen; dennoch schrieb er alles in der geometrischen Form, um seine Argumentation auch Nichtmathematikern verständlich zu machen. Schließlich war er ja der Erfinder der Differentialrechnung, wie die oben dargelegte Art von Mathematik bezeichnet wird.

Hier haben wir ein anschauliches Beispiel für das Verhältnis von Mathematik und Physik. Wenn wir Physiker auf schwie-

rige Probleme stoßen, klopfen wir oft bei den Mathematikern an, um zu sehen, ob sie solche Fragen vielleicht schon untersucht und eine für uns brauchbare Kette von Schlußfolgerungen vorbereitet haben. Ist das nicht der Fall, müssen wir unsere Schlußfolgerungen selber ziehen, die wir dann an die Mathematiker weiterreichen. Jeder, der logisch über irgend etwas nachdenkt, trägt dazu bei, unser Wissen darüber, was passiert, während man über etwas nachdenkt, zu erweitern; wenn Sie den Vorgang dann abstrahieren und an die mathematische Fakultät einsenden, wird er als Zweig der Mathematik in die Lehrbücher aufgenommen. Mathematik ist demnach ein Weg, der von einer Reihe von Aussagen zu einer anderen führt. Offensichtlich ist sie auch für die Physik von Nutzen, zumal wir die Dinge unter verschiedenen Blickwinkeln betrachten und die Mathematik uns erlaubt, Aussagen abzuleiten, spezielle Probleme zu untersuchen und die Gesetze so abzuändern, daß wir sie mit anderen Aussagen in Verbindung bringen können. Im Grunde weiß ein Physiker sehr wenig. Er braucht sich lediglich die Regeln zu merken, um von einer Feststellung zur anderen zu gelangen. Das genügt vollauf, da die verschiedenen Aussagen über gleiche Zeiten, die in Richtung des Radius wirksame Kraft und so fort samt und sonders durch Schlußfolgerungen miteinander verbunden sind.

An diesem Punkt nun erhebt sich eine interessante Frage. Kann diese Deduktion an einer bestimmten Stelle ansetzen? Gibt es in der Natur eine bestimmte Struktur oder Ordnung, aus der wir entnehmen können, daß eine Reihe von Aussagen fundamentaler ist als die andere? Wir haben es hier mit zwei verschiedenen Mathematikauffassungen zu tun, die ich im Rahmen unserer Vorlesungsreihe als die babylonische und die griechische Tradition bezeichnen will. In Babylon wurden die Mathematikstudenten mit einer Vielzahl von Beispielen traktiert, bis sie selber imstande waren, die allgemeine Regel abzuleiten. Sie wußten natürlich auch eine ganze Menge über die Geometrie, über die Eigenschaften von Kreisen, kannten den Lehrsatz des Pythagoras, Formeln für Flächen von Kuben

und Dreiecken, außerdem hatten sie eine Reihe von Argumenten parat, um von einem Schluß zum anderen zu gelangen. Es existierten Zahlentabellen, so daß sie komplizierte Gleichungen lösen konnten. Alles war für die Berechnungen bestens vorbereitet. Euklid nun entdeckte einen Weg, alle geometrischen Theoreme von einem Satz besonders einfacher Axiome abzuleiten. Die babylonische Haltung – oder das, was ich babylonische Mathematik nenne – gibt sich damit zufrieden, all die verschiedenen Theoreme und viele der zwischen ihnen bestehenden Verbindungen zu kennen; sie hat sich aber nie wirklich klargemacht, daß alles von einer Handvoll Axiomen kommen könnte. Die modernste Mathematik konzentriert sich auf Axiome und Beweise innerhalb eines fest umrissenen Rahmens von Konventionen darüber, was als Axiom gelten darf und was nicht. Die moderne Geometrie greift zum Beispiel etwas wie die Euklidischen Axiome in modifizierter Form auf und leitet dann das System daraus ab. Dabei käme einem Theorem wie dem Pythagoräischen Lehrsatz, der besagt, daß in einem rechtwinkligen Dreieck das Quadrat der Hypotenuse gleich der Summe der Quadrate der beiden Katheten ist, nicht der Stellenwert eines Axioms zu. Unter einem anderen, dem Descartesschen Gesichtspunkt dagegen, gilt das Pythagoräische Theorem als Axiom.

Darum müssen wir als erstes einmal akzeptieren, daß man selbst in der Mathematik von verschiedenen Ausgangspunkten ausgehen kann. Wenn all diese verschiedenen Theoreme durch logische Schlüsse miteinander verknüpft sind, gibt es keinen triftigen Grund zu sagen: »Diese hier sind fundamentaler als die anderen.« Man kann, je nachdem, was man wissen will, das Schlußfolgern genauso gut von der anderen Richtung her angehen. Es ist wie bei einer Brücke, die aus vielen Gliedern besteht und darüber hinaus noch verbunden ist; fallen einige Stücke aus, kann sie auf andere Weise wieder zusammengefügt werden. So hat es sich die moderne Mathematik zur Regel gemacht, von bestimmten, gewissermaßen in Übereinkunft zu Axiomen erhobenen Ideen auszugehen und

darauf ihr Gebäude aufzubauen. Die von mir als babylonisch bezeichnete Richtung dagegen sagt sich: »Zufällig weiß ich dies und das und vielleicht noch jenes, und auf dieser Grundlage werde ich mir alles übrige erarbeiten. Vielleicht habe ich morgen schon das eine oder andere vergessen, dafür werde ich mich an etwas anderes erinnern, und so kann ich alles rekonstruieren. Dabei bin ich mir nie ganz sicher, wo ich anfangen und wo ich eigentlich aufhören soll. Ich merke mir nur eben soviel, daß ich, auch wenn das Gedächtnis nachläßt und einige Glieder herausbrechen, das Ganze doch Tag für Tag wieder zusammensetzen kann.«

Die Methode, stets von den Axiomen auszugehen, ist zur Erarbeitung von Theoremen nicht besonders geeignet. Es ist nicht eben praktisch, zur Lösung eines geometrischen Problems immer wieder auf die Axiome zurückkommen zu sollen. Natürlich kann man, wenn man sich ein paar Sachen in der Geometrie merkt, von da aus immer wieder weiterkommen, aber der andere Weg ist viel tauglicher. Die Wahl der besten Axiome ist nicht notwendig die wirksamste Art und Weise, einen Bereich zu erforschen. In der Physik brauchen wir die babylonische Methode und nicht die Euklidsche oder griechische. Warum, werde ich Ihnen gleich erklären.

Der springende Punkt bei der Euklidschen Methode ist, an manchen Axiomen etwas besonders Interessantes oder Wichtiges festzustellen. Im Fall der Schwerkraft zum Beispiel hieße das fragen: Ist es wichtiger oder grundlegender, daß die Kraft zur Sonne hin wirksam wird oder daß in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen überstrichen werden? Welches ist das bessere Axiom? Vom einen Standpunkt aus ist die Aussage über die Kraft besser. Zum Beispiel kann ich, wenn ich die Art der Kräfte festgestellt habe, mich über ein System mit vielen Teilchen, in dem die Umlaufbahnen keine Ellipsen mehr sind, informieren, weil ich dank dem Schwerkraftgesetz von der gegenseitigen Anziehungskraft weiß. Da ich in diesem Fall nichts mit dem Theorem über die gleichen Flächen anfangen kann, halte ich das Kraft-Gesetz für das bessere Axiom. An-

dererseits läßt sich auch das Gesetz der gleichen Flächen in einem System mit einer Vielzahl von Teilchen zu einem Theorem verallgemeinern. Es ist reichlich kompliziert und nicht so hübsch wie die ursprüngliche Aussage über die gleichen Flächen, doch unleugbar ein Abkömmling von ihm. Nehmen wir ein System mit vielen Körpern, etwa Jupiter, Saturn, die Sonne samt einer Menge Sterne, die alle miteinander wechselwirken, und betrachten es aus der Ferne auf eine Ebene projiziert (Abb. 12). Die Körper bewegen sich alle in verschiedene Richtungen. Nehmen wir nun einen beliebigen Punkt und berechnen, welche Fläche vom Radius dieses Punktes zu jedem der Körper in einer bestimmten Zeit überstrichen wird. Dabei müssen wir die Massen der einzelnen Körper berücksichtigen und beispielsweise die Fläche eines doppelt so schweren Planeten doppelt zählen. Wir zählen also die überstrichenen Flächen, indem wir sie hinsichtlich der zugehörigen Massen gewichten, addieren sie und stellen fest, daß *sich die Gesamtsumme zeitlich nicht ändert*. Diese Gesamtsumme wird als Drehimpuls bezeichnet, und das Gesetz, das wir auf diese Weise entdeckt haben, unter die Erhaltungssätze eingereiht, wobei Erhaltung des Drehimpulses lediglich bedeutet, daß es sich nicht zeitlich verändert.

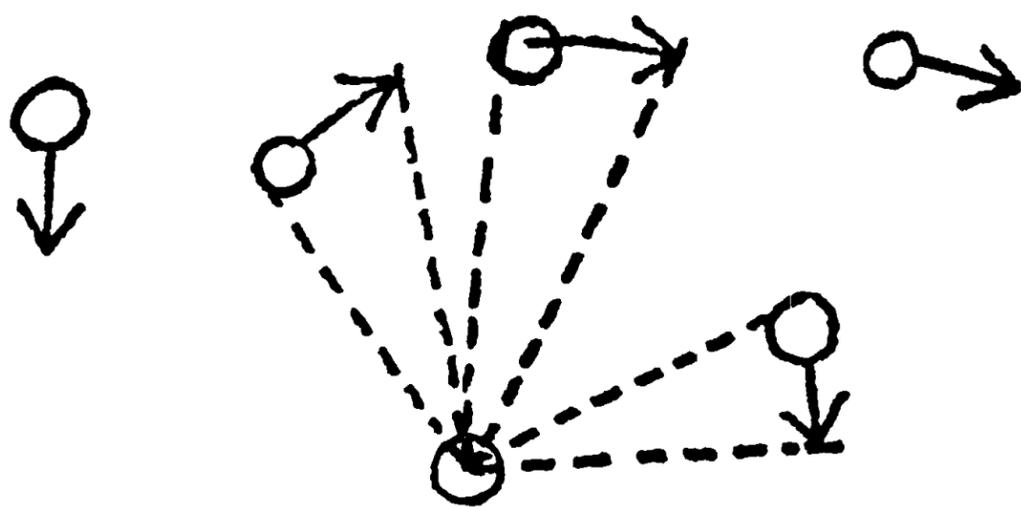


Abbildung 12

Schauen wir uns eine der Folgen dieses Satzes an. Stellen Sie sich vor, ein Haufen Sterne fällt zu einem Spiralnebel oder einer Galaxie zusammen. Zunächst sind die Sterne sehr weit draußen und ihre Radien zum Mittelpunkt sehr lang. Die

Himmelskörper bewegen sich nur langsam, wodurch eine kleine Fläche überstrichen wird. Je näher sie kommen, desto mehr verkürzen sich die Abstände zum Zentrum. Wenn sie schon sehr weit drinnen sind, sind die Radien auf einen Bruchteil ihrer ursprünglichen Länge geschrumpft, so daß sich die Sterne ein ganzes Stück schneller bewegen müssen, um dieselbe Fläche pro Sekunde zu überstreichen. Je weiter sie hereinkommen, desto rascher und immer rascher bewegen sie sich, was auch grob die qualitative Form des Spiralnebels erklärt. Dasselbe Gesetz liegt der Pirouette eines Schlittschuhläufers zugrunde. Er beginnt langsam mit abgespreiztem Bein und wird in dem Maße schneller, in dem er sein Bein einzieht. Hatte das ausgestreckte Bein die pro Sekunde überstrichene Fläche vergrößert, so muß er die mit dem Einziehen des Beins schrumpfende Fläche durch eine größere Drehgeschwindigkeit wettmachen. Allerdings habe ich das nicht für den Schlittschuhläufer bewiesen: Er setzt die Kraft seiner Muskeln ein; Muskelkraft und Schwerkraft sind zweierlei. Dennoch trifft unser Gesetz auch auf den Schlittschuhläufer zu.

Das bringt uns zu einem Problem, auf das wir in der Physik häufig stoßen, während es die Mathematik nicht kennt. Hier tauchen nicht an unvermuteten Stellen Theoreme auf wie in der Physik, wo wir oft von einem Gesetz, wie etwa dem Gravitationsgesetz, ein Prinzip ableiten können, das über diesen Bereich hinaus Gültigkeit hat. Mit anderen Worten, postulieren wir in der Physik das Gesetz der gleichen Flächen aus der Gravitationslehre, dann können wir daraus die Erhaltung des Drehimpulses ableiten, aber nur für die Schwerkraft. Nichtsdestoweniger entdecken wir durch Experimente, daß die Erhaltung des Drehimpulses auch in anderen Bereichen gilt. Schon Newton standen andere Postulate zur Verfügung, aus denen er den allgemeineren Erhaltungssatz des Drehimpulses deduzieren konnte. Doch waren diese Newtonschen Gesetze falsch. Es gibt keine Kräfte, die Teilchen bewegen sich nicht auf festen Bahnen und so weiter, das ist alles Mumpitz. Trotzdem stimmt das Analogon, die exakte Umwandlung dieses

Gesetzes von den gleichen Flächen und der Erhaltung des Drehimpulses. Es trifft für die Bewegung der Atome in der Quantenmechanik zu, die es meines Wissens heute noch exakt beschreibt. Wir haben also umfassende Prinzipien, die verschiedene Gesetze umschließen, und können die Beziehungen der verschiedenen Zweige der Physik untereinander nur verstehen, wenn wir ihre Ableitung nicht allzu ernst nehmen. Wenn wir uns einbilden, daß das eine nur gültig ist, weil das andere gültig ist, können wir einpacken. Eines fernen Tages, wenn wir alle Gesetze kennen und die Physik abgeschlossen ist, können wir vielleicht von ein paar Axiomen ausgehen, und zweifelsohne findet sich dann auch jemand, der den Weg aufzeigt, wie alles aus ihnen abgeleitet werden kann. Solange wir jedoch die Gesetze nicht alle kennen, können wir einige hernehmen, um Vermutungen über Theoreme anzustellen, die über den Bereich hinaus, für den sie bewiesen sind, Gültigkeit besitzen. Wer die Physik verstehen will, muß sich aufs Abwägen verstehen und in seinem Kopf all die verschiedenen Lehrsätze und Beziehungen zueinander speichern, weil die Gesetze oft über den Bereich ihrer Ableitung hinaus gelten. All das wird erst belanglos, wenn wir sämtliche Gesetze kennen.

Ein anderer, äußerst interessanter, in der Beziehung zwischen Mathematik und Physik höchst merkwürdiger Punkt berührt den Umstand, daß man in der Mathematik, wie sich durch mathematische Argumente aufzeigen läßt, von vielen anscheinend unterschiedlichen Ausgangspunkten ausgehen und doch zum gleichen Ergebnis gelangen kann – was auf der Hand liegt, wenn man anstelle der Axiome auch die Theoreme hernehmen kann. Dagegen sind die Gesetze der Physik gegenwärtig so zart gebaut, daß ihre verschiedenen, aber gleichwertigen Aussagen qualitativ einen vollständig anderen Charakter haben, was sie sehr interessant macht. Zum Beispiel läßt sich das Gravitationsgesetz auf drei verschiedene Weisen ausdrücken, die einander zwar durchaus gleichwertig sind, doch vollständig anders lauten.

Die erste Möglichkeit kennen Sie bereits. Sie besagt, daß zwischen Körpern Kräfte wirksam werden, die sich nach der Gleichung:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

berechnen lassen. Jeder Körper, der diese Kraft zu spüren bekommt, beschleunigt oder verändert seine Bewegung um einen gewissen Betrag pro Sekunde. Das ist die reguläre Schreibweise des Gesetzes, das ich Newtons Gesetz nennen will. So ausgedrückt besagt es, daß die Kraft von einem anderen Körper in endlicher Entfernung abhängt. Sie besitzt, wie wir sagen, eine nichtlokale Eigenschaft. Die auf ein Objekt wirkende Kraft hängt davon ab, ob sich in einiger Entfernung ein anderer Körper befindet.

Vielleicht aber mißfällt Ihnen die Vorstellung einer Fernwirkung. Wie kann ein Körper hier wissen, was dort drüben vor sich geht? In diesem Fall kann ich Ihnen eine andere Formulierung anbieten, die höchst seltsam ist und in den Bereich der sogenannten Feldtheorien fällt. Diese völlig anders lautende Aussage ist schwer zu erklären; dennoch möchte ich versuchen, Ihnen eine grobe Vorstellung davon zu vermitteln. Jeder Punkt im Raum hat eine Zahl (eine Zahl, keinen Mechanismus: Das ist ja die Krux mit der Physik, daß sie mathematisch sein muß), und diese Zahlen ändern sich, wenn Sie von Ort zu Ort gehen. Befindet sich an einem Punkt im Raum ein Körper, so wirkt die Kraft auf ihn in die Richtung, in der sich die Zahl (oder um ihr ihren richtigen Namen zu geben, das Potential) am stärksten ändert (die Kraft wirkt also in die Richtung, in der sich das Potential verändert). Außerdem ist diese Kraft proportional zur Schnelligkeit, mit der sich das Potential verändert, wenn Sie sich fortbewegen. Aber das ist erst ein Teil der Aussage, denn ich muß Ihnen noch erklären, wie man die Art und Weise bestimmt, in der sich das Potential verändert. Ich könnte sagen, das Potential verändert sich um-

gekehrt proportional zur Entfernung von jedem Körper, das hieße aber zu unserer alten Fernwirkungsvorstellung zurückzukehren. Sie können das Gesetz dergestalt formulieren, daß Sie gar nicht wissen müssen, was irgendwo außerhalb einer kleinen Kugel vor sich geht. Um das Potential im Mittelpunkt dieser Kugel herauszufinden, genügt es, das Potential auf ihrer Oberfläche – und sei sie noch so klein – zu kennen. Sie brauchen nicht erst lang draußen herumzusuchen, Sie berichten mir lediglich, wie groß es in der Nachbarschaft ist und welche Masse sich innerhalb der Kugel befindet. Die Regel lautet: Das Potential im Mittelpunkt ist gleich dem Mittelwert des Potentials auf der Oberfläche der Kugel, abzüglich der uns aus der anderen Gleichung bereits bekannten Konstanten G , geteilt durch den doppelten Kugelradius (den wir anennen wollen), multipliziert mit der in der Kugel befindlichen Masse, falls die Kugel klein genug ist.

$$\text{Potential at centre} = \text{Av. pot. on ball} - \frac{G}{2a} (\text{mass inside})$$

(Potential im Mittelpunkt = Mittelwert des Potentials auf der Kugeloberfläche – $G/2a \times$ Masse innerhalb der Kugel)

Wie Sie sehen, unterscheiden sich beide Gesetze: Das eine erklärt uns, was an einem bestimmten Punkt passiert, vermittels dessen, was in der unmittelbaren Nachbarschaft geschieht, während uns Newtons Gesetz darüber aufklärt, was zu einem bestimmten Zeitpunkt geschieht, indem es uns sagt, was zu einem anderen Zeitpunkt geschieht. Mit Newtons Gesetz können wir das Geschehen von Augenblick zu Augenblick verfolgen, während es im Raum von Ort zu Ort wechselt. Die zweite Aussage ist auf einen Zeit- und auf einen Ortspunkt fixiert, da sie nur davon abhängt, was in der Nachbarschaft passiert. Mathematisch aber sind beide Aussagen völlig äquivalent.

Nun kann man das Gravitationsgesetz auf noch eine, gänzlich andere, Art ausdrücken, die sich in der Anschauung und

den damit einhergehenden qualitativen Vorstellungen von ihren beiden Vorgängern unterscheidet. Denjenigen unter Ihnen, die an der Fernwirkung keinen Gefallen finden, habe ich gezeigt, wie man ohne sie auskommen kann. Nun möchte ich Ihnen eine Darlegung vorführen, die philosophisch das genaue Gegenteil darstellt. Hierbei wird kein Gedanke darauf verschwendet, wie der Körper seinen Weg von Ort zu Ort bewerkstelligt; die Frage wird in Bausch und Bogen mit einer Gesamtdarstellung beantwortet. Nehmen wir an, Sie haben eine Reihe von Teilchen und möchten wissen, wie eins von einer Stelle zu einer anderen gelangt, so konstruieren Sie eine mögliche Bewegung, die in einem bestimmten Zeitraum von einem Ort zum anderen führt (Abb. 13). Sagen wir, das Teilchen möchte in einer Stunde von X nach Y gelangen, und Sie möchten wissen, welchen Weg es nehmen kann. Also ersinnen Sie verschiedene Kurven und berechnen für jede eine bestimmte Größe. (Mit der Art dieser Größe möchte ich Sie nicht weiter behelligen; für jene, die schon von diesen Begriffen gehört haben, sei gesagt, daß es sich dabei um den Mittelwert der Differenz zwischen der kinetischen und der potentiellen Energie handelt.)

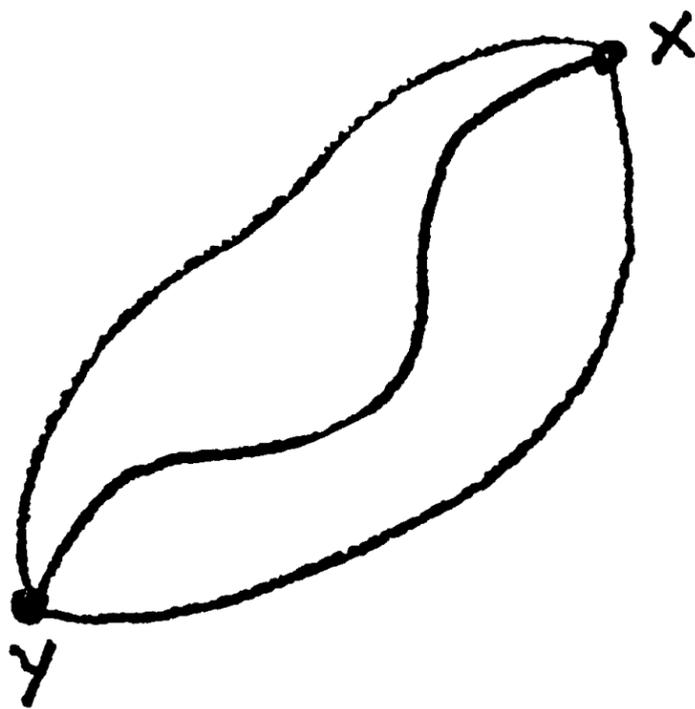


Abbildung 13

Berechnen Sie die Größe erst für einen Weg und anschließend für einen anderen, dann erhalten Sie für jede Route verschiedene Zahlen. Unter all den Wegen aber gibt es einen mit der

kleinstmöglichen Zahl, und just diesen schlägt das Teilchen in der Natur ein! Wir beschreiben jetzt die wirkliche Bewegung, die Ellipse, indem wir etwas über die ganze Kurve aussagen. Die Vorstellung der Kausalität, also, daß das Teilchen die Anziehungskraft spürt und ihr nachgibt, ist auf der Strecke geblieben. Statt dessen wittert es auf irgendeine großartige Weise sämtliche Kurven und Möglichkeiten und entscheidet sich für die ihm genehmste (d. h. die mit der kleinsten Größe).

Das ist nur ein Beispiel für die vielen schönen Möglichkeiten, die Natur zu beschreiben. Haben Sie es mit jemandem zu tun, der die Kausalität in der Natur betont, nehmen Sie das Newtonsche Gesetz; will Ihr Partner die Natur in Begriffen des Prinzips der kleinsten Wirkung ausgedrückt wissen, verweisen Sie ihn auf den eben besprochenen letzten Weg; bevorzugt er dagegen ein lokales Feld, so kann er auch das haben. Die Frage ist nur: Welches Gesetz ist richtig? Sind die verschiedenen Alternativen mathematisch nicht genau gleichwertig, unterscheiden sie sich hinsichtlich gewisser Schlußfolgerungen, so brauchen wir nur durch Experimente herauszufinden, für welchen Weg sich die Natur selbst entscheidet. Nun kommen manche mit philosophischen Argumenten daher, warum sie die eine Möglichkeit einer anderen vorziehen würden. Die Erfahrung aber hat gezeigt, daß die philosophische Intuition angesichts der Vorgänge in der Natur versagt. Es bleibt nichts anderes übrig, als sämtliche Möglichkeiten auszuarbeiten und sie der Reihe nach durchzuprobieren. In unserem Fall indessen *sind* die Theorien exakt gleichwertig. Mathematisch haben alle drei Formeln, das Newtonsche Gesetz, die lokale Feldtheorie und das Hamiltonsche Prinzip, genau die gleichen Folgen. Was sollen wir nun machen? Alle Bücher behaupten, daß wir wissenschaftlich keiner den Vorzug geben können. Und das stimmt. Sie sind wissenschaftlich gleichwertig. Es ist unmöglich, eine Wahl zu treffen, da es keinen experimentellen Weg gibt, zwischen Möglichkeiten zu unterscheiden, die alle dieselben Folgen haben. Psychologisch unterscheiden sie sich allerdings in zweifacher Hinsicht. Er-

stens, indem Sie sie philosophisch bejahen oder ablehnen, und gegen diese Krankheit gibt es nur ein Heilmittel: Ausbildung. Zweitens psychologisch, weil sie sich als völlig unterschiedlich erweisen, sobald Sie versuchen, von ihnen auf neue Gesetze zu schließen.

So lange aber die Physik nicht abgeschlossen ist und wir versuchen, weitere Gesetze zu begreifen, so lange können uns die verschiedenen möglichen Formulierungen einen Hinweis auf das geben, was unter anderen Umständen geschehen könnte, uns also Vermutungen nahelegen, wie die Gesetze in einer weniger eingeschränkten Situation aussehen könnten. So betrachtet sind die verschiedenen Möglichkeiten zumindest psychologisch nicht äquivalent. Schauen wir uns ein Beispiel an. Einstein hatte erkannt, daß sich *elektrische* Signale nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können und vermutete ein allgemeines Prinzip. (Er spielte dasselbe Ratespiel wie wir, als wir den Drehimpuls-Erhaltungssatz von dem von uns bewiesenen Sonderfall auf die restlichen Phänomene des Universums ausdehnten.) Er nahm an, daß seine Entdeckung für alle Erscheinungen zutreffe, auch für die Gravitation. Wenn sich Signale nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen können, erweist sich die Methode, die Kräfte von Augenblick zu Augenblick zu beschreiben, als recht untauglich. So nimmt sich Newtons Methode in Einsteins Verallgemeinerung der Gravitation hoffnungslos inadäquat und enorm kompliziert aus, während sich die Feldmethode ebenso wie das Minimalprinzip einfach und einleuchtend einpassen. Zwischen den beiden letztgenannten haben wir uns noch nicht entschieden.

In der Tat zeigt sich, daß in der Quantenmechanik beide in der von mir angegebenen Formulierung nicht genau zutreffen. Die Tatsache aber, daß es überhaupt ein Minimalprinzip gibt, erweist sich als eine Folge der Tatsache, daß kleine Teilchen der Quantenmechanik gehorchen. Das beste Gesetz nach gegenwärtigem Verständnis ist eine Kombination von Minimalprinzipien und lokalen Gesetzen. Wie wir derzeit meinen,

müssen die Gesetze der Physik ihrem Wesen nach lokal sein und das Prinzip der kleinsten Wirkung berücksichtigen, aber mit Gewißheit wissen wir das nicht. Fällt in einem auf wackligen Prämissen errichteten Gedankengebäude ein Teil als falsch aus, bedarf es nur geringfügiger Änderung, wenn man es auf die richtigen Axiome aufgebaut hat, von denen womöglich nur eines zusammenbricht, während die übrigen bleiben können. Genausogut aber kann, haben Sie eine andere Reihe von Axiomen ausgewählt, Ihr ganzes Gebäude einstürzen, weil sich alles just auf das eine, falsche, stützen. Im voraus läßt sich gar nichts sagen. Wir wissen nicht, welche Formulierung uns weiterhelfen wird. Wir sind auf unsere Intuition angewiesen. Vor allem aber müssen wir stets sämtliche Alternativen im Kopf haben. Deshalb betreiben Physiker babylonische Mathematik und schenken dem logischen Schlußfolgern aus vorgegebenen Axiomen nur wenig Beachtung.

Diese Vielfalt der Interpretationsmöglichkeiten gehört zu den erstaunlichen Eigenschaften der Natur. Voraussetzung dafür ist, wie sich zeigt, eben dieses ganz spezielle, delikate Wesen der physikalischen Gesetze. Zum Beispiel kann das Gravitationsgesetz nur deshalb lokal ausgedrückt werden, weil die Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ist; stünde anstelle des Quadrats die dritte Potenz des Abstands, wäre es nicht auf diese Weise möglich. Am anderen Ende der Gleichung ermöglicht die Tatsache, daß die Kraft in Beziehung zur Änderungsrate der Geschwindigkeit steht, das Gesetz mit Hilfe des Prinzips von der kleinsten Wirkung zu formulieren. Wäre die Kraft statt dessen beispielsweise proportional zur Änderungsrate der Position, ließe sich das Gesetz nicht so formulieren. Wenn Sie die Gesetze stark modifizieren, schränken Sie, wie Sie feststellen werden, die Möglichkeiten der Formulierung ein. Warum sich korrekte physikalische Gesetze auf so vielfältige und unterschiedliche Weise ausdrücken lassen, ist mir bis heute ein Geheimnis geblieben. Ich bin noch immer nicht dahintergekommen, wie sie es schaffen, verschiedene Tore anscheinend gleichzeitig zu passieren.

Nun ein paar allgemeinere Worte zur Beziehung zwischen Mathematik und Physik. Die Mathematiker befassen sich nur mit der Struktur der Schlußfolgerungen; worüber sie reden, kümmert sie im Grunde wenig. Mehr noch, sie brauchen auch gar nicht zu wissen, wovon sie reden oder, wie sie sich selber ausdrücken, ob ihre Aussagen wahr sind. Lassen Sie mich Ihnen das erklären. Sie stellen die Axiome auf, das und das ist so und dies und jenes so. Was geschieht nun? Der logische Weg ist vorgezeichnet, egal ob Sie wissen, was die Worte das und das bedeuten oder nicht. Voraussetzung ist nur, daß die Aussagen über die Axiome sorgfältig formuliert und vollständig genug sind, damit der Mann, der die Schlüsse daraus zieht, ohne die Bedeutung der Wörter zu kennen, neue Schlüsse in derselben Sprache ziehen kann. Kommt in einem der Axiome das Wort Dreieck vor, wird sich auch in der Schlußfolgerung eine Aussage über Dreiecke finden, ohne daß der Mann, der die Schlüsse gezogen hat, eine Ahnung zu haben braucht, was ein Dreieck ist. Ich aber kann seine Schlußfolgerung von hinten lesen und sagen: »Ein Dreieck ist ein dreiseitiges Gebilde mit den und den Eigenschaften«, und schon weiß ich die von ihm entdeckten neuen Fakten. Mit anderen Worten, Mathematiker bereiten abstrakte Schlußfolgerungen vor, deren man sich bloß zu bedienen braucht, wenn man eine Reihe von Axiomen über die reale Welt aufstellt. Der Physiker dagegen verbindet mit all seinen Sätzen eine Bedeutung – ein äußerst wichtiger Umstand, den Physiker, die von der Mathematik her kommen, oft nicht richtig einschätzen. Physik ist nicht Mathematik, und Mathematik ist nicht Physik. Eine hilft der anderen. Aber in der Physik müssen Sie den Zusammenhang zwischen Wörtern und wirklicher Welt begreifen. Unter dem Strich müssen Sie das, was Sie herausgefunden haben, ins Deutsche übersetzen, in die Welt, in die Kupfer- und Glasblöcke, mit denen Sie Ihre Experimente durchführen. Nur so können Sie feststellen, ob Ihre Schlußfolgerungen zutreffen – ein Problem, das die Mathematik nicht kennt.

Ohne Zweifel sind die von den Mathematikern erarbeiteten Schlußfolgerungen sehr effektiv und für die Physiker äußerst nützlich. Umgekehrt greifen auch die Mathematiker manchmal auf die von den Physikern entwickelte Argumentation zurück.

Ziel der Mathematiker ist, ihre Schlüsse so allgemein wie möglich zu halten. Sage ich zu ihnen: »Ich möchte über den ganz gewöhnlichen dreidimensionalen Raum reden«, erwidern sie: »Bitte sehr, hier haben wir die Theoreme über einen Raum von n Dimensionen.« »Aber«, wende ich ein, »ich brauche doch nur den Fall 3.« »Nun«, entgegnen sie, »dann setzen Sie eben $n = 3$.«! So zeigt sich, daß viele ihrer komplizierten Theoreme wesentlich einfacher werden, sobald sie auf einen speziellen Fall angewendet werden. Der Physiker ist stets am speziellen Fall interessiert; der Allgemeinfeld läßt ihn kalt. Er redet ganz konkret über eine Sache und nicht abstrakt über alles mögliche. Er möchte über das Gravitationsgesetz in drei Dimensionen reden, nicht über eine x -beliebige Kraft im Falle von n Dimensionen. Also muß er die Lösungen bis zu einem gewissen Grad reduzieren, die vom Mathematiker ja für einen weiteren Problembereich ausgelegt worden sind – was sich im Endeffekt als sehr nützlich erweist, denn über kurz oder lang kommt der arme Physiker doch stets angekrochen: »Verzeihen Sie, daß ich damals nichts von Ihren vier Dimensionen wissen wollte . . .«

Wenn Sie wissen, wovon Sie reden, nämlich daß die einen Symbole Kräfte, die anderen Massen, die Trägheit und so weiter darstellen, können Sie mit einer Portion gesundem Menschenverstand und dem Gefühl, sich in der Welt auszukennen, ziemlich weit kommen. Sie haben schon eine Menge gesehen und wissen mehr oder weniger, wie die Sache laufen wird. Der arme Mathematiker dagegen übersetzt alles in Gleichungen, und da die Symbole für ihn nicht mit einer bestimmten Bedeutung verknüpft sind, hat er keine Richtschnur außer dem Rigorismus der Mathematik und einer sorgfältigen Argumentation. Der Physiker hinwiederum, der mehr oder weniger

weiß, was als Antwort herauskommt, kann teilweise ein bißchen über den Daumen peilen und so ziemlich schnell vorankommen. Mathematischer Rigorismus von großer Präzision ist in der Physik nicht unbedingt empfehlenswert. Dennoch sollte man den Mathematiker deshalb nicht kritisieren. Schließlich hat er keine Veranlassung, das zu tun, was für den Physiker nützlich wäre. Jeder geht seinen eigenen Geschäften nach. Wenn der Physiker eine Extrawurst will, muß er sie sich eben selber braten.

Als nächstes erhebt sich die Frage, ob wir bei dem Versuch, ein neues Gesetz zu erraten, etwas auf unser Gefühl, uns in der Welt auszukennen, und auf philosophische Vorlieben, wie »Das Hamiltonsche Prinzip gefällt mir nicht« oder »Das Minimalprinzip sagt mir zu«, »Mit der Fernwirkung kann ich nicht viel anfangen« oder »Die Fernwirkung liegt mir«, geben sollen. Anders gefragt, wie hilfreich sind Modelle? Es ist interessant, daß sie sich sehr oft als hilfreich erweisen, und die meisten Physikprofessoren sind bemüht, ihren Studenten beizubringen, wie man sich ihrer bedienen und Fingerspitzengefühl für physikalische Vorgänge entwickeln kann. Immer wieder stellt sich jedoch heraus, daß sich die großen Entdeckungen samt und sonders von ihnen entfernen und viel abstraktere Formen annehmen, kurzum daß Modelle für die wirklich großen Würfe nicht taugen. Maxwells Entdeckung der Elektrodynamik arbeitete zunächst mit allerlei Rädern und Zwischenrädern im Raum und funktionierte erst so richtig, nachdem sie von dem ganzen Brimborium befreit war. Dirac* erriet die korrekten Gesetze der relativistischen Quantenmechanik im wahrsten Sinne des Wortes. Er stellte eine Gleichung auf und hatte damit das Gesetz entdeckt – allem Anschein nach eine recht effektive Methode, die einmal mehr beweist, wie gut sich die Mathematik eignet, die Tiefen der Natur auszuloten. Dagegen können alle Versuche, sie durch philosophische Prin-

* Paul Dirac, 1902–1984, britischer Physiker, erhielt 1933 zusammen mit Schrödinger den Nobelpreis.

zipien zu erfassen oder durch die Einbildung, sich auszukennen, einpacken.

Ich kann mich nicht damit abfinden, daß wir mit unseren heutigen Gesetzen einen Computer brauchen, um durch eine Unzahl logischer Operationen herauszubringen, was in einem winzigen Raum in einer winzigen Zeitspanne vor sich geht. Wie ist es möglich, daß all das in diesem winzigen Zeitraum geschieht? Warum sollte ein unendlicher Aufwand an Logik erforderlich sein, um die Vorgänge in einem einzigen winzigen Stückchen Raum/Zeit herauszufinden? Deshalb hänge ich irgendwie an der Hypothese, daß die Physik letztendlich der Mathematik nicht bedarf, daß zu guter Letzt die Maschinerie ans Licht kommen wird und die Gesetze sich als so einfach erweisen wie die Regeln des vordergründig scheinbar komplexen Schachspiels. Aber diese Spekulation ist keinen Deut besser als das »Mag ich« und »Mag ich nicht« der andern; man sollte sich darum hüten, in diesen Dingen allzu voreingenommen zu sein.

Zusammenfassend möchte ich Jeans zitieren: »Der Große Baumeister scheint ein Mathematiker zu sein.« Jedenfalls fällt es schwer, die Schönheit der Natur in ihrem ganzen Umfang zu erfassen ohne mathematische Kenntnisse. C. P. Snow sprach von zwei Kulturen. Meiner Ansicht nach verläuft die Trennungslinie zwischen denen, die dank dem Verständnis der Mathematik die Schönheit der Natur erfahren haben und jenen, denen dieses Erlebnis versagt bleibt.

Ein Jammer, daß es ausgerechnet Mathematik sein muß, und daß Mathematik manchen Leuten so schwerfällt. Euklid soll einem König, der bei ihm die Geometrie zu erlernen suchte und sich beklagte, daß es so schwierig sei, geantwortet haben: »Zur Geometrie gibt es nun einmal keinen Königsweg.« Es gibt in der Tat keinen Königsweg. Die Physik läßt sich in keine andere Sprache übersetzen. Wenn Sie etwas über die Natur erfahren, sich ein Bild von ihr machen wollen, müssen Sie sich der Sprache bedienen, die sie spricht. Sie gibt ihr Geheimnis nur in einer Form preis, und wir sind nicht so ver-

messen, sie aufzufordern, sich zu ändern, ehe wir ihr überhaupt unsere Aufmerksamkeit zuwenden.

Wie Sie tauben Ohren die Erfahrung des Musikgenusses selbst nicht mit Engelszungen zu vermitteln vermögen, läßt sich auch das wahre Verständnis der Natur den Jüngern »der anderen Kultur« durch kein Argument der Welt erschließen. Philosophen versuchen, Sie qualitativ über die Natur aufzuklären. Ich versuche sie zu beschreiben. Aber es kommt nicht rüber, ganz einfach, weil es unmöglich ist. Vielleicht ist dieser beschränkte Horizont der Grund dafür, warum manche Leute imstande sind, sich steif und fest einzubilden, daß der Mensch der Mittelpunkt des Universums sei.

3. Die großen Erhaltungssätze

Schaut man sich die Gesetze der Physik an, so findet man eine große Zahl komplizierter und detaillierter Gesetze wie die Gesetze der Gravitation, des Elektromagnetismus, der Wechselwirkungen im Atomkern und so fort; aber in der Vielfalt dieser detaillierten Gesetze und sie übergreifend entdeckt man große allgemeine Prinzipien, denen alle die Gesetze zu gehorchen scheinen. Hierher gehören die Erhaltungssätze, bestimmte Symmetrieeigenschaften, die allgemeine Form der quantenmechanischen Prinzipien und leider auch, oder zum Glück, die von uns in der letzten Vorlesung betrachtete Tatsache, daß alle Gesetze mathematisch sind. Diesmal wollen wir uns den Erhaltungssätzen zuwenden.

Der Physiker verwendet ganz gewöhnliche Wörter in einer besonderen Weise. Für ihn bedeutet ein Erhaltungsgesetz, daß es eine Zahl gibt, die er zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnen kann, und daß sich diese Zahl, wenn er sie zu einem späteren Zeitpunkt, nachdem die Natur eine Vielzahl von Veränderungen erfahren hat, wieder berechnet, ihrerseits nicht verändert hat. Ein Beispiel dafür liefert die Erhaltung der Energie. Wir haben eine bestimmte Menge, die wir mit Hilfe einer bestimmten Regel berechnen können, und egal, was passiert, die Antwort wird immer gleich bleiben.

Es wird Ihnen einleuchten, daß sich so etwas als zweckmäßig erweisen kann. Betrachten wir die Physik oder lieber die Natur als ein riesengroßes Schachspiel mit Millionen und Abermillionen Steinen, dessen Regeln wir herausfinden möchten. Die großen Götter, die dieses Schach spielen, sind sehr rasch, und wir haben unsere liebe Not, die Züge zu beob-

achten und etwas mitzubekommen. Trotzdem reimen wir uns einige Regeln zusammen, darunter einige, die nicht erfordern, daß wir jeden Zug beobachten. Nehmen wir zum Beispiel an, es ist nur noch ein schwarzer Läufer auf dem Brett, so können wir, da er sich nur diagonal bewegen und deshalb nie die Farbe der Quadrate wechseln darf, erwarten, daß er, wenn wir das Spiel der Götter für einen Augenblick aus den Augen gelassen haben, nach wie vor auf derselben Farbe steht, wenn auch vielleicht an einem anderen Platz. Das liegt in der Natur eines Erhaltungsgesetzes. Wir brauchen nicht unbedingt die Innenwelt zu beobachten, um zumindest etwas über das Spiel aussagen zu können.

Allerdings ist diese bestimmte Schachregel nicht notwendig absolut gültig. Schauen wir nämlich lange genug weg, könnte es sein, daß der Läufer geschlagen würde, ein Bauer bis zur Königin gelangte und der Gott einen Läufer am Platz dieses Bauern, diesmal zufällig auf einem schwarzen Quadrat, für günstiger hielte als eine Königin. Betrüblerweise könnte es sich auch bei einigen unserer physikalischen Gesetze eines Tages herausstellen, daß sie so, wie wir sie heute formulieren, nicht exakt stimmen; aber das soll unsere Sorge hier nicht sein.

Ich habe Ihnen gesagt, daß wir ganz gewöhnliche Wörter in einer technischen Weise verwenden, und ein solches Wort ist in der Bezeichnung dieser Vorlesung das Wort »groß«. »Die großen Erhaltungssätze«. In diesem Fall handelt es sich aber nicht um einen *terminus technicus*. Ich habe das Wort lediglich eingeflochten, um dem Titel mehr Gewicht zu verleihen; genausogut hätte ich mich mit »Die Erhaltungssätze« begnügen können. Allerdings gibt es einige Erhaltungssätze, die nicht so recht funktionieren, die nur näherungsweise richtig sind, sich manchmal als nützlich erweisen und die wir als die »kleinen« Erhaltungssätze bezeichnen könnten. Den einen oder anderen von ihnen werde ich später streifen, im großen und ganzen jedoch möchte ich mich mit den wichtigen beschäftigen, die, soweit wir das heute beurteilen können, absolut zutreffen.

Lassen Sie mich mit dem am leichtesten verständlichen Gesetz beginnen, der Erhaltung der elektrischen Ladung. Hier haben wir es mit einer Zahl zu tun, der Gesamtladung in der Welt, die sich nicht verändert, egal, was passiert. Verliert man sie an einen Ort, findet man sie an einem anderen wieder. Daß die Gesamtladung eines geschlossenen Systems erhalten bleibt, hat Faraday* experimentell entdeckt. Er installierte in einer großen metallenen Hohlkugel ein Gewirr von Drähten und elektrischen Vorrichtungen, brachte zur Messung der Ladung auf der Kugel – wo schon eine kleine Ladung einen großen Effekt hervorruft – ein äußerst empfindliches Galvanometer an, und erzeugte nun im Inneren Ladungen. Er rieb Glasstäbe mit Katzenfellen und baute große elektrostatische Maschinen, so daß die Kugel einem jener Laboratorien aus Horrorfilmen glich, aber was er auch anstellte, auf der Oberfläche entstand keinerlei Ladung. Es gelang ihm nicht, eine meßbare Ladung zu erzeugen. Zwar mochte der Glasstab, nachdem er ihn mit dem Katzenfell gerieben hatte, positiv aufgeladen sein, dafür war das Fell im selben Maße negativ geladen, so daß die Gesamtladung stets null war. Das Galvanometer an der Außenseite, eigens angebracht, um die Ladung im Inneren zu messen, rührte sich nicht. Die Gesamtladung blieb offensichtlich erhalten.

Das ist nicht schwer zu verstehen; es läßt sich anhand eines ganz einfachen Beispiels, das nichts mit Mathematik zu tun hat, erklären. Angenommen, die Welt bestünde nur aus zwei Teilchenarten, Elektronen und Protonen – und eine Zeitlang sah es aus, als wäre alles so einfach –, und angenommen, die Elektronen wären negativ geladen und die Protonen positiv, so daß wir sie trennen könnten. Dann könnten wir ein Stück Materie nehmen und mehr Elektronen dazugeben oder welche wegnehmen; vorausgesetzt jedoch, daß Elektronen stabil sind und weder zerfallen noch sonst irgendwie verschwinden – eine einfache Annahme, die keine mathematischen Kennt-

* Michael Faraday, 1791–1867, englischer Physiker

nisse voraussetzt –, dann würde sich die Gesamtzahl der Protonen minus der Gesamtzahl der Elektronen nicht verändern. In der Tat verändert sich in diesem besonderen Fall weder die Gesamtzahl der Protonen noch die der Elektronen. Doch wir wollen uns hier auf die Ladung konzentrieren. Der Beitrag der Protonen ist positiv, der der Elektronen negativ, und wenn diese Teilchen niemals allein erschaffen oder zerstört werden, bleibt auch die Gesamtladung erhalten. Im folgenden will ich eine Liste derjenigen Größen aufstellen, die erhalten bleiben, und diese im Verlauf der Vorlesung eintragen (Abb. 14). Beginnen wir mit der Ladung. Die Frage, ob die Ladung erhalten bleibt, beantworte ich mit »ja«.

Diese theoretische Interpretation ist erfreulich einfach, nur können Elektronen und Protonen, wie man später entdeckte, vernichtet und erzeugt werden; beispielsweise kann ein Neutron genanntes Teilchen in ein Proton und ein Elektron zerfallen – plus noch etwas, worauf wir gleich kommen werden. Das Neutron erweist sich jedoch als elektrisch neutral. So hebt sich die Ladung, obwohl die Protonen nicht stabil sind und ebensowenig die Elektronen, in dem Sinne, als sie aus einem Neutron entstehen können, unter dem Strich wieder auf. Ausgehend von der Ladung null hatten wir plus eins und minus eins, was zusammen wieder null macht.

Nun gibt es neben dem Proton ein anderes positiv geladenes Elementarteilchen, das sogenannte Positron, eine Art spiegel-

	1) Charge	2) Baryon No.	3) Strangeness	4) Energy	5) Angular Momentum
6) Conserved (locally)	Yes	Yes	Nearly	Yes	Yes
7) Comes in Units	Yes	Yes	Yes	No	Yes
8) Source of a field	Yes	?	?	Yes	

Abbildung 14 NB. Das ist die von Professor Feynman im Laufe der Vorlesung ausgefüllte Tabelle.

1) Ladung 2) Baryonenzahl 3) Strangeness 4) Energie 5) Drehimpuls
6) wird (lokal) erhalten 7) tritt in Einheiten auf 8) Quelle eines Feldes

bildliches Elektron, das dem Elektron in fast allen Punkten gleicht, nur daß seine Ladung das entgegengesetzte Vorzeichen hat, wichtiger noch, daß es ein sogenanntes Antiteilchen ist. Trifft es mit einem Elektron zusammen, können sich die beiden gegenseitig vernichten und zerfallen, und herauskommt nichts als Licht. Ein Elektron plus ein Positron ergeben nichts als Licht, auch wenn dieses »Licht«, da es aus Gammastrahlen besteht, für das menschliche Auge unsichtbar ist. Für den Physiker ist es, abgesehen von der Wellenlänge, ein und dasselbe. So können sich ein Teilchen und sein Antiteilchen gegenseitig vernichten. Das Licht hat selbst keine elektrische Ladung, aber wir haben eine positive und eine negative Ladung verloren und somit die Gesamtladung nicht verändert. Die Theorie von der Erhaltung der Ladung ist also ein bißchen komplizierter, aber immer noch recht unmathematisch. Man zählt schlicht und einfach die Anzahl der Positronen und die Anzahl der Protonen zusammen und zieht davon die Anzahl der Elektronen ab. Das heißt, es gibt obendrein andere Teilchen, die wir berücksichtigen müssen, zum Beispiel Antiprotonen, die eine negative Ladung beisteuern, Pi-plus Mesonen, die positiv geladen sind, und so weiter, denn de facto haben in der Natur alle Elementarteilchen eine Ladung (u. U. null). Wir brauchen also nur alles zusammenzuzählen, und was bei welcher Reaktion auch immer passiert, die Gesamtsumme der Ladung auf der einen Seite muß gleich dem Betrag auf der anderen Seite sein.

Das ist ein Aspekt der Erhaltung der Ladung. Nun erhebt sich eine interessante Frage. Genügt es zu sagen, die Ladung bleibt erhalten oder müssen wir etwas weiter ausholen? Blicke die Ladung nämlich erhalten, weil sie als ein reales Teilchen sich herumbewegte, so besäße sie eine ganz besondere Eigenschaft. Die Gesamtladung in einer Schachtel könnte dann auf zwei verschiedenen Arten erhalten bleiben. Einmal könnte sich die Ladung von einem Ort zum anderen in der Schachtel bewegen. Zum andern könnte sie an einem Ort verschwinden, gleichzeitig aber an einem anderen Ort wieder eine Ladung

auftauchen, so daß sich die Gesamtladung nie veränderte. Diese zweite Möglichkeit der Erhaltung unterscheidet sich offensichtlich von der erstgenannten, bei der, wenn die Ladung an einem Ort verschwindet und an einem anderen auftaucht, etwas den dazwischen liegenden Raum durchqueren muß. Diese zweite Form der Erhaltung der Ladung wird als lokale Ladungserhaltung bezeichnet und geht schon weit mehr ins Detail als die schlichte Feststellung, daß sich die Gesamtladung nicht verändert. Wir verbessern das Gesetz also, falls zutrifft, daß die Ladung lokal erhalten bleibt. Und in der Tat trifft dies zu. Wie Sie sich erinnern, habe ich schon gelegentlich versucht, Ihnen einige der Möglichkeiten aufzuzeigen, wie man eine Idee durch logisches Folgern mit einer anderen verbinden kann. Nun möchte ich Ihnen ein letztlich auf Einstein zurückgehendes Argument vorführen, das beweist, daß, wenn irgend etwas erhalten bleibt – in unserem Fall die Ladung –, es lokal erhalten bleiben muß. Dieses Argument stützt sich auf folgendes Gedankenspiel: Wenn zwei Raumschiffe aneinander vorbeigleiten, ist durch kein wie immer geartetes Experiment zu klären, welcher Raumfahrer sich bewegt und welcher stillsteht. Das ist das sogenannte Relativitätsprinzip: Eine gleichförmige, geradlinige Bewegung ist relativ; unter welchem der beiden Blickwinkel man ein Phänomen auch betrachtet, es läßt sich nicht herausfinden, wer stillsteht und wer sich bewegt.

Angenommen, ich habe zwei Raumschiffe, A und B (Abb. 15). Ich stelle mich auf den Standpunkt, daß A an B vorbeizieht. Wie Sie sich erinnern, ist das Ansichtssache; genausogut könnten Sie die Sache anders herum betrachten und würden doch die gleichen Naturerscheinungen erhalten. Nehmen wir weiter an, daß derjenige, der stillsteht, sich überzeugen möchte, ob er wirklich zur selben Zeit am einen Ende seines Schiffes eine Ladung hat verschwinden und am anderen Ende eine hat auftauchen sehen; und daß er sich, um sicherzugehen, daß es auch wirklich gleichzeitig war, in die Mitte seines Raumschiffes begibt. Säße er nämlich vorn in seinem Ge-

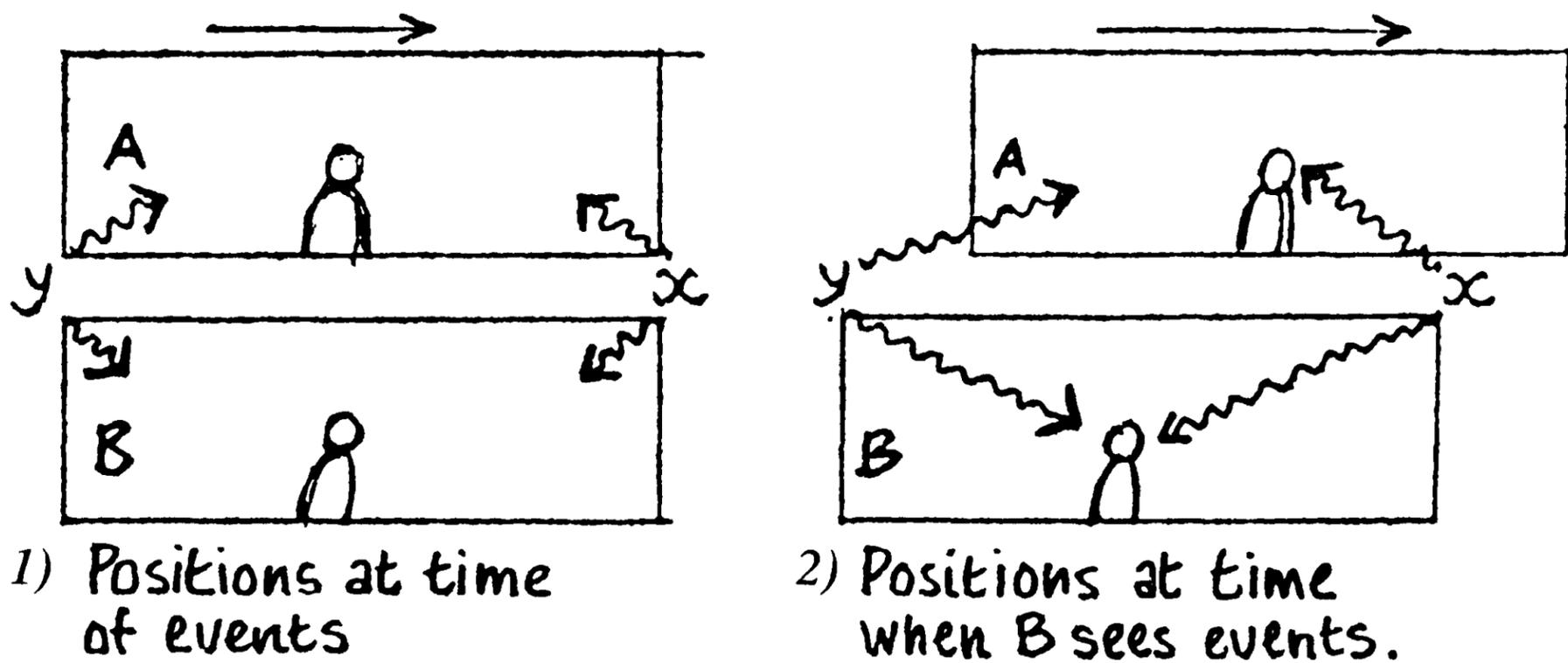


Abbildung 15 1) Positionen zum Zeitpunkt der Ereignisse 2) Positionen zum Zeitpunkt, an dem B die Ereignisse sieht.

fährt, würde er das eine vor dem anderen sehen, weil das Licht eine bestimmte Zeit braucht, um einen Weg zurückzulegen. Unser Mann im anderen Raumschiff stellt dieselben Überlegungen an. Jetzt leuchtet ein Lichtblitz im Punkt x auf, eine Ladung ist entstanden, und gleichzeitig blinkt Punkt y am anderen Ende des Schiffes auf, wo die Ladung vernichtet wird und verschwindet. Notabene im selben Augenblick, was perfekt in unser Konzept von der Erhaltung der Ladung paßt. Verlieren wir ein Elektron an einem Ort, bekommen wir anderswo wieder eins dafür, aber nicht, indem irgend etwas den Zwischenraum durchquerte. Damit wir beobachten können, was vor sich geht, soll also das Verschwinden der Ladung und die Entstehung einer Ladung durch einen Blitz angezeigt werden. B nun behauptet, beide Vorgänge seien gleichzeitig erfolgt. Schließlich hat er sich ja ganz bewußt in der Mitte des Raumschiffs postiert, damit ihn das Licht, das beim Entstehen einer Ladung in x aufblitzt, zur selben Zeit erreichen kann, wie das beim Verschwinden der Ladung in y aufblitzende. Daher seine Aussage: »Ja, als die eine Ladung verschwand, entstand eine andere.« Und was sagt unser Mann im Raumschiff A dazu? »Nein«, erklärt er, »du täuschest dich, mein Lieber. Ich habe genau gesehen, daß x entstand, ehe y verschwand.«

Was auch stimmt – weil sich A auf x zu- und von y fortbewegte, so daß das Licht von x einen kürzeren Weg bis zu ihm zurückzulegen hatte als das von y. Er könnte also sagen: »Nein, erst entstand x, und danach verschwand y, also hat es für einen kurzen Augenblick eine Ladung gegeben. Das aber verstößt gegen das Gesetz der Erhaltung der Ladung.« Dagegen wendet unser erster Mann ein: »Mag sein, aber du bewegst dich ja.« Darauf der andere: »Und woher willst du das wissen? Mir scheint, daß du dich bewegst«, und so weiter und so fort. Wenn wir aber außerstande sind, durch irgendein Experiment ein Unterscheidungsmerkmal in den physikalischen Gesetzen festzustellen, ob wir uns bewegen oder nicht, wären nur bestimmte Menschen imstande, das Gesetz der Erhaltung der Ladung – vorausgesetzt, es wäre nicht lokal – richtig funktionieren zu sehen, nämlich der Mann im stillstehenden Raumschiff, der sich im absoluten Sinne nicht bewegte. So etwas aber ist laut Einsteins Relativitätstheorie unmöglich, und deshalb kann es auch keine nichtlokale Erhaltung der Ladung geben. Der mit der Relativitätstheorie übereinstimmende lokale Charakter der Erhaltung der Ladung gilt übrigens für alle Erhaltungssätze. Begreiflicherweise, denn die Erhaltung, von was auch immer, muß ja wohl nach denselben Prinzipien erfolgen.

Bei der Ladung ist eine weitere Eigenschaft zu erwähnen, eine recht sonderbare, für die wir bis heute keine rechte Erklärung gefunden haben. Sie hat nichts mit dem Erhaltungsgesetz zu tun, sie existiert völlig unabhängig davon: Die Ladung tritt stets in Einheiten auf. Ein geladenes Teilchen hat entweder eine oder zwei Ladungen oder eine oder zwei Minusladungen. Tragen wir also in unsere obige Tabelle ein, auch wenn es mit der Erhaltung der Ladung nichts zu tun hat, daß sie in Einheiten erhalten wird. Das ist ein netter Zug an ihr, zumal die Theorie dadurch wesentlich vereinfacht wird. Es ist lediglich eine *Sache*, die wir zählen können, und die von Ort zu Ort geht. Und schließlich erweist sich technisch, daß sich die Gesamtladung eines Objekts leicht elektrisch be-

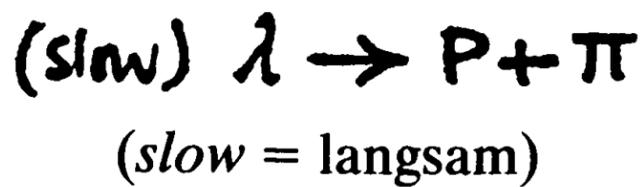
stimmen läßt, da die Ladung eine sehr wichtige Eigenschaft besitzt: Sie ist die Quelle eines elektromagnetischen Feldes. Ladung ist ein Maß für die Wechselwirkung zwischen einem Körper und der Elektrizität, einem elektrischen Feld. So sollten wir einen weiteren Punkt in unsere Liste aufnehmen und vermerken, daß Ladung die Quelle eines Feldes ist; mit anderen Worten, Elektrizität ist mit Ladung verknüpft. Somit hat die bestimmte Menge, die hier erhalten bleibt, zwei andere Aspekte, die mit der Erhaltung nicht direkt zu tun haben, aber dennoch interessant sind: daß sie in Einheiten auftritt, und daß sie die Quelle eines Feldes ist.

Daneben gibt es viele weitere Erhaltungssätze, von denen ich im folgenden noch einige anführen will. Sie sind insofern von derselben Art wie das Ladungserhaltungsgesetz, als es auch bei ihnen letztlich aufs Zählen hinausläuft. Ein solches anderes Gesetz postuliert die Erhaltung der Baryonenzahl. Zum Beispiel kann ein Neutron in ein Proton zerfallen. Zählen wir jedoch jedes Teilchen als eine Einheit oder ein Baryon, bleibt die Baryonenzahl erhalten. Das Neutron trägt eine baryonische Ladungseinheit beziehungsweise stellt ein Baryon dar, ebenso das Proton – wir tun also nichts weiter als Zählen und mit großen Wörtern um uns werfen! –, so daß sich, wenn bei besagtem Zerfall des Neutrons ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino entstehen, die Gesamtbaryonenzahl nicht ändert. Daneben kommen auch andere Reaktionen in der Natur vor. Zum Beispiel kann ein Proton plus ein Proton eine große Vielfalt sonderbarer Objekte hervorbringen, etwa ein Lambda, ein Proton und ein K plus. Lambda und K plus sind Bezeichnungen für bestimmte Elementarteilchen.



Bei dieser uns bekannten Reaktion haben wir auf der einen Seite zwei Baryonen, auf der anderen aber bloß eins, so daß

vermutlich entweder Lambda oder K^+ ein Baryon trägt. Wenn wir uns das Lambda später näher ansehen, werden wir entdecken, daß es sehr langsam in ein Proton und ein Pi-Meson zerfällt, und das Pi-Meson schließlich in ein Elektron und Was-weiß-ich-alles.



Unser vermißtes Baryon kommt also im Proton wieder zum Vorschein, was die Annahme nahelegt, daß das Lambda eine Baryonenzahl 1 hat, das K^+ dagegen nicht, es hat null.

Demnach können wir in unsere Tabelle der Erhaltungssätze (Abb. 14) neben der Ladung die Baryonen eintragen. Ihr Fall ist ganz ähnlich gelagert; hier lautet die spezielle Regel, die Baryonenzahl ist die Anzahl der Protonen plus der Anzahl an Neutronen plus der Anzahl an Lambdas, minus der Anzahl von Antiprotonen, minus der Anzahl von Antineutronen und so fort. Wieder läuft das Ganze aufs Zählen hinaus. Die Baryonenzahl bleibt erhalten und tritt in Einheiten auf; ob sie auch die Quelle eines Feldes ist, vermag niemand zu sagen, möchte aber jedermann gern aus Analogiegründen annehmen. Schließlich stellen wir solche Tabellen deshalb zusammen, weil wir hoffen, mit ihrer Hilfe Gesetze über nukleare Wechselwirkungen zu erraten, haben sie sich doch als probate Schnellstraße für solche Vermutungen bewährt. Wenn die elektrische Ladung, so die Schlußfolgerung, die Quelle eines Feldes ist, und die Baryonen sich im übrigen verhalten wie die Ladung, sollten sie eigentlich ebenfalls die Quelle eines Feldes sein. Schade, daß es bis jetzt nicht so aussieht; möglich wäre es trotzdem, aber wir wissen zu wenig, um sicher zu sein.

Dasselbe Zählspiel können wir noch in ein oder zwei anderen Fällen veranstalten, zum Beispiel für die Leptonenzahlen, aber an der Idee selbst ändert sich dabei nichts. Ein Fall jedoch weicht etwas ab. In der Natur laufen die Reaktionen zwischen diesen sonderbaren Teilchen jeweils auf eine ganz

charakteristische Art und Weise ab, zum Teil sehr schnell und einfach, zum Teil aber auch sehr langsam und schwer. Wobei ich unter einfach und schwer nicht die technische Abwicklung des Experiments verstehe, sondern die Schnelligkeit, mit der sich diese Reaktionen abspielen, wenn die Teilchen vorhanden sind. Beispielsweise unterscheiden sich die beiden bereits erwähnten Reaktionen deutlich: Der Zerfall eines Protonenpaares geht wesentlich schneller vonstatten als der Zerfall eines Lambdas. Greift man nur die schnellen und leichten Reaktionen heraus, erhält man ein weiteres Zählgesetz, bei dem das Lambda ein minus 1 bekommt, das K plus ein plus 1 und das Proton null. Das ist die sogenannte Strangenesszahl oder Hyperonenladung, und wie es den Anschein hat, gilt die Regel ihrer Erhaltung bei jeder schnell ablaufenden Reaktion, nicht dagegen für die langsamen. Deshalb müssen wir den Satz von der Erhaltung der Strangeness oder der Hyperonenzahl in unsere Tabelle (Abb. 14) eintragen. Sehr seltsam an dieser Größe ist freilich – und das ist der Grund, warum man sie als *strangeness* (Seltsamkeit) bezeichnet hat –, daß der Satz von ihrer Erhaltung nur annähernd stimmt, während zutrifft, daß sie in kleinsten Einheiten auftritt. Daß sie bei starken Wechselwirkungen erhalten bleibt, hat in den um die Erforschung der starken Wechselwirkungen – die für die Kernkräfte eine Rolle spielen – bemühten Physikern die Hoffnung geweckt, die Strangeness könnte ebenfalls die Quelle eines Feldes sein, aber auch in diesem Fall wissen wir es nicht. Immerhin zeigen Ihnen diese Beispiele, wie sich die Physiker die Erhaltungssätze zunutze machen, um neue Gesetze zu erraten.

Von Zeit zu Zeit wurden noch andere Erhaltungssätze ähnlicher, auf dem Zählen beruhender Art vorgeschlagen. Beispielsweise glaubten die Chemiker ehemals, daß – was auch geschehen mag – die Zahl der Natriumatome erhalten bleibe. Aber Natriumatome sind nicht stabil. Es ist möglich, die Atome eines Elements in die eines anderen zu verwandeln, und zwar so vollständig, daß das ursprüngliche Element komplett verschwunden ist. Einem anderen, eine Zeitlang für

wahr gehaltenen Gesetz zufolge sollte die Gesamtmasse eines Körpers stets gleich bleiben. Hier jedoch kommt alles auf die Definition von Masse und die Frage an, ob noch Energie ins Spiel kommt. Nach heutiger Auffassung trifft der Satz von der Erhaltung der Masse nur im Rahmen des Gesetzes von der Erhaltung der Energie zu, das ich im folgenden erörtern will. Dies ist von allen Erhaltungssätzen das schwierigste und abstrakteste und trotzdem das nützlichste. Es ist schwerer zu begreifen als die bis jetzt beschriebenen, da im Fall der Ladung wie der Baryonen und so weiter der Mechanismus auf der Hand lag, ging es doch mehr oder weniger um die Erhaltung von Dingen. Das stimmt zwar nicht absolut, zumal wir neue Dinge aus alten erhielten, dennoch brauchten wir im Grunde nichts weiter zu machen, als zu zählen.

Die Erhaltung der Energie ist insofern etwas schwieriger, als wir in diesem Fall zwar eine Zahl haben, die sich mit der Zeit nicht ändert, die aber keine bestimmte Sache darstellt. Lassen Sie mich das, was ich meine, an einem etwas albernen Beispiel näher erklären.

Stellen Sie sich eine Mutter vor, die ihr Kind mit 28 absolut unzerstörbaren Klötzchen in einem Zimmer sich selbst überläßt. Das Kind spielt den ganzen Tag über mit diesen Klötzchen, und als die Mutter diese nach ihrer Rückkehr nachzählt – sie überprüft die Erhaltung der Klötzchen unverdrossen die ganze Zeit! –, sind alle 28 vollzählig vorhanden. So geht das eine Zeitlang, doch eines schönen Tages findet sie nur 27 Klötzchen vor. Schließlich entdeckt sie das achtundzwanzigste vor dem Fenster; das Kind hatte es hinausgeworfen. Oberster Grundsatz bei den Erhaltungssätzen: Achten Sie darauf, daß nichts aus dem Zimmer verschwindet. Und vice versa, denn schließlich könnte genausogut ein Spielkamerad ein paar Klötzchen mitbringen und liegenlassen. Diese Dinge müssen Sie offensichtlich im Auge behalten, wenn Sie über Erhaltungssätze reden wollen. Nun kommt aber die Mutter eines Tages heim und findet nur 25 Klötzchen vor. Sie verdächtigt das Kind, die fehlenden in einer kleinen Spielzeugschachtel

versteckt zu haben und erklärt: »Ich werde jetzt diese Schachtel öffnen.« »Nein«, sagt das Kind, »die geht nicht auf.« Da sie eine sehr kluge Mutter ist, erwidert sie: »Ich weiß, daß die leere Schachtel 16 und jedes Klötzchen 3 Unzen wiegt, also brauche ich die Schachtel bloß zu wiegen.« Addiert sie nun noch die Zahl der sichtbaren Klötzchen,

$$\text{No. of blocks seen} + \frac{\text{Weight of box} - 16 \text{oz.}}{3 \text{oz.}}$$

$$\left(\text{Zahl der sichtbaren Klötzchen} + \frac{\text{Gewicht der Schachtel} - 16 \text{ Unzen}}{3 \text{ Unzen}} \right)$$

so hat sie ihre 28 wieder beieinander. Eine Zeitlang geht nun alles gut, doch dann kommt erneut eine falsche Zahl heraus. Da fällt ihr Blick auf das Spülbecken; der Wasserstand hat sich verändert. Sie weiß, daß er ohne Klötzchen 6 Zentimeter tief ist und pro Klötzchen um 1 Zentimeter steigen würde. Also fügt sie der Gleichung ein weiteres Glied hinzu und hat nun

$$\text{No. of blocks seen} + \frac{\text{Weight of box} - 16 \text{oz.}}{3 \text{oz.}} + \frac{\text{Ht. of Water} - 6 \text{in.}}{\frac{1}{4} \text{in.}}$$

$$\left(\text{Zahl der sichtbaren Klötzchen} + \frac{\text{Gew. d. Schachtel} - 16 \text{ Unzen}}{3 \text{ Unzen}} + \frac{\text{Wasserstand} - 6 \text{ cm}}{\frac{1}{4} \text{ cm}} \right)$$

was wieder 28 ergibt. In dem Maße, in dem der Junge immer neue Einfälle präsentiert, denen die Mutter ebenso einfallsreich zu begegnen weiß, wächst die Gleichung um immer neue Glieder, die alle Klötzchen darstellen, vom mathematischen Standpunkt aus jedoch abstrakte Kalkulationen sind, da man die Klötzchen nicht sieht.

Schauen wir uns nun an, was unsere Analogie mit der Erhaltung der Energie gemein hat und worin sie sich unterscheidet. Vor allem müssen wir annehmen, daß wir in all den Situationen nie irgendwelche Klötzchen gesehen haben. Damit entfällt das Glied »Zahl der sichtbaren Klötzchen«. Die

Mutter hätte demnach stets mit Gliedern wie »Klötzchen in der Schachtel«, »Klötzchen im Wasser« und so weiter gerechnet. Bei der Energie gibt es, soweit wir wissen, keine Klötzchen. Außerdem kommen bei der Energie, im Gegensatz zu den Klötzchen, nicht notwendig ganze Zahlen heraus. So hätte die arme Mutter für ein Glied etwa $6\frac{1}{8}$ Klötzchen erhalten können, bei einem anderen ein $\frac{7}{8}$ Klötzchen und beim dritten 21, was zusammen immer noch 28 macht. So etwas wäre bei der Energie ohne weiteres möglich.

Dank unserer Analogie haben wir also entdeckt, daß wir für die Energie ein Schema mit einer ganzen Reihe verschiedener Regeln besitzen. Mit Hilfe der einzelnen Regeln können wir für jede der mannigfachen Energiearten eine Zahl errechnen. Zählen wir alle diese Zahlen all der verschiedenen Formen von Energie zusammen, erhalten wir stets die gleiche Gesamtsumme. Soweit wir wissen, gibt es bei der Energie keine Einheiten, keine kleinen Trägerkörper. Sie ist abstrakt, rein mathematisch, eine Zahl, die sich nie ändert, wann immer man sie auch berechnet. Besser kann ich sie nicht interpretieren.

Diese Energie kann analog den Klötzchen in der Schachtel, den Klötzchen im Wasser und so weiter in allen möglichen Formen auftreten. Es gibt eine Bewegungsenergie, die sogenannte kinetische Energie, eine auf die Wechselwirkung der Schwerkraft zurückgehende Energie (die potentielle Energie oder Lageenergie, wie sie bezeichnet wird), eine Wärmeenergie, eine elektrische Energie, eine Lichtenergie, eine Schwingungsenergie in Federn und so fort, eine chemische Energie, eine Kernenergie – und schließlich eine Energie, die ein Teilchen allein aufgrund seiner Existenz besitzt, eine Energie, die direkt von seiner Masse abhängt und die, wie Sie zweifellos wissen, von Einstein entdeckt wurde. $E = mc^2$ ist die berühmte Gleichung für das Gesetz, von dem hier die Rede ist.

Zwar habe ich von vielen Energiearten gesprochen, dennoch haben wir mittlerweile verschiedene Beziehungen zwischen manchen herausgefunden. Wir wissen zum Beispiel,

daß die sogenannte Wärmeenergie zu einem großen Teil gleich der kinetischen Energie der Bewegung der Teilchen in einem Körper ist. Oder daß Schwingungsenergie und chemische Energie dieselbe Wurzel haben, nämlich die zwischen den Atomen wirkenden Kräfte. Wenn sich die Atome zu einer neuen Struktur anordnen, ändert sich ein Teil der Energie, was bedeutet, daß sich auch eine andere Größe ändern muß. Verbrennen Sie beispielsweise etwas, verändert sich die chemische Energie, und es entsteht Wärme, wo vorher keine vorhanden war, damit unter dem Strich wieder alles stimmt. Schwingungsenergie und chemische Energie beruhen beide auf Wechselwirkungen zwischen Atomen. Diese Wechselwirkungen sind nach heutigem Verständnis eine Kombination aus zwei Dingen, einer elektrischen Energie und wiederum der kinetischen Energie, nur daß sie diesmal mit Hilfe der quantenmechanischen Formel berechnet wird. Lichtenergie ist nichts als elektrische Energie, da Licht heute als elektromagnetische Welle aufgefaßt wird. Kernenergie dagegen wird nicht in Begriffen anderer Energiearten dargestellt. Gegenwärtig kann ich über sie nur sagen, daß sie das Ergebnis der Kernkräfte ist. Ich rede hier, wohlgemerkt, nicht bloß von der freigesetzten Energie. Im Urkern ist ein bestimmter Energiebetrag vorhanden, der sich beim Zerfall verändert und von dem nur ein Rest zurückbleibt. Die Gesamtenergie in der Welt ändert sich jedoch nicht, denn beim Zerfallsvorgang entstehen zum Ausgleich enorme Hitze und eine Menge anderes Zeug.

Dieser Erhaltungssatz läßt sich technisch vielseitig aus Schlachten. Im folgenden will ich Ihnen anhand ganz einfacher Beispiele zeigen, wie uns die Kenntnis des Energieerhaltungssatzes und der Formel für die Berechnung der Energie beim Verständnis anderer Gesetze helfen kann. Mit anderen Worten, viele andere Gesetze sind mitnichten unabhängig, sondern schlicht eine verkappte Art und Weise, über die Erhaltung der Energie zu sprechen. So auch, um das einfachste zu nehmen, das Hebelgesetz (Abb. 16).

Wir wollen einen Hebel so auf einen Angelpunkt legen, daß

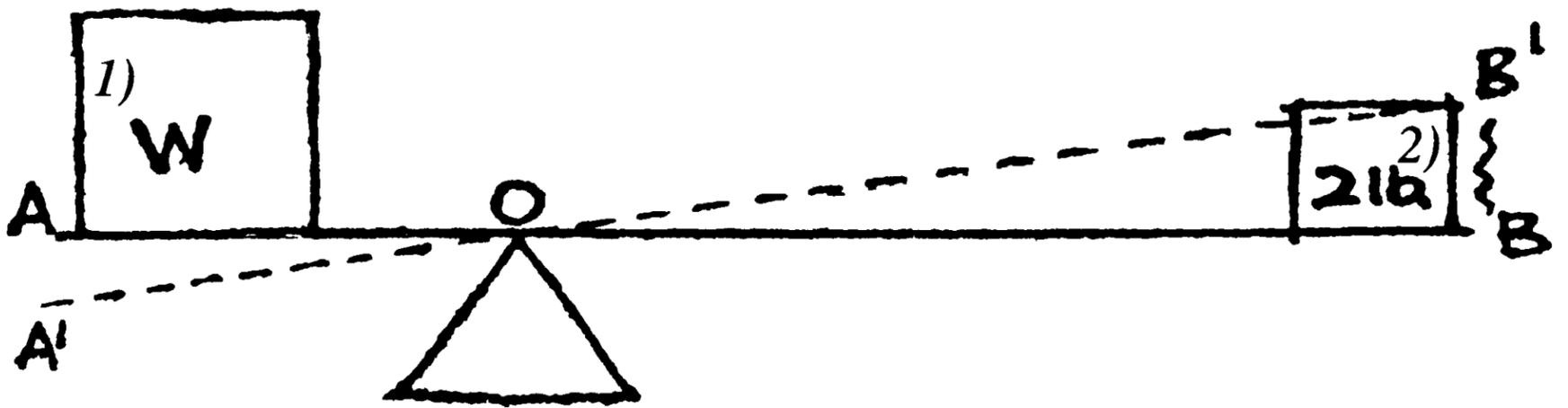


Abbildung 16 1) $W = \text{Gewicht}$ 2) Zweipfundgewicht

der eine Arm 1 Fuß und der andere 4 Fuß mißt. Zuvor muß ich Ihnen noch das Gesetz für die potentielle Energie angeben. Das heißt, wir multiplizieren das Gewicht unserer verschiedenen Gewichte mit ihrer Höhe über dem Grund und zählen alles zusammen. Damit haben wir die gesamte potentielle Energie. Nehmen wir nun an, ich hätte auf dem langen Arm ein Zweipfundgewicht und auf der anderen Seite ein unbekanntes mystisches Gewicht – X ist die typische Unbekannte –, wir wollen es W nennen, um darzutun, daß wir doch schon etwas fortgeschritten sind! Nun erhebt sich die Frage, wie groß muß W sein, damit sich der Hebel im Gleichgewicht befindet und ruhig auf- und abschwingt. Schwingt er gleichmäßig auf und ab, so bedeutet das, daß die Energie dieselbe ist, ob sich der Hebel nun in paralleler Stellung zum Boden befindet oder einen Winkel dazu bildet, wenn sich das Zweipfundgewicht, sagen wir, 1 *inch* über der waagerechten Hebelstellung befindet. Ist nämlich die Energie auf beiden Seiten gleich, bevorzugt sie keine bestimmte Einstellung, der Hebel wird nicht überkippen. Wie weit aber muß W nach unten gehen, wenn das Zweipfundgewicht um 1 *inch* in die Höhe geht? Aus dem Diagramm (Abb. 16) ersehen Sie, daß, wenn AO 1 Fuß und OB 4 Fuß ist, AA' $\frac{1}{4}$ *inch* sein muß, wenn BB' 1 *inch* ist. Wenden wir nun noch das Gesetz für die potentielle Energie an. Das heißt, wir müssen, um die Lageenergie nach der Bewegung zu ermitteln, das Zweipfundgewicht mit der Höhe 1 *inch* multiplizieren und dazu das unbekannte Gewicht W mal der Höhe – $\frac{1}{4}$ *inch* addieren. Das ergibt, genau wie vor der Bewe-

gung, als die Höhen der beiden Gewichte und damit die Gesamtenergie null war, ebenfalls – null. Also

$$z - \frac{W}{4} = 0, \text{ so } W \text{ must be } 8$$

$$(z - \frac{G}{4} = 0, \text{ also muß } G \text{ gleich } 8 \text{ sein})$$

Das ist eine der Möglichkeiten, das Ihnen natürlich längst bekannte einfache Hebelgesetz zu verstehen. Interessant aber ist, daß sich darüber hinaus Hunderte von physikalischen Gesetzen mit den verschiedenen Energiearten in Verbindung bringen lassen. Dieses Beispiel habe ich lediglich seiner Nützlichkeit wegen ausgewählt.

Der einzige Haken daran ist, daß es in der Praxis wegen der Reibung im Angelpunkt nicht wirklich funktioniert. Die Reibung ist es, die einen in konstanter Höhe dahinrollenden Gegenstand, sagen wir eine Kugel, zum Stillstand bringt. Was aber ist dann mit der Bewegungsenergie der Kugel passiert? Sie ist auf die Atome in Boden und Kugel übergegangen, die nun einen regelrechten Tanz aufführen. Die Welt im großen besehen sieht glatt und rund aus; im kleinen aber zeigt sich, daß sie in Wirklichkeit recht kompliziert ist und aus Milliarden winziger Atome in den sonderbarsten unregelmäßigen Formen besteht. Mit entsprechenden Hilfsmitteln betrachtet, nimmt sich unsere Kugel wie ein grober Brocken aus. Ebenso erweist sich der Boden als eine holprige Angelegenheit aus lauter kleinen Kugelgebilden. Rollt man nun diesen Monsterbrocken über den vergrößerten Boden, sieht man, wie die Atome angestoßen werden und herumzittern beginnen. Auch nachdem das Ungetüm darüber weggerollt ist, zittern die dergestalt Gestoßenen und Geschubsten noch etwas weiter; im Boden ist also eine tanzende Bewegung oder Wärmeenergie zurückgeblieben. Hat es auf den ersten Blick ausgesehen, als wäre der Erhaltungssatz falsch, so zeigt sich bei näherem Hinsehen, daß sich die Energie wieder einmal, wie so oft, vor uns versteckt hat und wir Thermometer und andere

Hilfsmittel brauchen, um sie aufzuspüren. Letztlich hat sich immer herausgestellt, daß die Energie erhalten bleibt, wie komplex der Prozeß auch sein mag und selbst wenn wir die Gesetze im einzelnen nicht kennen.

Der erste, der den Nachweis für das Gesetz von der Erhaltung der Energie erbrachte, war kein Physiker, sondern ein Mediziner. Er benutzte dazu Ratten. Verbrennt man Nahrungsmittel, entsteht eine bestimmte Wärme, die sich messen läßt. Verfüttert man dann dieselbe Menge an Nahrungsmitteln an Ratten, wird sie, genau wie beim Verbrennungsvorgang, durch Sauerstoff in Kohlendioxid umgesetzt. Messen wir die Energie, erweist sich, daß die Lebewesen exakt dasselbe machen wie die Nichtlebewesen. Das Gesetz der Erhaltung der Energie gilt für das Leben genauso wie für andere Erscheinungsformen. Interessant ist, nebenbei bemerkt, daß sich bis jetzt noch jedes für die »toten« Dinge aufgestellte Gesetz oder Prinzip, soweit wir es am großen Phänomen des Lebens testen konnten, auch hier als gültig erwiesen hat. Bis jetzt haben wir keinerlei Anhaltspunkt, daß sich die Vorgänge in den Lebewesen – was die physikalischen Gesetze betrifft – notwendig von den Prozessen in den Nichtlebewesen unterscheiden, obgleich die Lebewesen viel komplizierter sein können.

Die in der Nahrung enthaltene Energiemenge, die Ihnen sagt, wieviel Wärme, mechanische Arbeit und so weiter diese Nahrung erzeugen kann, werden in Kalorien* gemessen. Kalorien sind nichts Eßbares, sondern einfach die Einheit der in der Nahrung enthaltenen Wärmemenge. Hier nun kann ich Ihnen einen Tip geben, wie sie den Physikern, die sich manchmal so überlegen und schlau vorkommen, eins auswischen können. Schämen sollten sie sich, mit wie vielerlei Maßen sie messen und hantieren. Es ist absurd, daß man die Energie in Kalorien, Erg, Elektronvolt, in Meterkilopond*, in B.T.U. (British thermal units, britischen Wärmeeinheiten), in Pferdestärkenstunden* oder Kilowattstunden angeben kann – alles

* Diese Maße sind mittlerweile nicht mehr zulässig. (A.d.Ü.)

Maße für ein und dieselbe Sache. Es ist, als hätte man gleichzeitig Dollar, Pfund, DM und so weiter in der Tasche – nur mit dem Unterschied, daß sich in der Wirtschaft der Wechselkurs ändern kann, während das Verhältnis zwischen den einzelnen Maßeinheiten absolut garantiert ist. Gleich bleibt sich in der Wirtschaft nur das Verhältnis von Schilling zu Pfund – auf ein Pfund gehen stets 20 Schilling, was für einen Physiker freilich viel zu einfach wäre, weshalb er statt Zahlen wie 20 irrationale Verhältnisse wie 1,6183178 Schilling auf ein Pfund bevorzugt. Vielleicht denken Sie, daß sich wenigstens die moderneren Spitzenklassenleute der theoretischen Physik einer gemeinsamen Einheit bedienen – weit gefehlt. Hier stoßen Sie auf Energiemaße wie Grad Kelvin, Megazyklen und neuerdings, der letzte Schrei, auf inverse Fermis. Eine solche Idiotie aber, sich das Leben mit all den verschiedenen Energiemaßen zu erschweren, dürfte Beweis genug sein, daß auch Physiker nur Menschen sind.

Ein paar interessante Naturerscheinungen stellen uns immer wieder vor ungewöhnliche Probleme hinsichtlich der Energie. Vor einiger Zeit hat man sogenannte Quasare entdeckt, die ungeheuer weit weg sind und soviel Energie in Form von Licht und Radiowellen ausstrahlen, daß man sich fragt, woher sie die nehmen. Falls der Satz von der Erhaltung der Energie zutrifft, muß sich der Quasar nach der Abgabe von soviel Energie in einem anderen Zustand befinden als vorher. Die Frage ist nun, handelt es sich um potentielle Energie – ist das Ding durch die Schwerkraft eingestürzt und in einen anderen Schwerkraftzustand übergegangen – oder um Kernenergie? Niemand weiß es. Sie neigen vielleicht dazu, hier eine Ausnahme vom Erhaltungssatz zu machen. In der Regel aber stellt sich bei so wenig und unvollständig erforschten Objekten wie Quasaren – bei der Entfernung haben die Astronomen Mühe und Not, sie ins Blickfeld zu bekommen – heraus, daß nicht unsere Grundgesetze falsch sind, sondern daß wir schlicht und einfach zu wenig über sie wissen.

Schauen wir uns noch einen anderen interessanten Fall für die Anwendung des Energieerhaltungssatzes an: den Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Ursprünglich glaubte man, ein Neutron zerfalle in ein Proton plus ein Elektron. Man war aber bereits imstande, die Energie sämtlicher Teilchen zu messen und mußte feststellen, daß das Neutron mehr Energie besaß als Proton und Elektron zusammen. Das konnte entweder bedeuten, daß der Energieerhaltungssatz nicht zutraf (und in der Tat erwog Bohr* eine Zeitlang, er könne nur statistisch, d. h. im Durchschnitt, gelten) oder daß beim Zerfall noch etwas anderes herauskommen mußte. Letzteres war, wie sich herausstellen sollte, der Fall: Ein Antineutrino lieferte die fehlende Energie. Nun könnten Sie einwenden, Daseinsgrund und Existenzberechtigung dieses Antineutrinos lägen einzig in der Erhaltung des Energieerhaltungssatzes. Nur übersehen Sie dabei, daß dieses Antineutrino eine Reihe anderer Dinge wie den Satz von der Erhaltung des Drehimpulses und weitere Erhaltungsgesetze als richtig bestätigt und daß vor kurzem seine Existenz de facto direkt nachgewiesen werden konnte.

Dieses Beispiel bringt uns zu der Frage, wieso wir unsere Gesetze auf Bereiche ausdehnen, wo wir uns ihrer Gültigkeit gar nicht sicher sein können? Wo nehmen wir die Zuversicht her zu glauben, der Energieerhaltungssatz müsse, weil wir ihn in einem Fall überprüft haben, auf ein neues Phänomen ebenfalls zutreffen? In der Zeitung kann man immer wieder einmal lesen, die Physiker hätten entdeckt, daß eins ihrer Lieblingsgesetze falsch sei. Sollten sie sich also lieber nicht zu der Behauptung versteigen, ein Gesetz gelte auch in einem bisher nicht erforschten Bereich? Doch dann wüßten sie gar nichts über diesen. Wollten Sie nur solche Gesetze gelten lassen, die Sie soeben aus Ihren Beobachtungen abgeleitet haben, könnten Sie nie irgendwelche Vorhersagen machen. Die Nützlichkeit der Naturwissenschaft liegt ja gerade darin, daß sie über

* Niels Bohr, 1885–1962, dänischer Physiker

Vermutungen weiter fortschreitet. Immer wieder wagen wir uns aufs Glatteis hinaus, und im Fall der Energie ist es mehr als wahrscheinlich, daß sie auch andernorts erhalten bleibt.

Natürlich bedeutet das, daß die Naturwissenschaft nicht hundertprozentig sicher ist. Sobald Sie eine Behauptung über einen Erfahrungsbereich aufstellen, den Sie nicht direkt gesehen haben, müssen Sie unsicher sein. Trotzdem müssen wir Aussagen über unbekannte Gebiete machen, oder die ganze Physik kann einpacken. Beispielsweise verändert sich aufgrund des Energieerhaltungssatzes die Masse eines Körpers, sobald er sich bewegt. Dank der Beziehung zwischen Masse und Energie taucht die mit der Bewegung gekoppelte Energie als zusätzliche Masse auf, also werden Körper, wenn sie sich bewegen, schwerer. Newton hatte die Masse noch für einen konstanten Faktor gehalten. Als sich herausstellte, daß das ein Irrtum war, jammerte alle Welt, wie das den Physikern hatte passieren können. Wie hatten sie sich nur so täuschen können? Aber die Wirkung ist sehr klein und kommt überhaupt nur zum Tragen, wenn man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Wenn Sie einen Kreisel in Bewegung setzen, wiegt er, von einem winzigen Bruchteil abgesehen, nicht mehr als im Ruhezustand. Hätten die Physiker also sagen sollen: »Wenn sie sich nicht schneller bewegen als so und so, ändert sich die Masse nicht.« Das wäre dann mit Sicherheit richtig gewesen. Mitnichten, denn wäre das Experiment nur mit Holz-, Kupfer- und Stahlkreiseln durchgeführt worden, hätten Sie sagen müssen: »Kupfer-, Holz- und Stahlkreisel, die sich nicht schneller bewegen als so und so . . .« Sie sehen, wir kennen nicht all die Voraussetzungen, die wir für ein Experiment brauchen. Wir wissen nicht, ob die Masse eines radioaktiven Kreisels bewahrt bleibt, wenn er in Bewegung versetzt wird. Also müssen wir wohl oder übel Vermutungen anstellen, damit die Naturwissenschaft nicht ganz nutzlos ist. Wenn wir uns nicht damit begnügen wollen, die durchgeführten Experimente zu beschreiben, bleibt uns gar nichts anderes übrig, als den Gültigkeitsbereich der Gesetze über den Rahmen ihrer

beobachteten Anwendbarkeit hinaus auszudehnen. Daran ist selbst dann nichts auszusetzen, wenn dadurch ein Unsicherheitsfaktor in die Naturwissenschaft hereinkommt. Sollten Sie die Naturwissenschaft bis jetzt für zuverlässig gehalten haben, werden Sie Ihre Meinung wohl oder übel korrigieren müssen.

Kehren wir zu unserer Tabelle der Erhaltungssätze (Abb. 14) zurück und tragen wir die Energie ein. Sie wird, soweit wir wissen, vollständig erhalten, tritt jedoch nicht in Einheiten auf. Die Frage nach dem Feld können wir mit ja beantworten. Seit Einstein gilt – da Energie und Masse als äquivalent erkannt wurden – die Energie in Abwandlung von Newtons Auslegung als Quelle der Gravitation.

Daneben gibt es Erhaltungssätze, die sich in Zahlen erfassen lassen, zum Beispiel den Impulserhaltungssatz. Nimmt man alle Massen eines Objekts, multipliziert sie mit den Geschwindigkeiten und addiert das alles, ergibt die Summe den Impuls der Teilchen, und der Gesamtimpuls bleibt erhalten. Da Energie und Impuls nach heutiger Auffassung sehr eng miteinander verknüpft sind, habe ich die beiden in unserer Tabelle in dieselbe Rubrik eingetragen.

Ein weiteres Beispiel für eine erhaltene Größe liefert der bereits besprochene Drehimpuls. Unter diesem versteht man die pro Sekunde von bewegten Körpern überstrichene Fläche. Nehmen wir einmal einen x-beliebigen Bezugspunkt für die Bewegung eines Körpers an, dann nimmt die Geschwindigkeit, mit der eine bestimmte Fläche (Abb. 17) von der Verbindungslinie überstrichen wird, zu; multipliziert man den Abstand mit der Geschwindigkeit und mit der Masse des Körpers

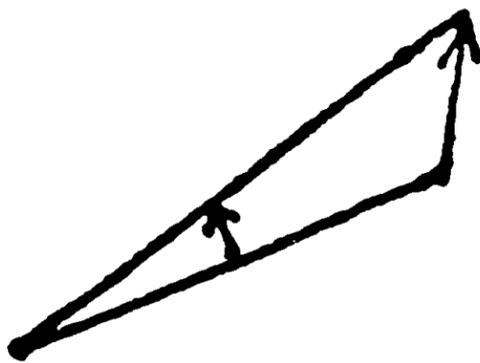


Abbildung 17

und addiert das Ergebnis für alle Körper, so erhält man den Drehimpuls. Und diese Größe ändert sich nicht.

Damit haben wir die Erhaltung des Drehimpulses. Auf den ersten Blick freilich könnte jemand, der ein bißchen zuviel von Physik versteht, glauben, der Drehimpuls bleibe nicht erhalten, da er, wie die Energie, in verschiedenen Formen auftreten kann. Das wiederum halten zwar die meisten Leute nicht für möglich, aber ich werde es Ihnen an einem Beispiel nachweisen. Nehmen Sie eine Drahtschleife und stecken Sie einen Stabmagneten hinein, so wird das Magnetfeld durch den magnetischen Fluß im Draht verstärkt, und es entsteht ein elektrischer Strom. Genauso arbeiten Elektrogenatoren. Stellen Sie sich nun vor, daß ich statt einer Drahtschleife eine Scheibe habe, auf der sich analog zu den Elektronen im Draht elektrische Ladungen befinden (Abb. 18). Jetzt bringe ich einen Magneten aus weiter Entfernung sehr schnell entlang der Achse in den Mittelpunkt der Scheibe, so daß es zu einer Flußänderung kommt. Dann werden die Ladungen, genau wie im Draht, zu kreisen beginnen, und die Scheibe, gesetzt den Fall, wir hätten sie auf ein Rad montiert, begänne sich in dem Augenblick zu drehen, in dem ich den Magneten hinaufgebracht habe. Zugegeben, das sieht nicht eben nach Erhal-

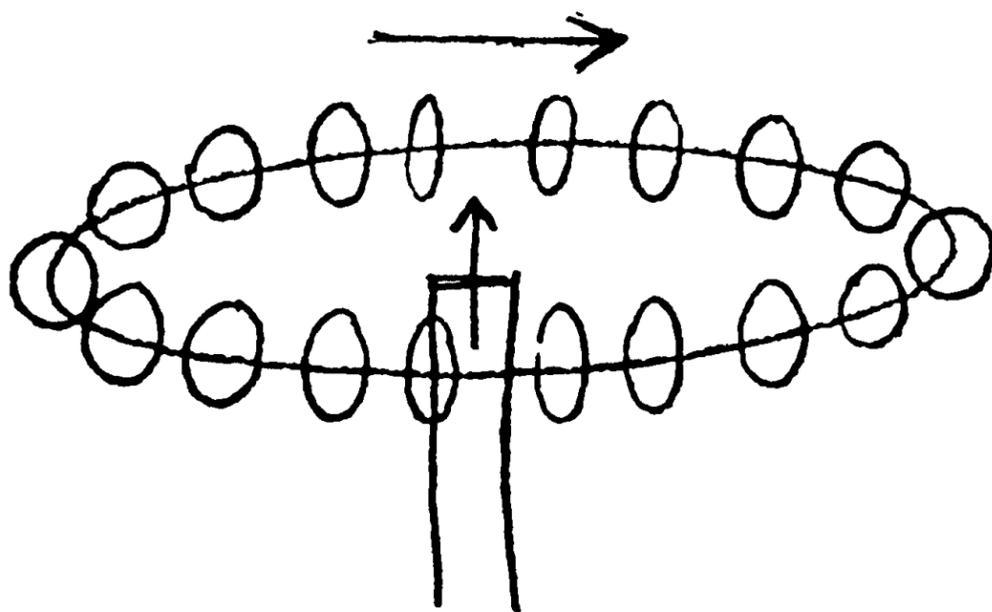


Abbildung 18

tung des Drehimpulses aus. Ohne Magnet dreht sich die Scheibe nicht, mit Magnet setzt sie sich plötzlich in Bewegung. Allem Anschein nach haben wir die Drehung also für

nichts und wieder nichts erhalten, was wider alle Regeln verstieße. »Nun gut«, sagen Sie, »dann muß eben irgendeine andere Art von Wechselwirkung vorhanden sein, die den Magneten in die entgegengesetzte Richtung dreht.« Das aber ist nicht der Fall. Auf den Magneten wirkt keine elektrische Kraft, die ihn in die andere Richtung zu drehen versuchte. Die Erklärung liegt vielmehr darin, daß der Drehimpuls in zwei verschiedenen Formen auftritt: als Drehimpuls der Bewegung und als Drehimpuls in elektrischen und magnetischen Feldern. Im Feld um den Magneten steckt ein Drehimpuls, auch wenn er nicht als Bewegung in Erscheinung tritt, und dieser hat das entgegengesetzte Vorzeichen zur Drehung. Noch deutlicher zeigt es sich im umgekehrten Fall (Abb. 19).

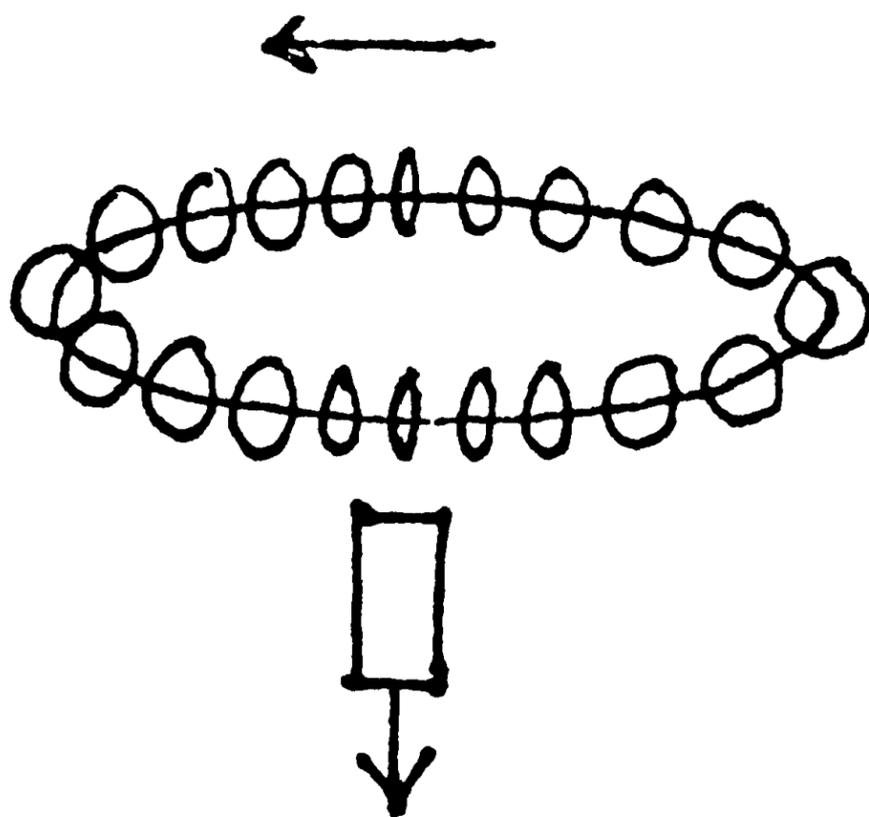


Abbildung 19

Wenn wir nur die Teilchen und den Stabmagneten nahe beieinander haben und alles stillsteht, befindet sich, so meine Behauptung, im Feld ein verborgener Drehimpuls, der nicht als Rotation sichtbar wird. Ziehen wir nun den Magneten heraus, das heißt, nehmen wir unser Instrument auseinander, dann werden alle Felder auseinandergerissen, und nun muß der Drehimpuls in Erscheinung treten, und die Scheibe setzt sich in Bewegung. Dabei folgt sie dem Induktionsgesetz.

Ausgesprochen schwer dagegen fällt mir die Beantwortung

der Frage, ob der Drehimpuls in kleinsten Einheiten auftritt. Auf Anhieb erscheint es völlig unmöglich, da der Drehimpuls von der Richtung abhängt, in der das Bild projiziert wird. Offensichtlich muß sich eine Flächenänderung je nach dem Blickwinkel, unter dem man sie betrachtet, anders ausnehmen. Träte nun der Drehimpuls in kleinsten Einheiten auf, und Sie zählten unter einem Winkel 8 Einheiten und unter einem um eine Winzigkeit verschobenen Winkel eine Winzigkeit weniger als 8, so gilt doch, daß 7 nicht um eine Winzigkeit weniger ist als 8, sondern um einen ganz bestimmten Betrag. Also kann der Drehimpuls nicht in kleinsten Einheiten auftreten. Allerdings wird dieser Beweis hinfällig in Anbetracht der Feinheiten und Eigenheiten der Quantenmechanik. Erstaunlicherweise stellt sich nämlich heraus, daß, wenn wir den Drehimpuls um eine beliebige Drehachse messen, stets ein Vielfaches einer kleinsten Einheit herauskommt. Nicht die Art Einheit freilich wie bei der elektrischen Ladung, die man zählen kann, sondern in dem Sinne mathematische Einheiten, als die bei Messungen erhaltenen Zahlen unfehlbar ein ganzzahliges Vielfaches einer kleinsten Einheit darstellen. Allerdings können wir diese nicht in der gleichen Weise interpretieren wie die Einheiten der elektrischen Ladung, als vorstellbare, zählbare Einheiten – eine und noch eine und dann noch eine. Soll heißen, im Falle des Drehimpulses können wir sie uns nicht als getrennte Einheiten vorstellen. Herauskommt jedoch stets – und das ist äußerst merkwürdig – ein ganzzahliges Vielfaches.

Es gibt noch andere Erhaltungssätze, die nicht ganz so interessant sind wie die beschriebenen und bei denen es auch nicht eigentlich um die Erhaltung von Zahlen geht. Nehmen wir an, wir hätten irgendeine bestimmte Anordnung von Teilchen, die sich mit einer bestimmten Symmetrie bewegten, und nehmen wir weiter an, diese Bewegungen wären bilateral symmetrisch (Abb. 20), dann könnten wir gemäß den Gesetzen der Physik – zu Recht – erwarten, daß sich uns bei all den Bewegungen und Kollisionen auch zu einem späteren Zeit-

punkt derselbe bilateral symmetrische Anblick böte. Wir haben es also wieder mit einer Art Erhaltung zu tun, mit der Erhaltung des symmetrischen Charakters. Wir müßten sie eigentlich in unsere Tabelle aufnehmen, aber hier haben wir es mit keiner Zahl zu tun, die sich messen ließe, und so wollen wir uns die Erörterung dieses Falles für die nächste Vorlesung vorbehalten. Für die klassische Physik ist er insofern nicht sehr interessant, als sie nur äußerst selten mit so geordneten symmetrischen Ausgangsbedingungen zu tun hat. Das ist auch der Grund, warum dieser Erhaltungssatz nicht zu den besonders wichtigen oder praktischen zählt. In der Quantenmechanik dagegen, die sich mit ganz einfachen Systemen wie Atomen befaßt, deren innerer Aufbau oft eine der bilateralen Symmetrie gleiche Art Symmetrie aufweist, ist die Erhaltung dieses symmetrischen Charakters für das Verständnis der Quantenphänomene durchaus wichtig.

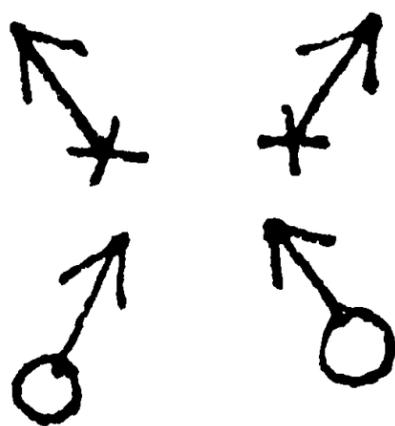


Abbildung 20

Eine beachtenswerte Frage ist, ob es eine gemeinsame Grundlage für diese Erhaltungssätze gibt oder ob wir sie zu nehmen haben, wie sie sind. Auch diese Frage soll in der nächsten Vorlesung besprochen werden. Hier möchte ich noch auf einen Punkt hinweisen. Eine Erläuterung dieser Ideen auf einer allgemeinverständlichen Ebene erweckt leicht den Eindruck, als handelte es sich um eine Reihe von Begriffen, die nichts miteinander zu tun haben. Bei einem gründlicheren Einblick in die verschiedenen Prinzipien dagegen werden tiefere Wechselbeziehungen zwischen den Begriffen sichtbar, die einander auf die eine oder andere Weise bedingen. Nehmen wir unser

Beispiel von der Beziehung zwischen der Relativität und der Notwendigkeit lokaler Erhaltung. Hätte ich es Ihnen mit dürren Worten dargelegt, es wäre Ihnen wundersam vorgekommen, daß der Umstand, daß Sie nicht angeben können, wie schnell Sie sich bewegen, einbezieht, daß die Erhaltung einer bestimmten Größe das Hüpfen vom einen Ort zum andern ausschließt.

An dieser Stelle möchte ich Ihnen zeigen, wie die Erhaltung des Drehimpulses, die Erhaltung des Impulses und einige andere Dinge bis zu einem gewissen Grad zusammenhängen. Wie Sie bereits wissen, geht es bei der Erhaltung des Drehimpulses um die von den bewegten Teilchen überstrichene Fläche. Wenn Sie nun eine Reihe von Teilchen haben (Abb. 21) und einen sehr weit entfernten Bezugspunkt (x) annehmen, ist der Abstand für alle Teilchen nahezu der gleiche. In diesem Fall zählt für eine überstrichene Fläche beziehungsweise die Erhaltung des Drehimpulses lediglich die Bewegungskomponente, die in Abbildung 21 vertikal ist. Dann erweist sich, daß

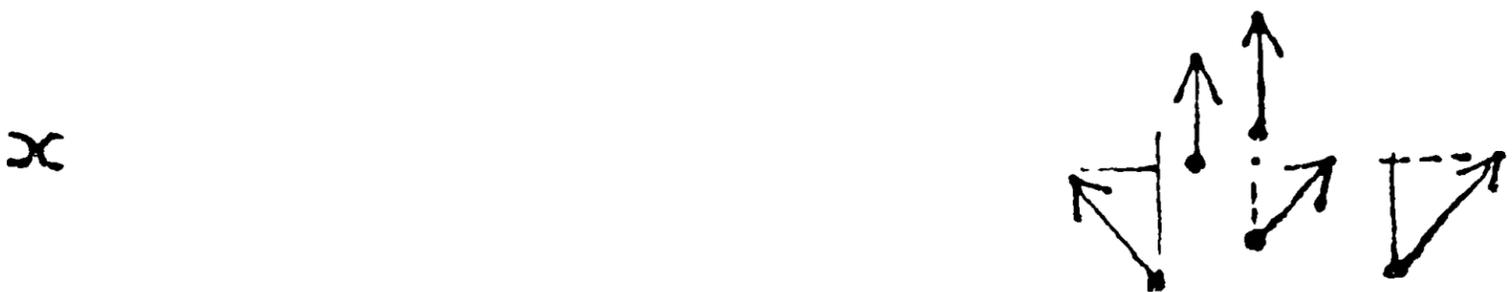


Abbildung 21

die Gesamtsumme der Massen, die jeweils mit der Vertikal-komponente der Geschwindigkeit multipliziert werden, eine Konstante sein muß, weil der Drehimpuls um jeden beliebigen Punkt eine Konstante ist und, wenn der Bezugspunkt weit genug entfernt gewählt wurde, lediglich die Massen und Geschwindigkeiten zählen. So impliziert die Erhaltung des Drehimpulses die Erhaltung des Impulses. Diese wiederum impliziert einen anderen Erhaltungssatz, der so eng damit verknüpft ist, daß ich mir nicht die Mühe gemacht habe, ihn in die Tabelle aufzunehmen. In diesem Fall geht es um den Schwerpunkt eines Körpers (Abb. 22).

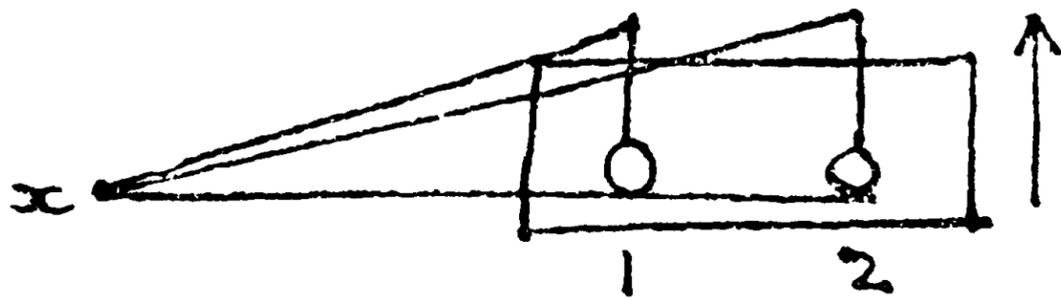


Abbildung 22

Eine Masse in einer Schachtel kann nicht einfach von ihrem Platz verschwinden und sich selbständig an einen anderen Platz bewegen. Das hat nichts mit der Erhaltung der Masse zu tun; die bleibt ja dieselbe am einen wie am anderen Ort. Sich selbstständig fortbewegen könnte eine Ladung, aber nicht eine Masse. Lassen Sie mich erklären, warum. Nehmen wir an, unsere Schachtel schwebt langsam nach oben. (Das dürfen wir, denn die Gesetze der Physik werden von der Bewegung nicht beeinflußt.) Nun bestimmen wir den Drehimpuls von einem nahegelegenen Bezugspunkt x . Liegt die Masse ruhig in Position 1 in der Schachtel, während diese nach oben schwebt, erzeugt sie mit einer bestimmten Geschwindigkeit eine bestimmte Fläche. Nach der Verschiebung der Masse an Position 2 wird die Fläche schneller wachsen, da sich zwar die Höhe der langsam nach oben schwebenden Schachtel gleichbleibt, die Entfernung von x zur Masse sich jedoch vergrößert hat. Aufgrund der Erhaltung des Drehimpulses aber kann sich die Änderungsrate der Fläche nicht ändern, und deshalb können Sie eine Masse nicht einfach von einem Ort an einen anderen schieben, es sei denn, Sie sorgen auf andere Weise für einen Ausgleich. Das ist auch der Grund, warum sich Raketen im leeren Raum nicht fortbewegen können . . . könnten, denn sie tun es ja. Mit einer ganzen Reihe von Massen, die man teils vorwärts, teils rückwärts bewegt, läßt sich erreichen, daß sich die Gesamtbewegung aller Massen rückwärts und vorwärts aufhebt, also gleich null ist. Das ist der Trick, mit dem man die Rakete zum Fliegen bringt. Zunächst steht sie, sagen wir, im leeren Raum, still, dann stößt sie rückwärts Gas aus und setzt sich vorwärts in Bewegung. Der springende Punkt dabei ist, daß sich das Zentrum der Masse, der Schwerpunkt,

nach wie vor an derselben Stelle befindet. Der uns interessierende Teil hat sich vorwärts, ein für uns uninteressanter Teil rückwärts bewegt. Und kein Theorem der Welt verlangt, daß die interessanten Sachen erhalten bleiben – gefordert wird lediglich die Erhaltung der Gesamtsumme.

Die Entdeckung der physikalischen Gesetze gleicht einem Zusammensetzspiel. Wir haben eine Menge unterschiedlicher Teile, zu denen heute Schlag auf Schlag immer neue kommen, und viele liegen herum, die sich nicht einpassen lassen wollen. Woher aber wissen wir überhaupt, daß sie dazugehören, daß sie wirklich alle Teil eines noch unvollendeten Bildes sind? Nun, wir sind uns dessen nicht sicher, und das plagt uns auch bis zu einem gewissen Grad; die gemeinsamen Merkmale der verschiedenen Teile indessen ermutigen uns. Alle zeigen blauen Himmel und alle sind aus demselben Holz. Die verschiedenen physikalischen Gesetze gehorchen allesamt den gleichen Erhaltungssätzen.

4. Die Symmetrie im physikalischen Gesetz

Symmetrie scheint für den menschlichen Geist etwas absolut Faszinierendes zu sein. Es bereitet uns Vergnügen, symmetrische Dinge in der Natur zu betrachten, etwa vollkommen symmetrische Kugeln wie Planeten und die Sonne oder symmetrische Kristalle wie Schneeflocken oder die beinahe symmetrischen Blumen. Doch nicht von der Symmetrie der in der Natur vorkommenden Dinge soll hier die Rede sein, sondern von der den physikalischen Gesetzen eigenen Symmetrie. Wie die Symmetrie eines Körpers beschaffen ist, ist leicht zu verstehen. Wie aber mag die Symmetrie eines physikalischen Gesetzes aussehen? Natürlich kann ein physikalisches Gesetz keine Symmetrie besitzen, aber wir Physiker ergötzen uns nun einmal daran, ganz gewöhnlichen Wörtern eine andere Bedeutung unterzulegen. In diesem Fall verstehen wir darunter, daß physikalische Gesetze ein Gefühl in uns wecken, das dem bei der Betrachtung symmetrischer Dinge sehr nahe kommt, und darüber wollen wir in dieser Vorlesung reden.

Was heißt Symmetrie? Schauen Sie mich an, ich bin symmetrisch, rechts und links – zumindest außen. Auf die gleiche oder auf eine andere Weise kann ein Gefäß symmetrisch sein. Wie aber soll man Symmetrie definieren? Der Umstand, daß ich links und rechts symmetrisch bin, bedeutet, daß ich, wenn Sie alles von einer Seite auf die andere tun und umgekehrt – wenn Sie also die beiden Seiten austauschen –, trotzdem genauso aussehe wie vorher. Eine ganz spezielle Art von Symmetrie besitzt ein Quadrat, weil es, auch wenn Sie es um 90 Grad drehen, sein Aussehen in keiner Weise verändert hat.

Laut der ausgezeichneten Definition Professor Weyls*, eines Mathematikers, ist ein Ding symmetrisch, wenn es eine Möglichkeit gibt, es zu verändern, und es hinterher doch wieder so aussieht wie vorher. In diesem Sinne nennen wir die Gesetze der Physik symmetrisch. Das heißt, wir können sie oder die Art und Weise, sie auszudrücken, verändern, ohne ihre Wirkung zu verändern. Und dieser Aspekt der physikalischen Gesetze soll uns im folgenden beschäftigen.

Das einfachste Beispiel dieser Art von Symmetrie, die, wie Sie gleich sehen werden, mit der Links-Rechts-Symmetrie und ähnlichem (wohl entgegen Ihren Vermutungen) nicht viel gemein hat, ist die sogenannte Raumtranslation. Das bedeutet folgendes: Sie haben sich für ein bestimmtes Experiment mit bestimmten Dingen eine bestimmte Versuchsanordnung ausgedacht und bauen diese an einer anderen Stelle für denselben Zweck noch einmal genauso auf, das heißt, Sie haben Ihr Experiment von einem Ort im Raum an einen anderen verlagert, so erhalten Sie beim verlagerten Versuch dasselbe Ergebnis wie beim ursprünglichen Experiment. In vorliegendem Fall stimmt es allerdings nicht. Würde ich die Versuchsanordnung von der Stelle, an der ich jetzt stehe, um 6 Meter nach links verschieben, käme ich in schöne Schwulitäten, da ich mitten in die Wand geriete. Sie sehen also, bei der Postulierung dieser Annahme muß alles berücksichtigt werden, was sich irgendwie auf die Situation auswirken könnte, und all das muß mit verschoben werden. Nehmen wir zum Beispiel an, wir brauchen ein Pendel in unserem System und wollten das Ganze um 30000 Kilometer nach rechts verschieben, so würde die Sache nicht mehr recht funktionieren, weil ein Pendel die Anziehungskraft der Erde voraussetzt. Nehmen wir jedoch an, wir verschoben die Erde mit, gäbe es keinerlei Probleme. Das Experiment funktionierte da wie dort. Der Haken am Ganzen ist, daß man alles, was die Situation in irgendeiner Weise beeinflussen könnte, mit verschieben muß. Das klingt

* Hermann Weyl, 1885–1955, deutscher Mathematiker

ein bißchen blauäugig, so, als brauchten Sie bloß, sollte ein Experiment nach der Translation nicht gelingen, ein paar Sachen mehr zu verschieben, weil Sie am Ende stets gewinnen müssen. Ganz so einfach ist es denn doch nicht: Es steht keineswegs von allem Anfang an fest, daß Sie gewinnen müssen. Worauf es uns hier ankommt – und das ist das Bemerkenswerte an der Natur – ist, daß es möglich ist, genügend Zeug zu verschieben, damit es sich in gleicher Weise verhält. Das ist eine positive Aussage.

Lassen Sie mich Ihnen die Richtigkeit meiner Behauptung anhand eines Beispiels demonstrieren. Nehmen wir das Gravitationsgesetz, demzufolge sich die Kraft zwischen zwei Körpern umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands voneinander verändert. Außerdem möchte ich Sie daran erinnern, daß ein Körper auf eine Kraft durch Veränderung seiner Geschwindigkeit mit der Zeit in Richtung der Kraft reagiert. Wenn ich ein Körperpaar wie eine Sonne und ihren Planeten habe und das Paar verschiebe, bleibt der Abstand zwischen den Körpern natürlich gleich und damit ändern sich auch die zwischen ihnen wirksamen Kräfte nicht. Desgleichen werden sich die beiden Körper in der versetzten Lage mit derselben Geschwindigkeit weiterbewegen; kurzum sämtliche Veränderungen bleiben im selben Verhältnis, so daß beide Systeme in genau derselben Weise funktionieren. Ermöglicht wird diese Translation im Raum durch den Umstand, daß das Gesetz vom »Abstand zwischen zwei Körpern« ausgeht und nicht von irgendeiner absoluten Entfernung vom zentralen Auge des Weltalls.

Damit haben wir die erste Symmetrie – die Raumtranslation. Die zweite könnte man als Zeittranslation bezeichnen; indessen wollen wir lieber sagen, daß eine zeitliche Verschiebung keine Rolle spielt. Wir lassen einen Planeten in einer bestimmten Richtung um die Sonne kreisen. Könnten wir den Vorgang zwei Stunden oder zwei Jahre später, mithin zu einem anderen Zeitpunkt, aber sonst in der gleichen Weise wiederholen, würde der Planet die Sonne genau wie im ersten

Fall umkreisen, da das Gravitationsgesetz von Geschwindigkeit spricht und nicht explizit von der Zeit abhängt. In diesem besonderen Fall sind wir uns allerdings nicht ganz sicher. Erinnern Sie sich, als wir die Schwerkraft behandelten, sprachen wir über die Möglichkeit, daß sie sich mit der Zeit verändern könnte. Wenn dem so wäre, käme eine Zeittranslation allerdings nicht in Frage. Wäre nämlich die Gravitationskonstante in einer Milliarde Jahre schwächer als heute, würde sich auch unsere Versuchssonne mit Planeten in einer Milliarde Jahre anders bewegen als sie es heute tut. Soweit wir derzeit wissen (und ich habe nur die Gesetze besprochen, die wir heute kennen – ich wünschte, ich könnte schon über die uns morgen bekannten sprechen!), macht eine zeitliche Verschiebung keinen Unterschied.

In einer Hinsicht trifft das nicht wirklich zu, wie wir wissen. Wohl stimmt es für unsere heutigen physikalischen Gesetze. Andererseits sieht es nach heutiger Auffassung (die sich mit der Wirklichkeit freilich keineswegs decken muß) so aus, als wäre das Universum zu einem bestimmten Zeitpunkt entstanden und als triebe es seitdem unaufhaltsam auseinander. Nun könnten Sie das als geografische Situation bezeichnen, und analog zur Situation bei der Raumtranslation, bei der ich ja auch alles verschieben muß, zu dem Schluß kommen, daß dann eben die Expansion des Universums mit verschoben werden muß, weil für die Zeit dieselben Gesetze gelten wie für den Raum. Wir hätten genausogut eine andere Analyse machen und das Universum später beginnen lassen können; aber wir starten das All nicht und wir haben die Lage nicht unter Kontrolle und ebensowenig eine Möglichkeit, diese Vorstellung experimentell zu überprüfen. Deshalb sieht sich die Wissenschaft außerstande, der Wirklichkeit auf den Grund zu kommen. Tatsache ist, daß sich der Zustand der Welt mit der Zeit zu verändern scheint, daß die Galaxien auseinandertreiben, so daß Sie, sollten Sie in einer Science-fiction-Story irgendwann aufwachen und Jahr und Tag Ihres Wiedererwachens wissen wollen, bloß die mittleren Entfer-

nungen zu den Galaxien zu messen brauchten. Mit anderen Worten, die Welt wird, wenn sie in der Zeit verschoben wird, nicht so aussehen wie heute.

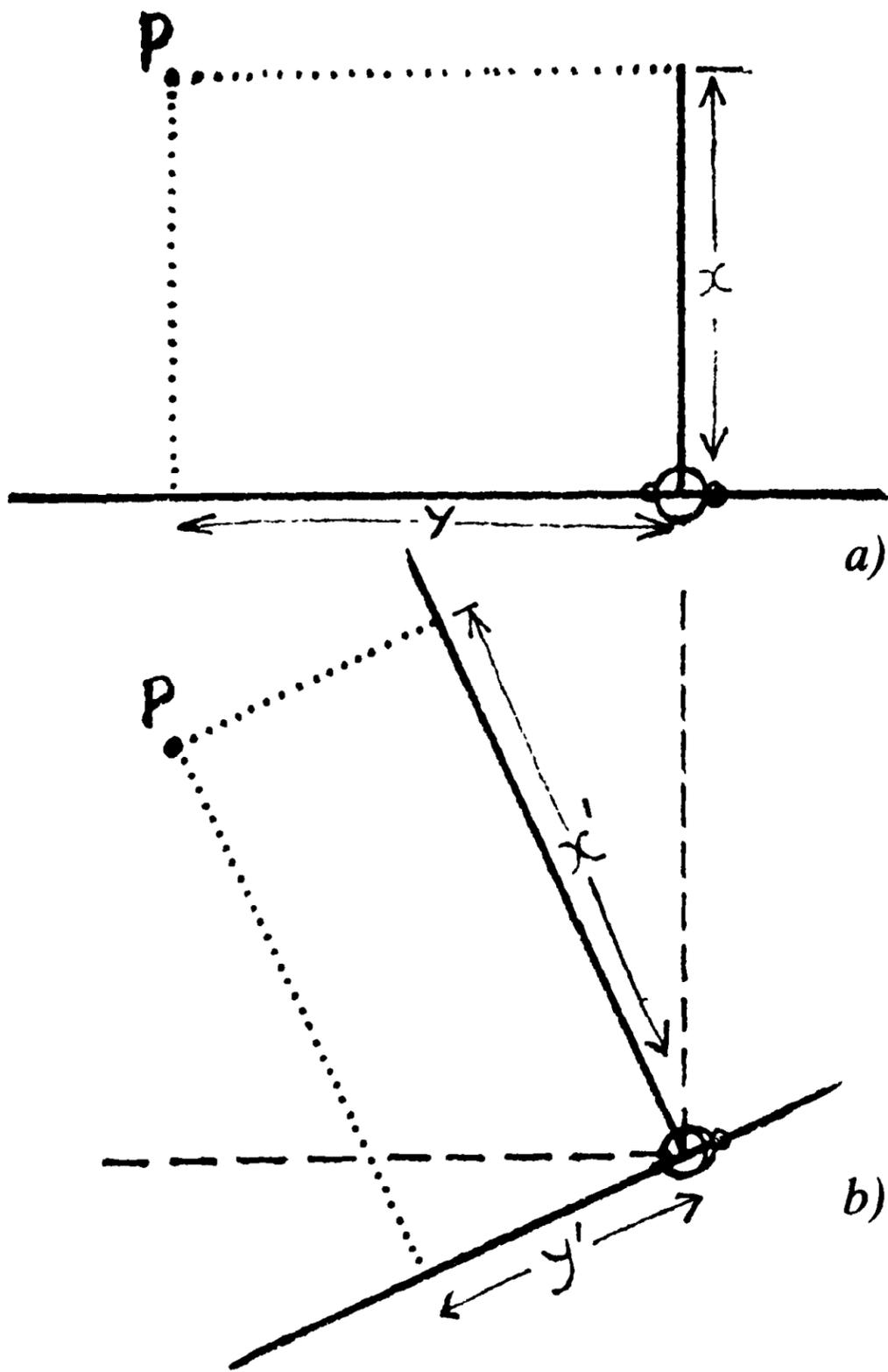
Nun haben wir es uns aber zur Regel gemacht, diejenigen physikalischen Gesetze, die vorhersagen, wie sich einmal in Bewegung gesetzte Körper unter gegebenen Umständen bewegen werden, von Aussagen über den tatsächlichen Beginn der Welt abzukoppeln, da wir kaum etwas darüber wissen. Allgemein wird ein kleiner Unterschied zwischen der astronomischen oder kosmologischen Geschichte und dem physikalischen Gesetz gemacht. Wenn ich diesen Unterschied jedoch definieren sollte, würde ich außerordentlich in Bedrängnis geraten. Am kennzeichnendsten für das physikalische Gesetz ist seine Universalität. Wenn aber etwas universal ist, so ist es die Expansion all der Galaxien. Wie aber soll man dann den Unterschied definieren? Klammere ich dagegen den Ursprung des Universums einfach aus und nehme nur die heute bekannten physikalischen Gesetze, spielt eine Verschiebung in der Zeit keine Rolle.

Schauen wir uns noch einige andere Beispiele für Symmetriegesetze an, etwa die Drehung im Raum, eine bestimmte Drehung. Nehmen wir an, ich baue an einem Ort eine bestimmte Versuchsanordnung auf und nehme dann eine andere (möglichst verschoben, damit sie nicht im Weg ist) von genau derselben Art, aber gedreht, so daß sämtliche Achsen in eine andere Richtung weisen, so funktionieren beide in derselben Weise. Wiederum müssen wir alles, was relevant ist, mit drehen. Haben wir beispielsweise eine Großvateruhr und drehen sie horizontal, liegt das Pendel auf der einen Seite des Gehäuses und rührt sich nicht. Drehen wir aber die Erde ebenfalls (was sie ohnehin die ganze Zeit macht), setzt sich unser Regulator wieder in Bewegung.

Recht interessant ist die mathematische Beschreibung dieser Möglichkeit, etwas zu drehen. Um zu beschreiben, was in einer Situation vorgeht, bedienen wir uns Zahlen, der sogenannten Koordinaten, die die Lage eines Punktes bestimmen.

Gelegentlich nehmen wir auch drei Zahlen, um anzugeben, wie hoch sich der Punkt über irgendeiner Ebene befindet, wie weit davor oder, durch negative Zahlen, wie weit dahinter er liegt und wie weit links er ist. In unserem Fall kümmern uns oben und unten nicht weiter, da wir bei Drehungen mit zwei oder drei Koordinaten auskommen. Nennen wir den Abstand vor mir x und den nach links y . Dann können wir jedweden Körper lokalisieren, indem wir bestimmen, wie weit er vor mir und wie weit er links von mir ist. Die New Yorker unter ihnen wissen aus Erfahrung, wie praktisch eine solche Straßenummerierung ist beziehungsweise war, bis der Name der Sixth Avenue umgeändert wurde. Hinter der Drehung nun steckt folgende mathematische Idee: Wenn ich einen Punkt, wie beschrieben, mit Hilfe von x - und y -Koordinaten lokalisieren und ein anderer, in eine andere Richtung schauender Beobachter denselben Punkt auf dieselbe Weise lokalisiert, aber mit Hilfe von x' und y' , mit denen er die Beziehung zu seinem eigenen Standort festlegt, erweist sich, wie Sie sehen können, meine x -Koordinate als Mischung aus den zwei vom anderen Beobachter angegebenen Koordinaten. Der Zusammenhang besteht also darin, daß x als eine Mischung aus x' und y' und y als eine Mischung aus y' und x' definiert wird. Nun sollten die Naturgesetze so formuliert werden, daß die Gleichungen ihre Form auch dann nicht verändern, wenn Sie die ursprünglichen Größen durch solche Mischungen ersetzen. Das ist die Art und Weise, wie sich die Symmetrie in der Mathematik ausdrückt. Das heißt, Sie können die Gleichungen mit bestimmten Buchstaben wie x und y schreiben, diese aber genausogut durch eine Kombination aus x' und y' ersetzen, ohne daß sich etwas verändern würde, außer daß nun alle Buchstaben mit einem Strich geschrieben werden. Das bedeutet, daß der andere Beobachter bei seiner Versuchsanordnung dieselben Beobachtungen macht wie ich bei meiner, obwohl meine gedreht ist.

Ich möchte Ihnen noch ein anderes, äußerst interessantes Beispiel für ein Symmetriengesetz geben, die gleichförmige ge-



Die Lage von Punkt P zu mir wird mit zwei Zahlen, x und y , beschrieben; x gibt an, wie weit P vor, y wie weit es links von mir liegt.

Derselbe Punkt P wird mit zwei neuen Zahlen, x' und y' , bezeichnet, wenn ich mich, am selben Ort, gedreht habe und in eine andere Richtung schaue.

Abbildung 23

radlinige Bewegung. Nach heutiger Überzeugung, wie sie im sogenannten Relativitätsprinzip zum Ausdruck kommt, werden die Gesetze der Physik durch eine geradlinig gleichförmige Bewegung nicht verändert. Bauen wir also ein und dieselbe Versuchsanordnung einmal in einem Raumschiff und einmal hier auf der Erde auf, dann wird der Raumfahrer, wenn sich sein Schiff mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegt, dieselben Beobachtungen machen wie ich, der ich mich hier nicht vom Fleck rühre. Auf einem ganz anderen Blatt natürlich steht, was passiert, wenn er hinausschaut oder gegen irgendein Hindernis rennt oder dergleichen; solange er sich jedoch geradlinig gleichförmig fortbewegt, sehen für ihn die Ge-

setze der Physik genauso aus wie für mich. Das aber bedeutet, ich kann nicht sagen, wer von uns beiden sich bewegt.

Ehe wir weitermachen, muß ich noch betonen, daß bei all diesen Transformationen und all diesen Symmetrien nicht das ganze Universum bewegt werden soll. Im Fall der Zeit würde ich, wenn ich sämtliche Zeiten im ganzen Universum verschiebe, ja überhaupt nichts aussagen. Ebenso witzlos wäre es, alles im ganzen Universum an einen anderen Ort zu rücken, wo sich natürlich alles genauso verhielte. Bemerkenswert ist ja gerade, daß ich nur ein Stück herausgreife und verschiebe und dann eine Reihe von Bedingungen erfülle, daß ich mithin einen Teil der Welt relativ zum Durchschnitt aller übrigen Sterne verschiebe, ohne daß es eine Rolle spielt. Im Fall der Relativität bedeutet das, daß ein Raumfahrer, der relativ zum Durchschnitt der übrigen Galaxien mit gleichförmiger Geschwindigkeit geradlinig dahinfliegt, keine Wirkung beobachtet. Oder anders ausgedrückt, es ist unmöglich, allein von den Ergebnissen eines Experiments in einem Fahrzeug, ohne hinauszuschauen, zu sagen, ob man sich relativ zu sämtlichen Sternen bewegt oder nicht.

Dieser Satz wurde schon von Newton aufgestellt. Schauen wir uns daraufhin einmal sein Gravitationsgesetz an. Es besagt, daß die Kräfte umgekehrt proportional zu den Quadraten der Abstände sind und daß eine Kraft eine Veränderung der Geschwindigkeit bewirkt. Nehmen wir an, ich hätte ausgerechnet, was passiert, wenn ein Planet um eine feststehende Sonne kreist, und möchte nun wissen, was passierte, wenn ein Planet um eine sich bewegende Sonne kreiste. Dann unterschieden sich ja wohl sämtliche Geschwindigkeiten von denen im ersten Fall, weil ich noch eine konstante Geschwindigkeit hinzufügen müßte. Das Gesetz ist aber in Begriffen von *Veränderungen* der Geschwindigkeit formuliert, so daß die Kraft, die auf den Planeten mit der feststehenden Sonne wirkt, dieselbe ist wie die, die auf den mit der sich bewegenden Sonne wirkt, weshalb auch die Geschwindigkeitsveränderungen der beiden Planeten identisch sein müssen. Jede zusätzliche Ge-

schwindigkeit, wie sie in der Ausgangsposition beim zweiten Planeten auftreten soll, bleibt zwar erhalten, beeinflusst aber den weiteren Ablauf nicht und wird lediglich unter dem Strich dazu addiert. Die Aussage der Mathematik ist eindeutig: Durch Hinzukommen einer konstanten Geschwindigkeit ändern sich die Gesetze nicht, so daß wir aus der Beobachtung des Sonnensystems und der Bewegung der Planeten um die Sonne nicht erschließen können, ob sich die Sonne selbst durch den Raum bewegt oder nicht. Laut Newtons Gesetz würde eine solche Bewegung durch den Raum die Bewegung der Planeten um die Sonne nicht beeinflussen. Deshalb fügte Newton seinem Gesetz hinzu: »Die Bewegung der Körper untereinander in einem Raum ist dieselbe, ob sich dieser Raum seinerseits relativ zu den Fixsternen in Ruhe befindet oder ob er sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit geradlinig fortbewegt.«

Im Laufe der Zeit wurden nach Newton neue Gesetze entdeckt, so von Maxwell* die Gesetze der Elektrizität. Eine der Folgen dieser neu entdeckten Elektrizitätsgesetze war die Annahme von Wellen, elektromagnetischen Wellen – zum Beispiel Licht –, die sich, komme, was da wolle, mit einer Geschwindigkeit von 299 792,5 Kilometern pro Sekunde ausbreiten sollten. Damit schien das Problem herauszufinden, wer sich denn nun bewege und wer nicht, schlagartig gelöst. Auf den ersten Blick jedenfalls scheint das Gesetz, daß sich Licht mit einer Geschwindigkeit von 299 792,5 Kilometern pro Sekunde fortbewegt, diese Nebenwirkung zu haben. Ist es denn nicht augenfällig, daß ein Lichtstrahl, den ich von meinem festen Standort aus auf Ihr mit 100 000 Kilometern pro Sekunde in eine bestimmte Richtung dahinrasendes Raumschiff abschieße, und den Sie, selber mit 100 000 Sachen unterwegs, durch ein kleines Loch an sich vorbeischießen sehen, in Ihren Augen nur eine Geschwindigkeit von 199 792,5

* James Clerk Maxwell, 1831–1879, erster Professor für experimentelle Physik in Cambridge

Kilometern pro Sekunde haben kann? Doch wenn Sie sich auf dieses Experiment wirklich einlassen, sehen Sie den Lichtstrahl mit 299 792,5 Kilometern pro Sekunde an sich vorbeirasen – genau wie ich, der ich mich nicht bewege!

Die Natur konfrontiert uns immer wieder mit Tatsachen, die nicht ganz einfach zu begreifen sind; und das Resultat dieses Experiments geht dem gesunden Menschenverstand so sehr gegen den Strich, daß es noch heute Leute gibt, die es einfach nicht glauben wollen! Nichtsdestotrotz erbrachten sämtliche Experimente stets dasselbe Ergebnis: Das Licht breitet sich, gleichgültig wie schnell sich der Beobachter selbst bewegt, mit einer Geschwindigkeit von 299 792,5 Kilometern pro Sekunde aus. Wie aber kann das sein? Einstein und ebenso Poincaré* kamen zu dem Schluß, daß eine in Bewegung und eine in Ruhe befindliche Person nur dann dieselbe Geschwindigkeit messen können, wenn ihr Zeit- und Raumgefühl nicht dasselbe ist, wenn die Uhren im Raumschiff anders gehen als auf der Erde und so fort. Nun könnten Sie einwenden: »Aha; dann brauche ich doch bloß auf die Uhr im Raumschiff zu schauen, um zu sehen, daß sie langsamer geht.« Nein, denn Sie schauen und denken auch langsamer! Durch die Gleichschaltung von allem und jedem im Raumschiff ist es also gelungen, ein System auszutüfteln, demzufolge die Lichtgeschwindigkeit im Raumschiff 299 792,5 Raumschiffkilometer pro Raumschiffsekunde beträgt, während ich sie hier mit 299 792,5 Erdenkilometern pro Erdensekunde messe. Eine raffinierte Sache, die unglaublich klingt, und doch ist es so!

Eine der Folgen des Relativitätsprinzips habe ich bereits erwähnt: Man kann nicht sagen, wie schnell man sich in gerader Linie fortbewegt. Erinnern Sie sich an unser Beispiel in der letzten Vorlesung. Wir hatten zwei Fahrzeuge A und B (Abb. 24) und ein Ereignis, das an beiden Enden von B eintreten sollte. Der Mann, der in der Mitte von Fahrzeug B

* Jules Henri Poincaré, 1854–1912, französischer Naturwissenschaftler.

stand und die zu einem bestimmten Zeitpunkt an beiden Enden seines Gefährts eintretenden Ereignisse (x und y) beobachtete, erklärte sie für gleichzeitig, da er, in der Mitte des Fahrzeugs stehend, die beiden Lichter gleichzeitig aufleuchten sah. Der Mann in Fahrzeug A dagegen, der sich mit einer konstanten Geschwindigkeit relativ zu B bewegte, sah die beiden Ereignisse nicht gleichzeitig. Er sah x zuerst, da ihn das Licht von x vor dem von y erreichte, denn er bewegte sich vorwärts. Sie sehen also, eine der Folgen des Symmetrieprinzips für geradlinig gleichförmige Bewegung – wobei das Wort Symmetrie nichts anderes bedeutet, als daß man nicht sagen kann, wer recht hat – ist, daß alle meine Aussagen über Vorgänge in der Welt »jetzt« nichts aussagen. Wenn Sie sich geradlinig mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit fortbewegen, sind die Vorgänge, die Ihnen gleichzeitig erscheinen, nicht dieselben, die mir gleichzeitig erscheinen, obwohl wir einander in dem Augenblick passieren, in dem ich die Ereignisse als gleichzeitig eintretend wahrgenommen habe. Wir können uns nicht einigen, was »jetzt« über eine Entfernung bedeutet. Das hat eine tiefgreifende Umwandlung unserer Vorstellungen von Raum und Zeit zur Folge, wenn das Prinzip einer nicht wahrnehmbaren geradlinig gleichförmigen Bewegung erhalten bleiben soll. Im Grunde geht es doch darum, daß zwei Vorgänge, die von einem Punkt aus gleichzeitig erscheinen, von einem anderen Punkt aus nicht gleichzeitig erscheinen, vorausgesetzt, sie geschehen nicht an ein und demselben Ort, sondern in großer Entfernung.

Das wird Sie an unser x - und y -Spielchen im Raum erinnern. Solange ich ins Auditorium hineinschaue, sind die beiden Wände des Podiums, auf dem ich stehe, auf einer Ebene mit mir. Sie haben dasselbe x , aber ein anderes y . Drehe ich mich aber um 90 Grad und schaue dieselben Wände nunmehr von einem anderen Blickwinkel aus an, ist eine vor mir und eine hinter mir, sie haben also ein anderes x' . So können zwei Ereignisse, die unter einem Blickwinkel gleichzeitig zu sein (dasselbe t zu haben) scheinen, unter einem anderen zu ver-

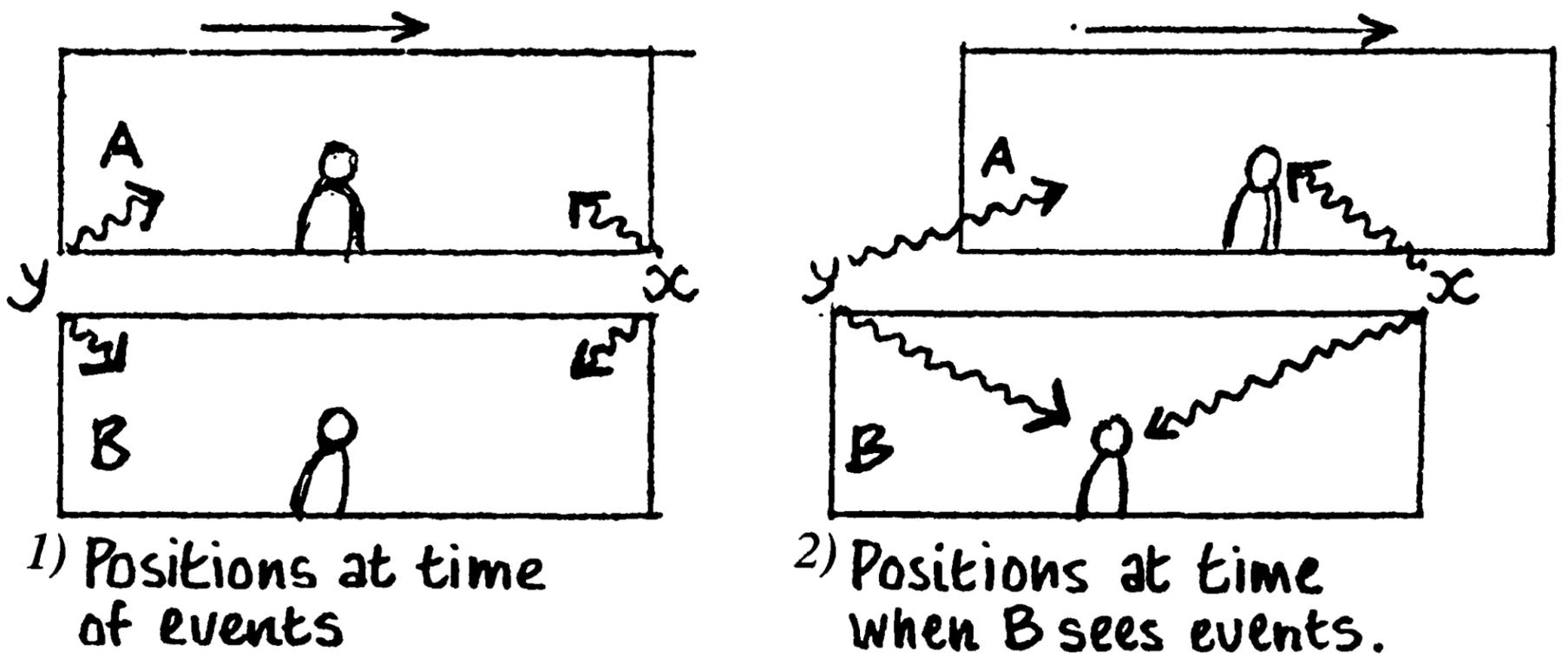


Abbildung 24 1) Positionen zum Zeitpunkt des Ereignisses 2) Positionen zum Zeitpunkt, da B die Ereignisse sieht

schiedenen Zeiten einzutreten (ein anderes t' zu haben) scheinen. Deshalb wurde die zweidimensionale Drehung, von der ich gesprochen habe, in Raum und Zeit verallgemeinert, so daß die Zeit dem Raum zu einer vierdimensionalen Welt hinzugefügt wurde. Dabei handelt es sich keineswegs um eine rein künstliche Hinzufügung, wie man nach den Erklärungen der meisten popularisierenden Bücher vermuten könnte: »Wir fügen dem Raum die Zeit hinzu, weil man einen Punkt nicht einfach lokalisieren kann, sondern auch den Zeitpunkt bestimmen muß.« Das stimmt zwar, aber das ergäbe noch keine wirkliche vierdimensionale Raum-Zeit; das hieße lediglich, zwei Dinge zusammenzunehmen. Charakteristisch für den wirklichen Raum ist in gewisser Hinsicht, daß er unabhängig von einem bestimmten Blickwinkel existiert, das heißt, daß unter verschiedenen Blickwinkeln ein gewisser Betrag von »vorwärts-rückwärts« mit »links-rechts« vermischt werden kann. Analog dazu kann ein bestimmter Betrag der Zeit »Zukunft-Vergangenheit« mit einem bestimmten Raumbetrag vermischt werden. Ja, Raum und Zeit müssen so vollständig ineinandergreifend vorgestellt werden, daß Minkowski sagen konnte: »Der Raum für sich und die Zeit für sich werden zu bloßen Schatten verkommen; einzig eine Art Vereinigung zwischen ihnen wird überleben.«

Ich habe dieses Beispiel so ausführlich behandelt, weil mit ihm recht eigentlich die Erforschung der Symmetrien bei physikalischen Gesetzen beginnt. Von Poincaré stammte der Vorschlag, einmal zu analysieren, was man mit den Gleichungen anstellen kann, ohne daß sich im Grunde etwas verändert.

Poincaré war es, der die Aufmerksamkeit auf die Symmetrien der physikalischen Gesetze zu lenken begann. Die Symmetrien der Raum- und Zeittranslation und so fort führten zwar nicht viel weiter; die Symmetrie der geradlinig gleichförmigen Bewegung dagegen erweist sich als äußerst interessant und hat alle möglichen Folgen. Außerdem lassen sich diese Folgen zu bislang unbekanntem Gesetzen ausweiten. Aufgrund der Annahme, daß dieses Prinzip auf den Zerfall eines My-Mesons zutrifft, können wir zum Beispiel schließen, daß wir die Geschwindigkeit unseres Raumschiffs nicht mit Hilfe von My-Mesonen bestimmen können. So wissen wir immerhin etwas über den Zerfall von My-Mesonen, auch wenn wir keine Ahnung haben, warum sie überhaupt zerfallen.

Daneben gibt es eine Reihe weiterer Symmetrien, die zum Teil ganz anderer Art sind. Lassen Sie mich einige erwähnen. Zum Beispiel können Sie ein Atom durch ein anderes von derselben Art ersetzen, ohne daß es irgendwie zu Buche schlägt. Nun fragen Sie vielleicht: »Was heißt von derselben Art?« Worauf ich Ihnen nur antworten kann, das heißt, daß es keinerlei Unterschied macht, wenn Sie eins durch ein anderes ersetzen! Klingt, als ob die Physiker viel Unsinn redeten, wenn der Tag lang ist. Nun, es gibt viele verschiedene Arten von Atomen, und es macht sehr wohl einen Unterschied, wenn Sie eins durch ein andersartiges ersetzen; ersetzen Sie aber eines durch eins seiner Art, bleibt alles beim alten. Das mag Ihnen wie ein Zirkelschluß erscheinen. Die wahre Bedeutung der Aussage aber liegt darin, daß es Atome von derselben Art *gibt*; daß es möglich *ist*, Gruppen, Klassen von Atomen aufzustellen, so daß man ein Atom durch ein anderes derselben Art ersetzen kann, ohne daß es einen Unterschied macht. Da schon ein winziges Stückchen Materie aus einer

Unzahl Atomen besteht (aus einer 1 gefolgt von ca. 23 Nullen), ist es sehr wichtig, daß es nicht lauter verschiedene Atome sind, daß sie vielmehr alle von derselben Art sind. Ist es nicht geradezu aufregend, daß wir die Atome zu einer beschränkten Anzahl von einigen hundert verschiedenen Typen zusammenfassen können? Darum ist die Aussage, daß wir ein Atom durch ein anderes von derselben Art ersetzen können, sogar äußerst bedeutungsschwer, vor allem in der Quantenmechanik. Aber erlassen Sie es mir, Ihnen die Gründe dafür auseinanderzusetzen, nicht nur, weil die Darlegung eine mathematische Vorbildung erfordern würde, sondern auch, weil es an sich schon eine reichlich haarige Geschichte ist. In der Quantenmechanik hat der Satz, daß ein Atom durch ein anderes derselben Art ersetzt werden kann, phantastische Folgen. Bei flüssigem Helium, der Flüssigkeit, die widerstandslos und somit bis in alle Ewigkeit durch Röhren fließen kann, ruft es ganz eigenartige Erscheinungen hervor. Mehr noch, in diesem Satz liegt der Ursprung des ganzen Periodischen Systems der chemischen Elemente sowie der Kraft beschlossen, die mich davor bewahrt, durch den Boden hindurchzufallen. Auch wenn ich auf all das nicht näher eingehen kann, möchte ich doch nachdrücklich auf die Bedeutung dieser Prinzipien hinweisen.

Möglicherweise haben Sie mittlerweile den Eindruck gewonnen, daß sämtliche Gesetze der Physik symmetrisch sind, was immer auch verändert wird. Doch dem ist nicht so. Lassen Sie mich ein paar Beispiele für das Gegenteil anführen. Allen voran möchte ich hier die Veränderung des Maßstabs (Skalentransformation) nennen. Beispielsweise wird ein Gerät, wenn wir es doppelt so groß bauen, das gleiche Material nehmen und alles ganz genauso machen wie beim erstenmal, keineswegs in genau derselben Weise funktionieren. Das wird Ihnen, da Sie ja wissen, daß alles aus Atomen besteht, ohne weiteres einleuchten. Ein zehn Milliarden mal kleineres Gerät würde vielleicht noch aus fünf Atomen bestehen, und daß man ein Maschinenwerkzeug nicht nur aus fünf Atomen ba-

steln kann, bedarf wohl keiner Frage. Ein dergestalt zugespitztes Beispiel zeigt deutlich, daß sich der Maßstab nicht ohne weiteres verändern läßt. Doch diese Erkenntnis kam nicht erst mit der Atomphysik auf. Vielleicht haben Sie in der Zeitung schon einmal eine Streichholzkathedrale gesehen. Von Zeit zu Zeit tauchen unfehlbar Abbildungen solcher mehrstöckiger Wunderwerke auf, die noch viel filigraner wirken als die prächtigste gotische Kathedrale! Warum erstellen wir solche gleichermaßen mit Ziselierungen überfrachtete Prachtbauten nicht aus großen Holzbalken? Die Antwort lautet ganz einfach, weil derart hohe und schwere Bauwerke einstürzen würden. Ah? Ja, Sie haben vergessen, daß man, wenn man zwei Dinge vergleicht, alles im System verändern muß. Die kleine Streichholzkathedrale wird von der Erde angezogen, also müßten Sie, wenn Sie sie in einem größeren Maßstab bauen, auch die Erde vergrößern. Zu dumm! Eine größere Erde würde unsere Riesenkathedrale nur um so stärker anziehen, das heißt mit um so größerer Gewißheit zum Einsturz bringen.

Die Tatsache, daß die Gesetze der Physik von einer Veränderung des Maßstabs nicht unberührt bleiben, wurde zuerst von Galilei entdeckt. In einer Untersuchung über die Stärke von Stangen und Knochen stellte er die Überlegung an, daß ein größeres Tier – sagen wir ein doppelt so großes, langes und dickes Tier, das achtmal so schwer wäre – entsprechend stärkere Knochen brauchte. Nun hängt aber die Tragfähigkeit eines Knochens von seinem Querschnitt ab, und deshalb könnte das Knochengerüst, wenn wir es ebenfalls verdoppelt, da es nur den vierfachen Querschnitt hätte, auch nur das vierfache Gewicht tragen. In seinen »Discorsi« über Zwei neue Wissenschaften* finden sich Abbildungen unproportioniert wirkender imaginärer Knochen von Riesenhunden. Offensichtlich empfand Galilei die Entdeckung, daß eine Verän-

* *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenschaften, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend.* Leipzig 1890 ff.

derung des Maßstabs nicht ohne Einfluß auf die Naturgesetze bleibt, als ebenso wichtig wie seine Bewegungsgesetze; andernfalls hätte er sie wohl kaum in den Band über die Zwei neuen Wissenschaften aufgenommen.

Einen weiteren Fall für die Außerkraftsetzung des Symmetriegesetzes können Sie beobachten, wenn Sie sich in einem Raumschiff mit einer gleichförmigen Winkelgeschwindigkeit drehen. In diesem Fall stimmt es nicht, daß Sie die Bewegung nicht mitbekommen. Sie merken sehr wohl, daß Sie sich drehen. Nicht unbedingt daran, daß Ihnen schwindlig wird; Sie können es an anderen Auswirkungen erkennen. Zum Beispiel werden die Dinge durch die Zentrifugalkraft an die Wand gedrückt (oder wie immer Sie den Vorgang beschreiben wollen – hoffentlich ist unter Ihnen kein Dozent für Einführungskurse in die Physik, der mich korrigiert!). Die Drehung der Erde können Sie mit Hilfe eines Pendels oder einer Kreiselvorrichtung feststellen. Vielleicht haben Sie schon einmal vom sogenannten Foucaultschen* Pendel gehört, das in manchen Observatorien und Museen aufbewahrt wird und das Ihnen beweist, daß sich die Erde dreht, ohne daß Sie zu den Sternen hinaufzuschauen brauchen. Es ist in der Tat möglich, die gleichförmige Winkelgeschwindigkeit der Erde festzustellen, ohne ins All hinauszuschauen, und zwar einzig und allein, weil eine solche Bewegung die Gesetze der Physik nicht unbeeinflußt läßt.

Nun haben viele Leute vorgebracht, die Erde drehe sich ja eigentlich relativ zu den Galaxien, und es würde keinen Unterschied machen, wenn wir diese auch drehten. Ich weiß nicht, was passieren würde, wenn wir das ganze Universum drehen könnten, und derzeit haben wir auch keine Möglichkeit, das festzustellen. Ebenso wenig besitzen wir gegenwärtig eine Theorie, die den Einfluß einer Galaxie auf die irdischen Dinge beschreibt, und aus der folgen würde – direkt, ohne daß man irgendwie mogeln oder nachhelfen müßte –, daß die

* Jean Bernard Léon Foucault, 1819–1868, französischer Physiker.

Trägheitskräfte bei der Drehung, die Auswirkung der Rotation, die Tatsache, daß das Wasser in einem sich drehenden Eimer eine konkave Oberfläche bildet, das Ergebnis einer von den Körpern der Umgebung ausgehenden Kraft sind. Ob das wirklich zutrifft, weiß niemand. Daß es so sein sollte, ist eine Forderung des Machschen Prinzips; daß es so ist, hat aber bis jetzt niemand bewiesen. Eher in den Bereich unmittelbarer Experimente gehört die Frage, ob wir anhand irgendwelcher Wirkungen feststellen können, daß wir uns mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit relativ zu den Galaxien drehen. Die Antwort lautet ja. Stellen wir uns dieselbe Frage, wenn wir uns in einem Raumschiff geradlinig mit gleichförmiger Geschwindigkeit relativ zu den Galaxien bewegen, lautet die Antwort nein. Das sind zwei Paar Stiefel. Wir können nicht sagen, daß alle und jede Bewegung relativ ist. Das behauptet die Relativitätstheorie auch gar nicht. Sie besagt lediglich, daß eine gleichförmige geradlinige Bewegung relativ zu den Galaxien nicht festzustellen ist.

Als nächstes möchte ich Ihnen ein reizvolles Symmetriegesetz mit einer aufregenden Geschichte vorstellen: die Spiegelung im Raum. Ich baue für meinen Versuch, sagen wir, eine Uhr und in kurzer Entfernung dazu eine zweite, die spiegelbildlich zur ersten sein soll. Die beiden Uhren entsprechen einander wie ein Paar Handschuhe, ein linker und ein rechter; jeder rechtsläufigen Feder in der einen Uhr entspricht eine linksdrehende in der anderen und so fort. Nun ziehe ich die beiden Uhren auf, stelle sie an ihren entsprechenden Platz und frage Sie, ob sie immer übereinstimmen werden. Werden das Uhrwerk und das spiegelbildliche Uhrwerk in gleicher Weise funktionieren? Ich weiß nicht, worauf Sie tippen, vermutlich, wie die meisten Leute, auf ja. Natürlich geht es uns hier nicht um Geografie, die uns links und rechts unterscheiden hilft. Wenn wir in Florida stehen und in Richtung New York schauen, können wir sagen, der Ozean liegt rechts von uns. So halten wir rechts und links auseinander, und wenn die Uhr nur mit Meerwasser lief, würde die spiegelbildlich ge-

baute nicht funktionieren, da ihr Werk nicht im Wasser wäre. In diesem Fall brauchten wir uns allerdings bloß vorzustellen, daß bei dieser Uhr auch die ganze Geografie gedreht würde, weil alles, was eine Rolle spielt, mit gedreht werden muß. Ebenso wenig geht es uns natürlich um Geschichte. Verlangen wir eine Schraube im Laden, so können wir wetten, daß das Gewinde rechtsgängig ist. Deshalb, könnten Sie einwenden, muß die spiegelbildliche Uhr, allein schon, weil die Teile für sie schlechter zu bekommen sind, schlechter sein. Doch das ist lediglich eine Frage der Herstellung. Alles in allem dürfte wahrscheinlich unsere erste Vermutung zutreffen, daß nichts eine Rolle spielt. Und in der Tat sind die Gesetze der Schwerkraft so beschaffen, daß eine spiegelbildlich gebaute Uhr, würde sie von der Schwerkraft betrieben, in derselben Weise funktionierte. Dasselbe gilt für die Gesetze der Elektrizität und des Magnetismus. Auch mit elektromagnetischen Eingeweiden, Strömen, Drähten und dergleichen würde unsere Zweituhr ticken. Selbst wenn sie durch gewöhnliche Kernreaktionen in Gang gehalten würde, ließe sie sich durch einen spiegelbildlichen Umbau nicht behindern. Etwas aber gibt es, was sie aus der Bahn werfen könnte.

Vielleicht ist Ihnen bekannt, daß man die Zuckerkonzentration in Wasser durch polarisiertes Licht messen kann. Geben Sie einen Polarisator in den Behälter, der im Wasser nur eine Polarisationsrichtung der Lichtwellen durchläßt, dann zeigt sich, wenn Sie dem Licht auf seinem Weg in die tieferen Schichten des Zuckerwassers folgen, daß Sie am Boden einen anderen Polarisator brauchen, den Sie immer stärker nach rechts drehen müssen, damit das Licht noch durchkommt. Schicken Sie das Licht dann in der anderen Richtung durch die Lösung, ist es noch immer nach rechts gedreht. Hier also gibt es einen Unterschied zwischen rechts und links. Nun könnten wir Zuckerwasser und Licht in unseren Uhren verwenden. Nehmen wir an, wir haben einen Wassertank, durch den wir Licht schicken; wir drehen unseren zweiten Polarisator so, daß das Licht gerade durchkommen kann. Dann kon-

struieren wir spiegelbildlich dazu die zweite Uhr in der Hoffnung, daß sich das Licht nach links wenden wird. Aber es denkt nicht daran. Es wendet sich wieder nach rechts und geht nicht durch. So haben wir also durch Zuckerwasser zwei verschiedene Uhren erhalten!

Das ist ein höchst bemerkenswerter Umstand, der auf den ersten Blick zu beweisen scheint, daß die physikalischen Gesetze hinsichtlich der Spiegelung nicht symmetrisch sind. Nun könnte der von uns verwendete Zucker von Zuckerrüben stammen. Also wiederholen wir dasselbe Experiment mit künstlich hergestelltem Zucker. Kein besonderes Problem, da sich die Zuckermoleküle im Labor ohne weiteres aus Kohlendioxid und Wasser gewinnen lassen, wenn auch über eine ganze Reihe Zwischenstadien. Wiewohl chemisch anscheinend in jeder Hinsicht gleich, dreht diese Zuckerlösung das Licht nicht. Setzt man nun Bakterien hinein, die auf Zucker ganz versessen sind, begnügen sie sich in diesem Fall mit der Hälfte des Angebots. Außerdem dreht der übriggelassene Zucker polarisiertes Licht nach *links*. Warum? Das Zuckermolekül besteht aus einer reichlich komplizierten Anordnung von Atomen. Kopiert man diese Anordnung exakt, tauscht aber links und rechts aus, bleiben sich die Abstände zwischen den Atomen ebenso gleich wie die Energie der Moleküle, so daß bei allen rein chemischen Phänomenen ohne jede Mitwirkung von Lebendigem alles beim alten bleibt. Dennoch finden Lebewesen eine veränderte Situation vor. Bakterien verzehren ausschließlich die gewohnte Sorte und sonst nichts. Der aus der Zuckerrübe gewonnene Zucker besteht durchweg aus derselben Sorte, nämlich aus rechtsdrehenden Molekülen, weshalb er das Licht auch in eine Richtung dreht. Auf diese Art von Molekülen sind die Bakterien spezialisiert. Stellen wir den Zucker hingegen aus Stoffen her, die ihrerseits nicht asymmetrisch sind, aus einfachen Gasen, so erzeugen wir beide Sorten in gleicher Anzahl. Geben wir dann die Bakterien dazu, verspeisen sie die ihnen bekömmliche Sorte und lassen die andere übrig. Deshalb wird das Licht in die andere

Richtung gedreht. Diese beiden Kristalltypen können, wie Pasteur* entdeckte, unter einem Mikroskop unterschieden und getrennt werden. In der Tat läßt sich bündig nachweisen, daß all das zutrifft, und wir brauchen gar nicht auf die Bakterien zu warten, um den Zucker zu trennen, wenn es uns darum zu tun ist. Das Interessante aber ist, daß die Bakterien dies *können*. Bedeutet das, daß die Vorgänge im Bereich des Lebendigen nicht denselben Gesetzen gehorchen? Allem Anschein nach nicht. Es scheint, als ob all die vielen komplizierten Moleküle der Lebewesen einen bestimmten Drehsinn hätten. Zum Beispiel haben die Proteine, die zu den für Lebewesen charakteristischsten Molekülen gehören, die Eigenschaft eines Korkenziehers und drehen alle nach rechts. Soweit wir das überblicken, würde auch biologisch nichts mehr funktionieren, wenn sie auf künstlich hergestellte, linksdrehende träfen (die wir freilich im Labor noch gar nicht zu erzeugen vermögen), da sie nicht zueinander passen würden. Ein linksgängiges Gewinde paßt in ein linksgängiges Gewinde, aber linksgängig und rechtsgängig passen nicht zusammen. Ebenso können die Bakterien mit ihrem Rechtsdrall in ihrem chemischen Innern zwischen rechts- und linksdrehendem Zucker unterscheiden.

Wie aber kam es dazu? Physik und Chemie können nicht zwischen rechts- und linksdrehenden Molekülen unterscheiden, sondern nur beide Arten herstellen. Die Biologie dagegen vermag es. Da liegt die Annahme nahe, daß vor langer Zeit, als sich das Leben zu entwickeln begann, ein Zufallsmolekül entstand und sich über viele, viele Jahre durch Selbstreproduktion fortpflanzte, so daß wir heute diese komischen Klümpchen mit zinkenbewehrten Auswüchsen haben, die miteinander herumalbern... Wir selbst sind Nachkommen dieser ersten Moleküle, die sich rein zufällig auf eben diese Weise gebildet, rein zufällig nach rechts und nicht nach links orientiert und dann reproduziert haben und sich noch immer

* Louis Pasteur, 1822–1895, französischer Bakteriologe.

fortpflanzen. Es ist ganz ähnlich wie bei den Gewinden. Man benutzt rechtsgängige Gewinde, um neue rechtsgängige Gewinde herzustellen, und immer so fort. Die Tatsache, daß sämtliche Moleküle in Lebewesen genau denselben Drehsinn aufweisen, demonstriert den bis auf die molekulare Ebene zurückreichenden gemeinsamen Ursprung des Lebens wohl aufs schlagendste.

Um der Frage, ob die Gesetze der Physik für rechts und links dieselben sind, besser auf den Grund zu kommen, wollen wir das Problem folgendermaßen angehen. Stellen wir uns einmal vor, wir führten ein Telefongespräch mit einem Mars- oder Polarsternbewohner und versuchten, ihm unsere Erde zu beschreiben. Da ergäbe sich zunächst einmal das sprachliche Problem, mit dem sich Professor Morrison* von der Cornell-Universität eingehend beschäftigt hat. Als eine Möglichkeit erscheint ihm, mit »tick, eins: tick, tick, zwei: tick, tick, tick, drei:« und so fort zu beginnen. Unser Gegenüber würde rasch kapieren, daß es um Zahlen geht. Sobald er unser Zahlensystem intus hätte, könnten wir zu Zahlenfolgen übergehen und das Gewicht, die relative Masse, der verschiedenen Atome der Reihenfolge nach angeben und sagen »Wasserstoff, 1,008« und dasselbe für Deuterium, Helium und so fort wiederholen. Nachdem er eine Zeitlang über diesen Zahlen gebrütet hätte, würde er erkennen, daß die mathematischen Verhältnisse denen der Atomgewichte entsprechen, die genannten Namen also die Elemente bezeichnen müssen. Auf diese Weise könnte man Schritt für Schritt eine gemeinsame Sprache aufbauen. Doch nun kommt's. Angenommen unser Marsianer fände uns, nachdem wir uns halbwegs miteinander vertraut gemacht haben, recht sympathisch und wollte wissen, wie wir aussehen. »Nun«, legen Sie los, »wir sind zirka 1,75 Meter groß.« Doch da unterbricht er Sie schon: »1,75 Meter – wie groß ist ein Meter?« Das ist einfach zu beantworten. »1,75

* Philipp Morrison, amerikanischer Physiker, der 1964 im britischen Fernsehen BBC-1 eine Vorlesungsreihe über den »Aufbau des Atoms« hielt.

Meter groß heißt siebzehntausend Millionen Wasserstoffatome hoch.« Das ist kein Witz – das ist eine durchaus ernst zu nehmende Möglichkeit, einem, der keine Maße kennt, 1,75 Meter zu beschreiben – falls wir ihm nicht irgendwelche Muster schicken oder beide die gleichen Objekte betrachten können. Wenn wir seine Frage beantworten wollen, können wir ihm also klarmachen, wie groß wir sind, und zwar weil die Gesetze der Physik durch eine Veränderung des Maßstabs nicht unberührt bleiben. Eben diesen Umstand können wir uns zunutze machen und den Maßstab selber bestimmen. Nun fahren wir in unserer Beschreibung fort – wir sind 1,75 Meter groß, äußerlich zweiseitig, sehen so und so aus, und außerdem stehen da noch diese Zinken heraus und so fort. Darauf der Außerirdische: »Das ist alles hochinteressant, aber wie seht ihr innen aus?« Wir beschreiben ihm also das Herz und alles übrige und schließen: »Und jetzt setzen Sie das Herz auf die linke Seite.« Wie aber können wir ihm klarmachen, welche Seite die linke ist? »Nun ja«, erklären Sie, »wir nehmen Rübenzucker, lösen ihn in Wasser auf und er dreht...« Das Dumme ist nur, daß er dort oben keine Zuckerrüben hat. Außerdem können wir nicht wissen, ob die Zufälle der Evolution auf dem Mars, selbst wenn sie den unseren entsprechende Proteine hervorgebracht hätten, nicht mit dem gegenläufigen Gewinde begonnen hätten. Es gibt keinerlei Möglichkeit, dahinterzukommen. So müssen wir nach vielem Kopfzerbrechen schließlich die Waffen strecken.

Vor rund fünf Jahren jedoch wurden gewisse Experimente durchgeführt, die den Physikern allerlei Rätsel aufgaben. Ich möchte hier nicht ins Detail gehen, aber wir kamen mehr und mehr in die Klemme, in immer paradoxere Situationen, bis schließlich Lee und Yang* den Vorschlag machten, das Prinzip der Rechts- und Links-Symmetrie – also daß für die Natur rechts und links ein und dasselbe ist – in Zweifel zu ziehen. Sie

* Tsung-Dao Lee und Chen Ning Yang, chinesische Physiker, die 1957 gemeinsam den Nobelpreis erhielten.

glaubten, auf diese Weise in verschiedenen Fällen Licht ins Dunkel bringen zu können und schlugen zu diesem Behufe ein paar direktere Experimente vor, von denen ich nur das direkteste erwähnen möchte, das ausgeführt wurde.

Nehmen wir einen radioaktiven Zerfallsprozeß, bei dem zum Beispiel ein Elektron und ein Neutrino entstehen; ein Beispiel dafür ist der früher besprochene Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino; daneben aber gibt es viele Radioaktivitäten, bei denen sich die Kernladungszahl um eins erhöht und ein Elektron ausgeschleudert wird. Interessanterweise zeigt sich, wenn man den Spin der ausgeschleuderten Elektronen mißt, die sich bei diesem Prozeß stets drehen, daß sie sich nach links drehen, und zwar von hinten gesehen, das heißt, gehen sie in Richtung Süden, dann bewegen sie sich in derselben Richtung wie die Erde. Diese Linksdrehung ist charakteristisch für das beim Zerfallsprozeß ausgesandte Elektron. Es ist gradeso, als ob das Gewehr, das das Elektron beim Betazerfall herausschießt, einen gezogenen Lauf hätte. Es gibt zwei Möglichkeiten, einen Lauf zu ziehen: rechts herum oder links herum. Wie die Experimente beweisen, kommt das Elektron aus einem gezogenen Lauf mit Linksdrall. Diesen Umstand nun könnten wir uns zunutze machen, unseren Marsbewohner anrufen und sagen: »Nehmen Sie einen radioaktiven Stoff, ein Neutron, und schauen Sie sich das beim Betazerfall ausgeschleuderte Elektron an. Wenn es nach oben ausgestoßen wird, gibt die Richtung seines Spins die Lage des Herzens in dem von hinten gesehenen Körper an. Damit haben wir also eine Definition von *links*, und auf diese Seite kommt das Herz.« Folglich ist es doch möglich, rechts und links zu unterscheiden oder, anders ausgedrückt, das Gesetz, daß die Welt links-rechts-symmetrisch ist, ist zusammengebrochen.

Lassen Sie mich im folgenden noch ein Wort zum Verhältnis der Erhaltungssätze und der Symmetriegesetze sagen. In der letzten Vorlesung haben wir die Erhaltungssätze, die Erhaltung der Energie, des Impulses, des Drehimpulses und so wei-

ter, ja bereits behandelt. Interessanterweise aber scheint eine tiefe Verbindung zwischen ihnen und den Symmetriegesetzen zu bestehen, wenn diese Beziehung, so wie wir sie heute verstehen, auch nur mit Hilfe der Quantenmechanik wirklich zu begreifen ist. Nichtsdestotrotz möchte ich Ihnen den Zusammenhang an einem Beispiel vorführen.

Gesetzt, die Gesetze der Physik lassen sich durch das Prinzip der kleinsten Wirkung beschreiben, und gesetzt, eins dieser Gesetze besagt, daß man ein ganzes System auf eine Seite bewegen, mit anderen Worten, im Raum verschieben kann, so muß auch der Impuls erhalten bleiben. Zwischen den Symmetrieprinzipien und den Erhaltungssätzen besteht ein tiefer Zusammenhang, der auf dem Minimalprinzip aufbaut. In der zweiten Vorlesung haben wir uns mit der Möglichkeit, physikalische Gesetze zu beschreiben, beschäftigt und gesagt, daß sich ein Teilchen durch Ausprobieren der verschiedenen Wege in einem bestimmten Zeitraum von einem Ort zu einem anderen bewegt. Dabei war von einer bestimmten Größe die Rede, die, vielleicht etwas irreführend, als »Wirkung« bezeichnet wird. Wenn Sie nun die Wirkung auf den verschiedenen Wegen berechnen, zeigt sich, daß die Wirkung für den Weg, den das Teilchen schließlich nimmt, stets kleiner als für irgendeinen anderen Weg ist. Diese Weise, die Naturgesetze zu beschreiben, besagt, daß die Wirkung einer bestimmten mathematischen Formel für den von allen möglichen Wegen tatsächlich eingeschlagenen Weg die kleinste ist. Daß etwas am kleinsten ist, läßt sich auch in der Form ausdrücken, daß man den Weg anfangs um eine Winzigkeit verschieben kann, ohne daß es einen Unterschied macht. Stellen Sie sich vor, Sie spazierten auf Bergen umher – richtiger auf sanften Hügeln, die den in Frage stehenden mathematischen Dingen besser entsprechen – und kämen an den tiefsten Punkt, dann, so behaupte ich, können Sie getrost noch ein Schrittchen machen, ohne daß sich etwas an Ihrer Höhe ändert. Wenn Sie am tiefsten oder auch am höchsten Punkt angelangt sind, ändert ein Schritt in erster Näherung nichts an Ihrer Höhe, wohingegen,

wenn Sie sich an einem Hang befinden, ein Schritt Sie tiefer und, wenn Sie den nächsten in die entgegengesetzte Richtung tun, höher führen kann. Das erklärt, warum, wenn Sie sich am tiefsten Punkt befinden, ein Schritt mehr keine große Rolle spielt; würde er nämlich eine Rolle spielen, dann müßte Sie ein Schritt in die entgegengesetzte Richtung tiefer führen. Da Sie aber bereits am tiefsten Punkt angelangt sind und nicht mehr tiefer hinabsteigen können, ist Ihre erste Näherung, daß ein weiterer Schritt keinen Unterschied macht. Daher wissen wir, daß es für die Wirkung in erster Näherung keine Rolle spielt, wenn wir den Weg um eine Kleinigkeit verschieben. Zeichnen wir unseren Weg von A nach B (Abb. 25) und betrachten wir uns den folgenden anderen möglichen Weg. Erst hüpfen wir zu dem nahegelegenen C und begeben uns dann auf einem parallellaufenden Weg zu einem Punkt, den wir D nennen wollen und der natürlich um denselben Betrag verschoben ist, da er ja der Endpunkt dieses Parallelwegs ist. Nun haben wir aber gerade entdeckt, daß den Naturgesetzen zufolge die Gesamtwirkung auf dem ACDB-Weg in erster Näherung dieselbe ist wie die auf dem ursprünglichen Weg AB – und zwar laut dem Minimalprinzip, wenn es die wirkliche Bewegung ist. Das ist aber noch nicht alles. Die Wirkung auf dem ursprünglichen Weg von A nach B ist dieselbe wie die Wirkung von C nach D, wenn die Welt die gleiche bleibt, das heißt, wenn Sie alles verschieben, da der Unterschied zwischen den beiden allein darin besteht, daß Sie alles verschoben haben. Deshalb ist, vorausgesetzt das Symmetriengesetz der Raumtranslation trifft zu, die Wirkung auf dem direkten Weg zwischen A und B die gleiche wie die auf dem direkten Weg zwischen C und D. Für die eigentliche Bewegung jedoch ist die Gesamtwirkung auf dem indirekten Weg ACDB nahezu die gleiche wie die für den direkten Weg AB und damit dieselbe wie für den Teil von C nach D. Diese indirekte Wirkung ist die Summe aus drei Teilen – die Wirkung von A nach C, die von C nach D, plus der von D nach B. Zieht man nun Gleiches von Gleichem ab, muß, wie Sie vielleicht erkennen



Abbildung 25

können, der Beitrag von A nach C und der von D nach B unter dem Strich null ergeben. Bei einem dieser Abschnitte bewegen wir uns in die eine Richtung, beim anderen in die entgegengesetzte Richtung. Nehmen wir den Beitrag von A nach C und betrachten ihn als Effekt der Bewegung in eine Richtung, und den Beitrag von D nach B mit umgekehrten Vorzeichen (da er in die andere Richtung geht) als Beitrag von B nach D, zeigt sich, daß die Größe von A nach C der Größe von B nach D entsprechen muß, so daß sich beide aufheben. Das also ist der Effekt auf die Wirkung eines winzigen Schritts in die Richtung von B nach D. Diese Größe, der Effekt auf die Wirkung eines kleinen Schritts nach rechts, ist die gleiche am Anfang (von A nach C) wie am Ende (von B nach D). Damit haben wir eine Größe, die sich mit der Zeit nicht ändert, vorausgesetzt die Prinzipien der kleinsten Wirkung und der Symmetrie der Raumtranslation treffen zu. Diese unveränderliche Größe (der Effekt auf die Wirkung eines kleinen Schritts nach einer Seite) ist genau der Impuls, den wir in der voraufgegangenen Vorlesung besprochen haben. So laufen die Beziehungen zwischen Symmetriengesetzen und Erhaltungssätzen – vorausgesetzt die Gesetze gehorchen dem Prinzip der kleinsten Wirkung. Das tun sie, wie sich herausstellt, weil sie aus der Quantenmechanik kommen. Und das ist auch der Grund, weshalb ich Ihnen sagte, daß die Beziehungen zwi-

schen den Symmetriengesetzen und den Erhaltungssätzen aus der Quantenmechanik stammen.

Analoge Betrachtungen für die Zeittranslation führen zur Erhaltung der Energie; entsprechende Überlegungen über die Isotropie des Raums, das heißt, daß die Drehung im Raum keine Rolle spielt, zur Erhaltung des Drehimpulses; die Tatsache, daß sich links und rechts austauschen lassen, ohne daß sich etwas ändert, zur Erhaltung der Parität, einer im klassischen Sinn alles andere als einfachen Sache. Dennoch muß ich die Erhaltung der Parität erwähnen, da der eine oder andere von Ihnen möglicherweise in der Zeitung gelesen hat, daß sich dieses Gesetz als falsch entpuppt habe. Leichter verständlich als diese komplizierten Wörter wäre gewesen, hätte man die Dinge beim Namen genannt und ganz einfach geschrieben: Das Prinzip, daß man rechts und links nicht auseinanderhalten kann, hat sich als falsch erwiesen.

Im Zusammenhang mit den Symmetrien möchte ich noch auf einige neue Probleme zu sprechen kommen. Zum Beispiel gibt es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen: zu einem Elektron ein Positron, zu einem Proton ein Antiproton. Im Prinzip können wir auch die sogenannte Antimaterie herstellen, deren Atome sich aus den entsprechenden Antiteilchen zusammensetzen. Besteht das Wasserstoffatom aus einem Proton und einem Elektron, so erhalten wir, wenn wir ein elektrisch negatives Antiproton und ein Positron nehmen und zusammengeben, gleichfalls eine Art Wasserstoffatom, eben ein Antiwasserstoffatom. Solche Antiwasserstoffatome wurden zwar nie hergestellt, wären aber, wie man ausgerechnet hat, im Prinzip mühelos zu produzieren. Allem Anschein nach könnten wir im Grunde alle Arten von Antimaterie auf dieselbe Weise erzeugen wie Materie. Interessant wäre nun, ob die Antimaterie in genau derselben Weise funktioniert wie die Materie, was, soweit wir wissen, der Fall zu sein scheint. Eines der Symmetriengesetze besagt ja, daß sich Produkte aus Antimaterie genauso verhalten würden wie die entsprechenden Materieprodukte. Natürlich würden die Funken nur so sprühen,

wenn sie zusammen kämen, da sie sich bekanntlich gegenseitig vernichten,

Bis vor kurzem waren wir also überzeugt, daß Materie und Antimaterie denselben Gesetzen gehorchen. Seit jedoch die Links-Rechts-Symmetrie anscheinend zu Recht angezweifelt wird, erhebt sich eine wichtige Frage. Würde bei einem Neutronenzerfall mit Antimaterie – also wenn ein Antineutron in ein Antiproton plus ein Antielektron (auch Positron genannt) plus ein Neutrino zerfiel – das Positron mit einem Linksdraht ausgeschleudert werden oder würde es sich nach rechts drehen? Noch vor wenigen Monaten glaubten wir, es würde sich spiegelbildlich verhalten und sich im Gegensatz zum Elektron (Materie) nicht nach rechts, sondern nach links drehen. In diesem Fall könnten wir dem Marsbewohner überhaupt nicht klarmachen, was links und rechts ist. Sollte er nämlich zufällig aus Antimaterie bestehen und sein Experiment mit Antimaterie durchführen, wären seine Elektronen Positronen und würden sich beim Ausstoß in die falsche Richtung drehen. Also würde er auch das Herz auf der falschen Seite einsetzen. Angenommen, Sie rufen Ihren Marsbewohner an und erklären ihm die Fabrikation eines Menschen, er macht sich an die Arbeit, und alles klappt. Danach erklären Sie ihm unsere sozialen Konventionen. Zu guter Letzt erklärt er Ihnen den Bau eines weltraumtüchtigen Gefährts, damit Sie seinen Menschen besichtigen können. Und auch das klappt. Sie strecken schon die rechte Hand aus, um das Machwerk zu begrüßen – doch Vorsicht! Streckt es ebenfalls die rechte Hand aus, ist alles in Ordnung. Streckt es jedoch die linke aus, nehmen Sie besser Abstand von der Begrüßung oder sie vernichten sich gegenseitig.

Gern würde ich Ihnen noch etwas über einige andere Symmetrien erzählen, doch die sind schwieriger zu erklären. Daneben gibt es übrigens einige äußerst bemerkenswerte Erscheinungen von Beinahesymmetrien. Zum Beispiel die bemerkenswerte Tatsache, daß wir rechts und links nur mit Hilfe eines sehr schwachen Effekts, mit Hilfe des Betazerfalls, un-

terscheiden können. Das bedeutet, daß die Natur zu 99,99 Prozent nicht links oder rechts orientiert ist; daß nur ein winziger Teil, nur ein einziges kleines charakteristisches Phänomen aus dem Rahmen fällt und absolut einseitig ist – ein Geheimnis, das uns bis jetzt ein Buch mit sieben Siegeln ist.

5. Die Unterscheidung von Vergangenheit und Zukunft

Die Unumkehrbarkeit der Erscheinungen dieser Welt, ich meine den Ablauf der Ereignisse in eine Richtung, ist für jedermann augenfällig. Eine Tasse, die man hinunterfallen läßt, zerbricht, und man kann noch so lange sitzen bleiben und darauf warten, daß sich die Scherben wieder zusammenfügen und die Tasse in die Hand zurückhüpft, es tut sich nichts. Wenn Sie am Strand stehen und zusehen, wie sich die Wellen brechen, können Sie auf den zweifelsohne erhebenden Augenblick, daß sich der Schaum sammelt, aus dem Meer aufsteigt, um weiter draußen über dem Wasser wieder niederzugehen, warten, bis Sie schwarz werden.

Dieser Tatbestand wird in Vorlesungen gewöhnlich mit Hilfe eines Films demonstriert, den man zum Gaudium aller rückwärts laufen läßt. Das Unisono-Gelächter bedeutet nichts anderes, als daß dergleichen in der wirklichen Welt nicht geschehen würde. Genau besehen jedoch ist das eine billige Art und Weise, den ebenso unverkennbaren wie tiefen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft zu demonstrieren, zumal wir im Leben auch ohne alle Experimente Vergangenheit und Zukunft als etwas vollständig anderes erfahren. Die Vergangenheit erinnern wir, die Zukunft nicht. Das, was passieren könnte, wird von uns anders registriert als das, was sich vermutlich ereignet hat. Vergangenheit und Zukunft sind psychologisch gesehen zwei Paar Stiefel; Begriffe wie Gedächtnis und (scheinbare) Willensfreiheit machen uns glauben, wir könnten irgendeinen Einfluß auf die Zukunft nehmen, wohingegen niemand glaubt oder allenfalls eine

Minderheit, man könne an der Vergangenheit noch etwas ändern. Ebenso deutlich für die Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft zeugen Begriffe wie Gewissensbisse und Bedauern oder Hoffnung und so fort.

Nun besteht aber die Welt der Natur aus Atomen, und auch wir sind aus Atomen gemacht und den Gesetzen der Physik unterworfen. Was läge also näher, als diese augenfällige Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft, diese Unumkehrbarkeit aller Erscheinungen, auf Gesetze zurückzuführen, die den Atomen verbieten, sich in diese oder jene Richtung zu bewegen, ihnen nur Einbahnstraßen gestatten. Irgendwo im Getriebe, sollte man annehmen, müßte es ein Prinzip geben, daß Uxels nur zu Wuxels werden dürfen, aber nie umgekehrt, weshalb die ursprünglich uxelige Welt ständig wuxeliger wird, und daß dieses Einbahnschild für die Wechselwirkungen sämtliche Erscheinungen dieser Welt in eine Richtung lenkt.

Nur haben wir dieses Schild noch nicht gefunden. Das heißt, die physikalischen Gesetze, die wir bis heute entdeckt haben, scheinen keinen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft zu machen. Der Film sollte vor- und rückwärts gleichermaßen abspielbar sein, ohne daß der zuschauende Physiker lachen müßte.

Nehmen wir unser Standardbeispiel, das Gravitationsgesetz. Gesetzt den Fall, ich habe eine Sonne und einen Planeten und schicke den Planeten in einer bestimmten Richtung um die Sonne, filme das Ganze und lasse dann den Film rückwärts laufen. Was geschieht? Der Planet umkreist die Sonne, natürlich in der entgegengesetzten Richtung, aber er beschreibt weiterhin eine Ellipse. Auch seine Geschwindigkeit folgt nach wie vor dem Gesetz, daß der Radius stets in gleichen Zeiten die gleiche Fläche überstreicht. Kurzum, er bewegt sich genauso, wie er soll. Es ist keinerlei Unterschied zur anderen Richtung festzustellen. Mithin gehört das Gravitationsgesetz in die Rubrik derjenigen Gesetze, für die die Richtung keine Rolle spielt. Deshalb wird ein Film, in dem nur auf

Schwerkraft beruhende Erscheinungen vorkommen, beim Rückwärtslaufen völlig normal wirken. Präziser formuliert, heißt das: Würden die Geschwindigkeiten sämtlicher Teilchen in einem komplizierteren System schlagartig umgedreht, würde lediglich alles, was vorher aufgespult wurde, wieder abgespult. Durch eine plötzliche Umkehrung ihrer Geschwindigkeit würden die Teilchen alles vorher Geschehene wieder vollständig rückgängig machen.

Das liegt im Gravitationsgesetz beschlossen, das bekanntlich besagt, daß sich die Geschwindigkeit infolge von Kraftwirkung verändert. Kehre ich die Zeit um, dann ändert sich dadurch nichts an den Kräften und damit auch nichts an den Veränderungen der Geschwindigkeit gemäß den unterschiedlichen Entfernungen. So erfährt jede Geschwindigkeit eine Abfolge von Veränderungen in genau der umgekehrten Weise, in der diese Änderungen vorher erfolgten, womit bewiesen wäre, daß das Gravitationsgesetz zeitlich umkehrbar ist.

Und das Gesetz der Elektrizität und des Magnetismus? Ebenfalls zeitlich umkehrbar. Und die Gesetze der nuklearen Wechselwirkung? Soweit wir wissen, gleichfalls zeitlich umkehrbar. Und die Gesetze des früher besprochenen Betazerfalls? Sind auch sie zeitlich umkehrbar? Die Probleme, die vor einigen Monaten bei den Experimenten auftauchten und auf eine Lücke in den Gesetzen hinweisen, lassen möglich erscheinen, daß der Betazerfall zeitlich nicht umkehrbar sein könnte. Also heißt es abwarten, bis weitere Experimente mehr Klarheit geschaffen haben. Zumindest aber läßt sich jetzt bereits sagen, daß der Betazerfall (ob zeitlich umkehrbar oder nicht) für die meisten Alltagsvorgänge so gut wie unerheblich ist. Daß ich zu Ihnen sprechen kann, hängt beispielsweise nicht vom Betazerfall ab, auch wenn chemische Wechselwirkungen, elektrische Kräfte (Kernkräfte im Augenblick weniger) und nicht zuletzt die Schwerkraft im Spiel sind. Aber es ist ein einseitiger Vorgang – ich spreche, und eine Stimme verläßt meinen Körper und schwingt in die Luft hinaus,

schlüpft aber nicht in meinen Mund zurück, wenn ich ihn aufmache –, und diese Unumkehrbarkeit läßt sich nicht am Phänomen des Betazerfalls aufhängen. Mit anderen Worten, nach heutiger Überzeugung gehorchen die meisten, durch die Bewegung von Atomen hervorgerufenen alltäglichen Vorgänge in der Welt vollständig umkehrbaren Gesetzen. Also müssen wir weitersuchen, ob sich die Unumkehrbarkeit nicht irgendwie anders erklären läßt.

Betrachten wir die Planeten unseres Sonnensystems etwas genauer, zeigt sich bald, daß irgend etwas nicht ganz in Ordnung ist. Beispielsweise verlangsamt die Erde die Umdrehung um ihre Achse etwas, und zwar aufgrund der Gezeitenreibung. Offensichtlich ist die Reibung etwas, was man nicht umkehren kann. Schubse ich ein schweres Gewicht über den Boden, wird es nach einiger Zeit zum Stillstand kommen. Nun kann ich warten, bis ich Wurzeln schlage, es wird sich nicht plötzlich in Bewegung setzen, seinen Lauf beschleunigen und zu meiner Hand zurückkehren. Die Wirkung der Reibung scheint demnach unumkehrbar. Wie wir aber von einer der voraufgegangenen Vorlesungen her wissen, ist die Wirkung der Reibung das Ergebnis ungeheurer komplexer Wechselwirkungen zwischen dem Gewicht und dem Holz des Fußbodens, dem Tanz der Atome. Die geregelte Bewegung des Gewichts wird in ein unregelmäßiges Hin- und Herwackeln der Atome im Holz übersetzt, weshalb wir uns den Vorgang etwas näher anschauen sollten.

In der Tat findet sich hier der Schlüssel zur augenfälligen Unumkehrbarkeit. Lassen Sie mich ein einfaches Beispiel wählen. Angenommen, wir haben in einem Tank, durch eine kleine Zwischenwand getrennt, blaues Wasser mit Tinte und klares Wasser ohne Tinte und ziehen dann ganz vorsichtig die Trennwand heraus. Das Wasser war also eingangs in blaues auf der einen und klares auf der anderen Seite getrennt. Nun warten wir eine Zeitlang. Und nach und nach vermischt sich das blaue mit dem klaren Wasser, bis wir schließlich, gleichmäßig auf den ganzen Tank verteilt, eine »schwach blaue«

Flüssigkeit haben, eben fünfzig zu fünfzig. Wie lange wir auch beobachtend ausharren, das Wasser trennt sich nicht wieder. (Allerdings könnten Sie etwas *tun*, um das blaue Wasser abzusondern. Sie könnten das Wasser verdampfen und anderswo kondensieren, die blaue Farbe herauskratzen, in der Hälfte des Wassers auflösen und in den Tank zurückschütten. Dabei jedoch würden Sie Ihrerseits anderswo unumkehrbare Phänomene erzeugen.) Von selbst jedenfalls ist der Prozeß nicht rückläufig.

Das soll uns ein Tip sein. Schauen wir uns einmal die Moleküle an. Nehmen wir an, wir filmten die Vermischung des blauen und des klaren Wassers und ließen den Film rückwärts laufen. Ein komischer Anblick, wie sich einheitlich gefärbtes Wasser nach und nach in blaues auf der einen und klares auf der anderen Seite trennt – total verrückt. Nun vergrößern wir das Bild, damit der Physiker alles bis hin zu den Atomen beobachten kann und endlich den unumkehrbaren Vorgang entdeckt, den Punkt, an dem das Gleichgewicht von vor- und rückwärts zusammenbricht. Wieder lassen wir den Film laufen. Zwei verschiedene Arten von Atomen werden sichtbar (wir wollen sie, so lächerlich das ist, blaue und farblose nennen), die unaufhörlich in thermischer Bewegung tanzen. Fangen wir am Anfang an, haben wir die meisten Atome der einen Art auf der einen und die Atome der anderen Art auf der anderen Seite. Nun hüpfen und tanzen diese Atome herum, Milliarden und Abermilliarden, und wir können zusehen, wie sie sich durch ihre ständigen unregelmäßigen Bewegungen nach und nach vermischen und damit das Wasser schließlich mehr oder weniger gleichmäßig blau färben.

Picken wir uns aus diesem Bild nun irgendeinen Zusammenstoß heraus und schauen uns an, wie die Atome zusammen- und wieder zurückprallen. Dann lassen wir diesen Abschnitt des Films rückwärts laufen und sehen, wie sich unser Molekülpaar andersherum aufeinander zu bewegt und so rum auseinandersprengt. Und so prüfend der Physiker auch schaut und alles vermißt, zum Schluß muß er doch sagen: »Das geht

in Ordnung; es entspricht den Gesetzen der Physik. Wenn zwei Moleküle auf diese Weise zusammenstießen, würden sie auf diese Weise auseinandersprengen.« Kurzum, der Vorgang ist umkehrbar. Die Gesetze der molekularen Zusammenstöße sind umkehrbar.

Mit anderen Worten, wenn Sie allzu genau hinschauen, verstehen Sie platterdings gar nichts mehr, denn, obwohl jeder einzelne Zusammenstoß absolut umkehrbar ist, zeigt der Film im ganzen einen absurden Vorgang: Moleküle in gemischter Ausgangsposition – blau, farblos, blau, farblos, blau, farblos – sortieren sich mit der Zeit durch Zusammenstöße in eine blaue und eine farblose Hälfte. Das aber können sie nicht – es ist nicht natürlich, daß sich die blauen von sich aus von den farblosen trennen, das widerspricht den Zufällen des Lebens. Und doch ist, wenn man diesen rückwärts laufenden Film mit größter Aufmerksamkeit betrachtet, jeder einzelne Zusammenprall in Ordnung.

Sie sehen also, die Unumkehrbarkeit ist einzig und allein durch die allgemeinen Zufälle des Lebens bedingt. Wählen Sie als Ausgangspunkt einen getrennten Zustand, so wird dieser durch unregelmäßige Veränderungen gleichförmiger werden. Wählen Sie dagegen einen gleichförmigen Ausgangszustand, dann wird dieser durch unregelmäßige Veränderungen nicht etwa in sauberlich getrennten Kategorien enden. Er *könnte* zwar, denn es verstößt nicht gegen die Gesetze der Physik, daß die Moleküle solcherart herumtanzen, daß sie sich nach Farben trennen. Es ist lediglich unwahrscheinlich und würde in einer Million Jahre nicht geschehen. Das ist die Antwort. Unumkehrbar ist etwas nur in dem Sinn, daß eine bestimmte Weise der Abwicklung wahrscheinlich ist, die entgegengesetzte Abwicklung aber, wiewohl im Rahmen der physikalischen Gesetze durchaus möglich, nicht in einer Million Jahre eintreten würde. Es wäre schlichtweg lächerlich, glaubte man aussitzen zu können, bis die tanzenden Atome ein gleichförmiges Tinten-Wasser-Gemisch in Wasser auf der einen und Tinte auf der anderen Seite getrennt haben.

Hätte ich nun mein Experiment durch einen Behälter auf vier oder fünf Moleküle der beiden Arten begrenzt, so hätten sie sich mit der Zeit zwar ebenfalls vermischt. Vermutlich aber wäre, nachdem wir die unregelmäßigen Zusammenstöße dieser Moleküle noch eine Zeitlang beobachtet hätten – nicht unbedingt eine Million Jahre, vielleicht nur ein Jahr –, rein zufällig wieder der Ausgangszustand eingetreten, zumindest in dem Sinn, daß wir durch Einschieben einer Trennwand auf der einen Seite wieder alle farblosen und auf der anderen alle blauen gehabt hätten. Das ist nicht unmöglich. Die Objekte jedoch, mit denen wir im Normalfall arbeiten, bestehen nicht nur aus vier oder fünf blauen und farblosen, sondern aus vier oder fünf Millionen, Millionen, Millionen, Millionen Atomen, die alle auf diese Weise getrennt werden müßten. Die augenfällige Unumkehrbarkeit der Natur rührt folglich nicht aus der Unumkehrbarkeit der fundamentalen physikalischen Gesetze, sondern aus der Eigenart, daß, wenn wir mit einem geordneten System beginnen, die Weiterentwicklung durch die Unregelmäßigkeiten der Natur, den Tanz der Moleküle, nur in eine Richtung gelenkt wird.

Deshalb lautet die nächste Frage: Wie ist es überhaupt zu dieser Ordnung gekommen? Oder anders ausgedrückt: Wie ist es möglich, mit dem Geordneten zu beginnen? Die Schwierigkeit liegt darin, daß wir am Anfang ein geordnetes System haben, nicht aber am Ende. Eine der Regeln der Welt besagt, daß ein System von einem geordneten Zustand in einen ungeordneten übergeht. Nebenbei bemerkt bedeuten die Worte Ordnung und Unordnung in der Physik nicht ganz dasselbe wie im Alltagsleben. Die Ordnung muß für Sie als Mensch nicht notwendig von Interesse sein; sie bezeichnet lediglich eine klar umrissene Situation: alle auf der einen und alle auf der anderen Seite oder alle gemischt – das bedeutet geordnet und ungeordnet.

Nun fragt sich natürlich, wie das System zunächst einmal in einen geordneten Zustand kommt, und warum wir angesichts einer ganz gewöhnlichen Situation, die nur teilweise geordnet

ist, schließen können, daß sie vermutlich aus einer geordneten hervorgegangen ist. Betrachte ich einen Wassertank mit dunkelblauem Wasser auf der einen und glasklarem Wasser auf der anderen Seite und einer bläulichen Flüssigkeit dazwischen und erfahre, daß man das Ganze seit zwanzig oder dreißig Minuten sich selber überlassen hat, komme ich zu dem Schluß, daß Blau und Farblos in der Vergangenheit vollständiger getrennt waren. Warte ich eine Zeitlang, vermischen sich die blauen und farblosen noch mehr, und wenn ich weiß, daß sich die Anlage lange genug selber überlassen blieb, kann ich daraus Schlüsse über ihren vergangenen Zustand ziehen. Die Tatsache der unterschiedlich gefärbten Seiten verrät mir, daß die Flüssigkeit vorher viel sauberlicher getrennt gewesen sein muß; andernfalls müßte sie sich in der Zwischenzeit schon mehr durchmischt haben, als es de facto der Fall ist. Das aber bedeutet, daß es möglich ist, von der Gegenwart etwas über die Vergangenheit auszusagen.

In Wirklichkeit kümmern sich die Physiker gewöhnlich nicht um solche Fragen. Sie begnügen sich meist mit der Feststellung: »So und so sind die Gegebenheiten« und fragen lediglich: »Und was passiert als nächstes?« Unsere Nachbarwissenschaften dagegen schlagen sich mit einem gänzlich anderen Problem herum: In der Tat haben es alle anderen Studienfächer – Geschichte, Geologie, Astronomiegeschichte – mit einem Problem der anderen Art zu tun. Sie können Vorhersagen machen, die sich von denen des Physikers grundlegend unterscheiden. Während der Physiker sagt: »Ich sage dir, was unter den gegebenen Umständen als nächstes eintritt«, äußert sich der Geologe etwa des Sinns: »Ich bin bei Grabungen auf eine bestimmte Art von Knochen gestoßen und prophezeie dir, daß du beim Graben auf eine ähnliche Art stoßen wirst.« Und auch der Historiker, dessen Thema eigentlich die Vergangenheit ist, kann sich diesem über den Umweg der Zukunft zuwenden. Mit der Feststellung, daß die Französische Revolution im Jahr 1789 stattfand, will er unter anderem sagen, daß Sie dieses Datum auch in anderen Büchern finden

werden. Im Grunde stellt er Vorhersagen über etwas auf, was er vorher nie gesehen hat, über Dokumente, die erst noch ans Tageslicht kommen müssen. Er prophezeit, daß solche Dokumente, in denen sich etwas über Napoleon findet, mit dem übereinstimmen, was in den anderen Dokumenten steht. Wie aber ist so etwas möglich? Nur indem man davon ausgeht, daß die Vergangenheit der Welt in dieser Hinsicht geordneter war als die Gegenwart.

Nach Ansicht einiger Physiker (aus dem letzten Jahrhundert) soll die Ordnung der Welt auf folgende Weise hergestellt worden sein. Am Anfang bestand das ganze All, wie das gemischte Wasser, nur aus unregelmäßigen Bewegungen. (Sie erinnern sich, bei sehr wenigen Atomen hätte sich das Wasser, vorausgesetzt, wir warteten lange genug, zufällig auch trennen können.) Ihrer Theorie zufolge nun genügt es, daß dieses sich entwickelnde System fluktuierte. (Dieser Terminus technicus besagt, daß es etwas aus dem gewohnten gleichförmigen Zustand geriet.) Es fluktuierte also, und heute beobachten wir die Auflösung dieser Fluktuation. Nun können Sie einwenden: »Aber denken Sie doch, wie lange Sie auf eine solche Fluktuation warten müßten.« Gewiß. Andererseits hätten wir es ohne eine genügende Fluktuation, die die Evolution und damit schließlich auch vernunftbegabte Wesen ermöglichte, überhaupt nicht wahrgenommen. Wir mußten eben abwarten, bis wir am Leben waren, um es überhaupt wahrzunehmen – zumindest so groß hatte die Fluktuation sein müssen. Trotzdem halte ich diese Theorie für unrichtig. Mehr noch, sie erscheint mir lächerlich, und zwar aus folgendem Grund. Wenn die Welt viel größer wäre und sich die Atome ausgangs überall in einer vollständig gemischten Situation befänden, wäre ich doch, wenn ich lediglich die Atome eines Ortes betrachtete, die zufällig getrennt sind, außerstande, daraus den Schluß zu ziehen, daß die Atome auch andernorts getrennt sein müssen. Was ich sähe, wäre ja im Gegenteil eine Fluktuation, also etwas Außergewöhnliches, dessen wahrscheinlichste Ursache doch gerade wäre, daß sich sonst nichts Außergewöhnliches

fände. Das heißt, um das ganze System einseitig zu machen, müßte ich Außergewöhnliches von Außergewöhnlichem borgen, und allzuviel zu borgen, hat sich noch nie empfohlen. Bei unserem Experiment mit dem blauen und dem farblosen Wasser befand sich doch, nachdem es uns schließlich mit Hilfe unseres Gefäßes gelungen war, einige wenige Moleküle zu trennen, der Rest der Flüssigkeit weiterhin im wahrscheinlichsten, nämlich im gemischten Zustand. Und deshalb müßte die Vorhersage, wenn es sich um eine Fluktuation handelte, trotz der sichtbaren Ordnung am Sternenhimmel und auf der Erde lauten, daß dort, wo wir bislang nicht hingeschaut haben, Unordnung und Durcheinander herrschen. Zwar könnte die Trennung der Materie, so wie wir sie sehen, in heiße Sterne und kalten Raum in der Tat eine Fluktuation sein, aber dann würden wir an Orten, die wir noch nicht zu Gesicht bekommen haben, einen Zustand erwarten, bei dem Sterne und Raum nicht voneinander getrennt sind. Da wir hingegen an allen Orten, die sich unserem Augenschein bis jetzt entzogen haben, ausnahmslos ebenfalls Sterne in einem ähnlichen Zustand beziehungsweise ähnliche Aussagen über Napoleon beziehungsweise ähnliche Knochen und Gebeine wie die bereits ausgegrabenen gewärtigen und besagte Wissenschaften samt und sonders sehr erfolgreich sind, dürfte die Welt wohl mitnichten von einer Fluktuation herrühren, sondern von einem Zustand, der in der Vergangenheit getrennter, organisierter war, als er es heute ist. Deshalb erscheint es mir notwendig, den physikalischen Gesetzen die Hypothese hinzuzufügen, daß das Universum in der Vergangenheit in einem technischen Sinn geordneter war, als es heute ist – für mein Empfinden ein Zusatz, ohne den das Ganze nicht plausibel klingt und die Unumkehrbarkeit unbegreiflich bleibt.

Natürlich ist diese Aussage ihrerseits einseitig in der Zeit, besagt sie doch, daß etwas an der Vergangenheit anders ist als an der Zukunft. Aber sie bewegt sich außerhalb dessen, was wir gemeiniglich physikalische Gesetze nennen. Wir versuchen heute nämlich, zwischen den Aussagen der physikali-

schen Gesetze, die die Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich das Universum entwickelt, und dem Gesetz, das den Zustand der Welt in der Vergangenheit bestätigt, genau zu unterscheiden. Letzterer gilt als Gegenstand der Astronomiegeschichte – auch wenn er vielleicht eines Tages Teil des physikalischen Gesetzes sein könnte.

Nun ist die Unumkehrbarkeit mit einer Reihe interessanter Erscheinungen verknüpft, auf die ich gern etwas näher eingehen möchte. Zum Beispiel sollten wir uns einmal anschauen, wie eine Maschine, die nicht rückwärts laufen kann, eigentlich funktioniert.

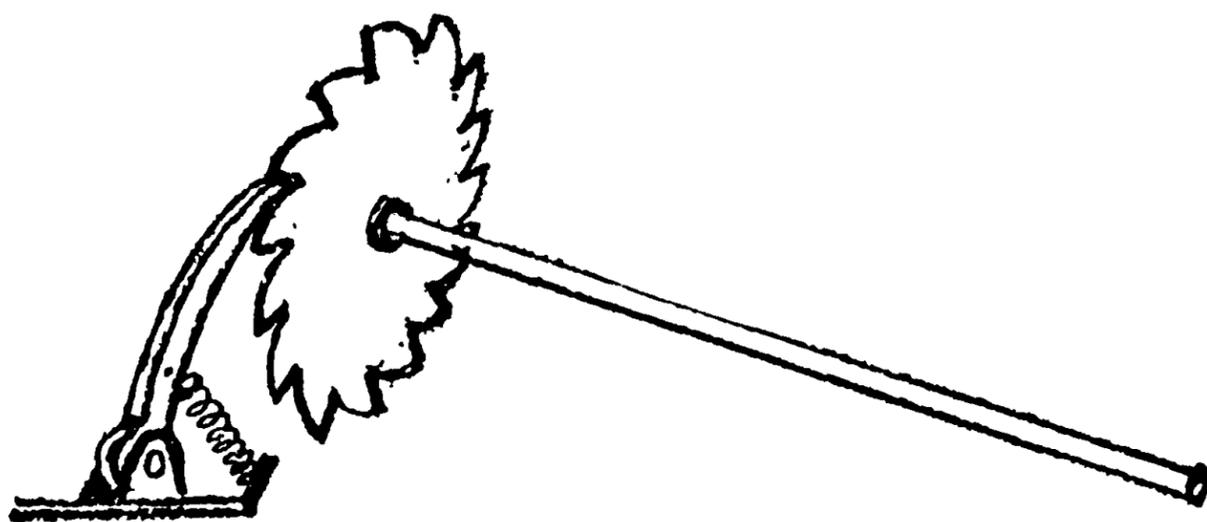


Abbildung 26

Nehmen wir also an, wir bauen uns eine Apparatur, die, soweit wir sehen, nur in eine Richtung funktionieren sollte, etwa ein Rad mit einem Sperrhaken, genauer, ein Zahnrad, dessen Zähne auf der einen Flanke gerade und scharf, auf der anderen dagegen relativ geschwungen sind. Das Rad soll auf eine Achse montiert sein, und außerdem soll unsere Apparatur einen kleinen beweglich gelagerten Sperrhaken besitzen, der von einer Feder nach unten gezogen wird (Abb. 26).

Offensichtlich kann sich das Rad nur in eine Richtung drehen. Versuchen Sie es anders herum, preßt sich der Sperrhaken gegen die scharfe Zahnflanke und nichts geht mehr, wohingegen der Haken, wenn Sie das Rad in die andere Richtung drehen, mühelos über die Zähne gleitet, schnapp, schnapp, schnapp. (Jeder von Ihnen kennt ähnliche Mechanismen. Z. B. werden sie in Uhrwerken verwendet; auch die Aufziehfeder in

Ihrer Armbanduhr arbeitet so ähnlich.) Wir haben es also mit einer Apparatur zu tun, die sich ausschließlich in eine Richtung drehen kann.

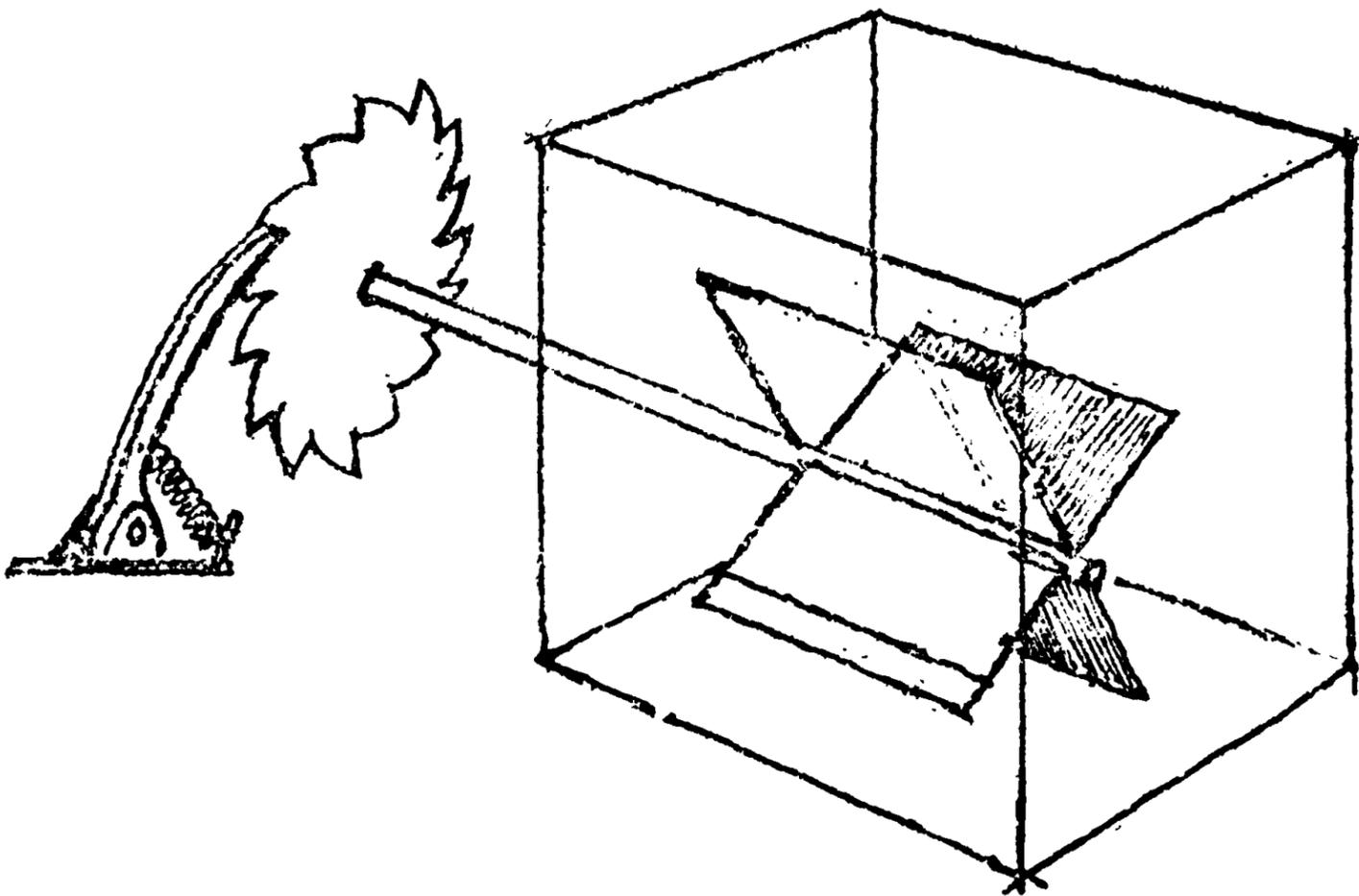


Abbildung 27

Nun ist man auf die Idee verfallen, dieses Rad, das sich nur in eine Richtung drehen kann, für eine äußerst nützliche und interessante Sache zu verwenden. Wie Sie wissen, befinden sich die Moleküle in einer ständigen unregelmäßigen Bewegung; folglich würde ein hochempfindliches Instrument unter dem Ansturm des unregelmäßigen Bombardements der Luftmoleküle in der Nachbarschaft fortwährend leicht gerüttelt. Das ist schlau ausgedacht, und so wollen wir unser Rad mit einer Achse verbinden, die vier Flügel hat wie auf Abbildung 27. Diese sollen sich in einem Gasbehälter befinden und die ganze Zeit unregelmäßig von Molekülen bombardiert werden, so daß sie einmal in die eine, einmal in die andere Richtung gestoßen werden. Werden die Flügel nun in die eine Richtung gedreht, klinkt der Sperrhaken ein und stoppt die Bewegung, werden sie in die andere Richtung gestoßen, dreht sich das Rad dauernd weiter, und so haben wir dank dem nur in eine Richtung laufenden Sperrhakenrad eine Art ständiger Bewegung.

Aber wir müssen uns die Funktionsweise unserer Apparatur noch etwas genauer anschauen. Wenn sich das Rad in eine Richtung dreht, hebt es den Sperrhaken hoch, der wieder auf den Zahn herunterschnappt und zurückprallt und das, sofern er vollkommen elastisch ist, immer so fort, so daß sich das Rad, wenn der Haken zufällig wieder hochschnellt, auch in die andere Richtung drehen kann. Die Geschichte funktioniert also nicht, es sei denn, der Haken würde, wenn er herunterschnappt, wie angenommen, stecken- oder stehenbleiben oder abprallen und unterbrechen. Tut er das aber, kommt notwendig Reibung ins Spiel, und durch die Reibung beim Herunterfallen und Zurückprallen und Anhalten (der einzigen Art und Weise, die unsere Apparatur einbahnig macht) entsteht Wärme, so daß das Rad mit der Zeit heißläuft. Sobald es sich jedoch stärker zu erwärmen beginnt, passiert etwas anderes. Genau wie sich die Gasmoleküle um die Flügel in der Brownschen Bewegung unregelmäßig bewegen, werden die Moleküle von Rad und Haken, gleichgültig aus welchem Material sie sind, heißer und beginnen sich unregelmäßiger zu bewegen, bis das Rad schließlich so heißgelaufen ist, daß der Haken aufgrund der inneren Molekularbewegung, die ja schon das Rad in Gang gesetzt hat, regelrecht flattert. Da er bei diesem Flattern jedoch ebenso oft über wie auf dem Rad ist, kann sich der Zahn in beide Richtungen drehen, und aus ist es mit unserer Einbahn-Erfindung. Mehr noch, sie kann sogar rückwärts laufen! Ist das Rad heiß und der Flügelteil kalt, dreht sich das Rad, das eigentlich nur in eine Richtung laufen sollte, just in die entgegengesetzte, weil der Haken beim Herunterschnappen jedesmal auf eine schiefe Ebene des Zahnrads fällt und so das Rad »rückwärts« treibt. Dann schnellt er wieder hoch, schnappt erneut auf eine schiefe Ebene und so fort, und so läuft das Rad, wenn es heißer ist als die Flügel, in die falsche Richtung.

Was hat das mit der Temperatur des Gases um die Flügel zu tun? Denken wir uns diesen Teil zunächst einmal weg. Das Rad soll dadurch angetrieben werden, daß der Haken auf eine

schiefe Ebene herunterfällt. Was wird dann als nächstes passieren? Die gerade vertikale Zahnflanke wird gegen den Haken prallen und das Rad zurückprallen. Um diesen Rückstoß zu verhindern, setzen wir dem Rad einen Dämpfer auf und bringen Luftflügel an, damit wird es gebremst und kann nicht mehr frei schlingern. Jetzt wird es in eine Richtung laufen, allerdings in die falsche. Wie sich zeigt, wird ein solches Rad also, gleichgültig, wie Sie es planen, in die eine Richtung laufen, wenn eine Seite heißer ist, und in die andere, wenn die andere Seite heißer ist. Sobald aber ein Wärmeausgleich zwischen beiden Teilen stattgefunden und sich alles beruhigt hat, so daß Flügel und Rad die gleiche Temperatur haben, dreht sich die Apparatur in der Regel weder in die eine noch in die andere Richtung. Das heißt, auf der technischen Ebene laufen die Naturerscheinungen so lange in eine Richtung, wie das Gleichgewicht nicht hergestellt ist, so lange eine Seite ruhiger oder blauer als die andere ist.

Die Erhaltung der Energie könnte den Eindruck erwecken, daß uns soviel Energie zur Verfügung steht, wie wir benötigen. In der Natur geht ebensowenig Energie verloren, wie neue Energie hinzukommt. Praktisch aber entzieht sich beispielsweise die Energie in den Meeren, die thermische Bewegung all der Atome im Ozean, unserem Zugriff. Um diese Energie zu organisieren, zusammenzuballen, für unseren Gebrauch verfügbar zu machen, brauchen wir Temperaturunterschiede, andernfalls können wir sie uns nicht zunutze machen. Zwischen Energie und verfügbarer Energie besteht ein gewaltiger Unterschied. In den Meeren steckt eine enorme Energie, doch wir können nichts mit ihr anfangen.

Der Satz von der Erhaltung der Energie besagt, daß sich die in der Welt vorhandene Gesamtenergie gleichbleibt. Nur kann diese Energie in so gleichmäßig verteilten unregelmäßigen Bewegungen bestehen, daß es keine Möglichkeit gibt, von einer Seite mehr Druck zu machen als von der anderen – oder anders ausgedrückt, sie in die Hand zu bekommen.

Ich glaube, anhand eines Beispiels kann ich Ihnen die dies-

bezüglichen Schwierigkeiten in etwa verdeutlichen. Ich weiß nicht, ob Sie die Erfahrung je gemacht haben – ich habe es einmal erlebt –, wie es ist, wenn man mit einem ganzen Berg Handtücher am Strand sitzt, und plötzlich ergießt sich ein Platzregen. Man packt Hals über Kopf seine Handtücher und läuft in die Badekabine. Dort beginnt man sich abzutrocknen, obwohl das Handtuch etwas feucht ist. Immerhin ist es trockener als man selbst, man benutzt es weiter, bis es einfach zu naß ist und einen ebenso naßmacht, wie es trocknet. Sie greifen zum nächsten, doch sehr bald stellen Sie fest – o Graus –, daß alle Handtücher feucht und Sie selber immer noch nicht trocken sind. Trotz noch so vieler Handtücher können Sie einfach nicht trocken werden, da zwischen der Feuchtigkeit der Handtücher und der Feuchtigkeit Ihrer Haut in gewisser Hinsicht kein Unterschied besteht. Ich könnte nun eine neue Größe einführen, die »Mühelosigkeit, Wasser zu beseitigen«, und feststellen, daß die Handtücher dieselbe Mühelosigkeit besitzen wie Ihre Haut, so daß, wenn sie sich mit dem Handtuch abreiben, vom Handtuch ebensoviel Wasser auf Sie übertragen wird wie umgekehrt. Das bedeutet nicht, daß im Handtuch ebensoviel Wasser sein muß wie auf Ihrer Haut – ein großes Handtuch enthält mehr Wasser als ein kleines –, aber der Feuchtigkeitsgrad ist derselbe. In diesem Fall jedoch ist nichts mehr zu machen.

Nun verhält es sich mit dem Wasser wie mit der Energie insofern, als sich die Gesamtwassermenge nicht ändert. (Falls die Türe Ihrer Badekabine offen ist und Sie in die Sonne hinauslaufen können, um sich trocknen zu lassen, oder falls Sie ein trockenes Handtuch auftreiben, ist alles in Ordnung; stellen Sie sich aber einmal vor, alles ist zugesperrt und Sie kommen nicht weg von diesem feuchten Zeug und weit und breit ist nichts Trockenes zu haben.) Wenn Sie sich nun ganz ähnlich einen abgeschlossenen Teil der Welt vorstellen und lange genug warten, wird sich die Energie durch die Zufälle der Welt, genau wie das Wasser, gleichmäßig über alle Teile verteilen, bis kein Quentchen Einbahnartigkeit mehr übrig ist,

nichts mehr vom wirklichen Reiz der Welt, so wie wir sie erleben.

So gleicht sich in der Sperrhaken-Zahnrad-Flügel-Situation, die, zumal da nichts weiter einbezogen ist, ein abgeschlossenes System darstellt, nach und nach die Temperatur der beiden Seiten aus, und das Rad dreht sich weder in die eine noch in die andere Richtung. Dasselbe gilt für jedes System, das man lange genug sich selber überläßt: zu guter Letzt ist die darin enthaltene Energie so gründlich durchgemischt, daß keine mehr für irgendeine Leistung zur Verfügung steht.

Übrigens steht Feuchtigkeit oder die »Mühelosigkeit, Wasser zu beseitigen« für Temperatur, und obwohl ich von einem Gleichgewicht spreche, wenn zwei Körper oder Systeme die gleiche Temperatur haben, bedeutet das nicht, daß sie dieselbe Energie besitzen. Es bedeutet lediglich, daß es genauso einfach ist, vom einen wie vom anderen Energie abzuzapfen. Temperatur ist also so etwas ähnliches wie »Mühelosigkeit, Energie abzuzapfen«. Setzen Sie die beiden nebeneinander, so tut sich, soweit Sie sehen, nichts. Zwar tauschen sie gleichmäßig Energie aus, aber nichts kommt dabei heraus. Wenn die Dinge alle die gleiche Temperatur haben, kommen wir nicht mehr an die Energie heran. Das Prinzip der Unumkehrbarkeit besagt also, daß Dinge von unterschiedlicher Temperatur, die lange genug sich selber überlassen sind, einander mit der Zeit mehr und mehr in der Temperatur angleichen, wodurch die nutzbare Energie ständig abnimmt.

Das ist eine andere Bezeichnung für den sogenannten Entropiesatz, der besagt, daß die Entropie ständig zunimmt. Aber lassen Sie sich nicht von Wörtern ins Bockshorn jagen; anders herum ausgedrückt heißt das, daß die nutzbare Energie ständig abnimmt. Und das ist eine Eigenschaft der Welt in dem Sinn, daß sie aus dem Chaos der unregelmäßigen Molekularbewegung erwächst. Dinge von unterschiedlicher Temperatur neigen, sich selbst überlassen, dazu, sich einander in der Temperatur anzugleichen. Wenn Sie zwei Objekte von derselben Temperatur haben, etwa einen Topf Wasser auf ei-

nem ganz gewöhnlichen Ofen, in dem kein Feuer brennt, so wird das Wasser nicht gefrieren und der Ofen heiß werden. Haben sie dagegen einen heißen Ofen und Eis, so geht es andersherum. So führt die Einbahnartigkeit stets zum Verlust verfügbarer Energie.

Das war's, was ich zum Thema sagen wollte. Abschließend noch einige Bemerkungen zu bestimmten Eigenarten. Die Unumkehrbarkeit liefert ein Beispiel dafür, daß eine augenscheinliche Wirkung keineswegs eine augenscheinliche Folge von Gesetzen zu sein braucht, sondern, im Gegenteil, recht weit von solch grundlegenden Gesetzen entfernt sein kann und sich erst aufgrund einer Menge Analysen auf sie zurückführen läßt. Die Auswirkung ist in der Ökonomie der Welt, im wirklichen Verhalten der Welt in allen augenscheinlichen Dingen von größter Bedeutung. So sind auch mein Gedächtnis, meine Eigenarten, der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft letztlich durch die Gesetze bedingt, und dennoch hilft mir ihre Kenntnis nicht, diese Dinge auf Anhieb, ohne langwierige Analysen, zu verstehen.

Die Relevanz der physikalischen Gesetze für unsere Erfahrung ist oft schwer zu erkennen. In vielen Fällen entziehen sie sich durch unterschiedliche Grade der Abstraktion unserer Erfahrung. So etwa die Umkehrbarkeit der Gesetze, wo wir doch aus Erfahrung die Unumkehrbarkeit der Erscheinungen kennen.

Das detaillierte Gesetz und der Hauptaspekt der wirklichen Erscheinungen nehmen sich oft recht verschiedenartig aus. Zum Beispiel ist es, wenn Sie aus der Ferne einen Eisberg beobachten und zuschauen, wie große Brocken ins Meer fallen und das Eis sich bewegt und so weiter, nicht unabdingbar, daß Sie sich seine Struktur aus lauter kleinen hexagonalen Eiskristallen vor Augen halten. Richtig verstanden, ist die Bewegung des Eisbergs natürlich eine Folge der Eigenschaft der hexagonalen Eiskristalle. Aber bis Sie das Verhalten des Eisbergs ganz und gar erfassen, dauert es eine Weile (ehrlich gesagt, hat das bis jetzt noch niemand geschafft, wie eingehend

die Kristalle mittlerweile auch studiert wurden). Nichtsdestotrotz halten wir an der Hoffnung fest, daß wir, wenn wir den Eiskristall einmal begriffen haben, schließlich auch den Eisberg begreifen werden.

Nun muß ich aber, obwohl in allen Vorlesungen von den Fundamenten der physikalischen Gesetze die Rede war, unumwunden einräumen, daß die Kenntnis sämtlicher fundamentaler Gesetze, so, wie wir sie heute kennen, keineswegs bedeutet, daß wir auf Anhieb viel darüber hinaus sagen können. Wir müssen alles mögliche in unsere Überlegungen einbeziehen, und selbst dann können wir nur partielle Aussagen machen. Allem Anschein nach ist die Natur so beschaffen, daß die wichtigsten Dinge im wirklichen Leben gleichsam komplizierte Zufallsergebnisse einer ganzen Reihe von Gesetzen sind.

Nehmen wir als Beispiel die sehr komplizierten Atomkerne, die aus mehreren Kernteilchen, Protonen und Neutronen, bestehen und verschiedene sogenannte Energieniveaus haben. Die Teilchen können in verschiedenen Schalen von unterschiedlichem Energiewert sitzen. Die Bestimmung der Lage der Energieniveaus erweist sich als kompliziertes, bis jetzt nur zum Teil gelöstes mathematisches Problem. Die genaue Position der Niveaus ist offensichtlich Folge einer unerhörten Komplexität. Deshalb ist auch nichts besonders Mysteriöses an der Tatsache, daß Stickstoff mit 14 Kernteilchen verschiedene Energiezustände, zum Beispiel von 2,4 Millionen Volt und von 7,1 und so fort hat. Bemerkenswert ist vielmehr, daß das ganze Universum, so, wie wir es heute kennen, von der Lage einer ganz bestimmten Schale in einem ganz bestimmten Kern abhängt: der 7,82 Millionen-Volt-Stufe im Kern des Kohlenstoff¹²-Atoms. Ohne sie sähe die Welt gänzlich anders aus.

Die Dinge liegen folgendermaßen. Gehen wir vom Wasserstoff aus – und wie es scheint, bestand die Welt anfangs praktisch nur aus Wasserstoff –, so kann es, wenn die Atome unter der Schwerkraft zusammengepreßt werden und sich erhitzen,

zu nuklearen Reaktionen kommen und Helium entstehen. Dieses kann sich dann zum Teil mit Wasserstoff zu wenigen neuen, etwas schwereren Elementen verbinden, die jedoch sofort wieder zu Helium zerfallen. Deshalb rätselte man lange Zeit, woher alle die anderen Elemente in der Welt kommen sollten, wenn die Sterne aus dem Wasserstoff nichts weiter als Helium und ein knappes halbes Dutzend anderer Elemente zu kochen verstanden. Indessen verfielen die Professoren Hoyle und Salpeter* auf einen (wenn auch einzigen) Ausweg: Drei Heliumatome konnten in einem Stern ein Kohlenstoffatom gebildet haben. Die Wahrscheinlichkeit war leicht auszurechnen – nämlich, wie sich zeigte, gleich null, falls sich im Kohlenstoffatom nicht ein Energieniveau bei 7,82 Millionen Volt fand, bei dem die drei zusammenstoßenden Heliumatome durchschnittlich etwas länger als sonst beieinanderbleiben konnten. In diesem Fall reichte die Zeit aus, damit noch etwas anderes passieren und andere Elemente entstehen konnten. Vorausgesetzt also, es gab im Kohlenstoff ein Niveau bei 7,82 Millionen Volt, dann wurde mit einemmal verständlich, woher all die anderen Elemente im Periodischen System stammten. So wurde das Pferd gewissermaßen vom Schwanz aufgezümt und mit einem Argument durch die Hintertür im Kohlenstoff ein Niveau bei 7,82 Millionen Volt vorhergesagt, das später durch Experimente im Labor tatsächlich nachgewiesen werden konnte. Das heißt, die Existenz aller anderen Elemente ist aufs engste mit diesem bestimmten Energieniveau im Kohlenstoff verknüpft. Die Lage dieses Niveaus scheint jedoch, wenn man die physikalischen Gesetze kennt, einem äußerst komplizierten Zufall zuzuschreiben zu sein, an dem 12 komplizierte Teilchen, die miteinander wechselwirken, beteiligt sind – ein Beispiel, das aufs anschaulichste illustriert, daß das Verstehen der physikalischen Gesetze nicht notwendig oder direkt dazu führen muß, daß man auch die im Leben wichtigen Dinge besser

* Fred Hoyle, britischer Astronom, Cambridge; Edwin Salpeter, amerikanischer Physiker, Cornell University.

versteht. Die menschlichen Erfahrungen entfernen sich oft recht weit von den fundamentalen Gesetzen.

Wenn wir von der Welt sprechen, haben wir irgendwo eine hierarchische Ordnung der Ideen im Hinterkopf. Nun will ich mich hier nicht in Einzelheiten verrennen und einen bestimmten Stufenaufbau der Welt propagieren, sondern anhand einer Reihe von Ideen andeuten, was ich meine.

Zum Beispiel haben wir am einen Ende unserer hierarchischen Ordnung die fundamentalen Gesetze der Physik. Davon ausgehend, erfinden wir Begriffe für naheliegende Vorstellungen, die unserer Meinung nach ihre letzte Erklärung in eben diesen fundamentalen Gesetzen finden. Zum Beispiel »Wärme« als Umschreibung für eine Menge umherzappelnder Atome. Wenn wir in der Unterhaltung auf etwas Warmes zu sprechen kommen, vergessen wir jedoch manchmal, daß wir unter Wärme eine ungeordnete Bewegung verstehen, genau wie wir, wenn wir über Gletscher reden, nicht immer an die hexagonalen Eiskristalle oder die ursprünglich beteiligten Schneeflocken denken. Ein ähnliches Beispiel ist der Salzkristall, ein Begriff, den wir weniger mit seinen fundamentalen Bestandteilen, nämlich einer Reihe von Protonen, Neutronen und Elektronen, als vielmehr bereits mit einem ganzen Satz fundamentaler Wechselwirkungen in Verbindung bringen. Ganz ähnlich verhält es sich mit dem Begriff des Druckes.

Steigen wir nun eine Stufe höher hinauf, kommen wir zu den mit Zahlen beschreibbaren Eigenschaften der Stoffe wie dem »Brechungsindex« des Lichts beim Übergang vom Vakuum in ein Medium oder zur »Oberflächenspannung« des Wassers, das die Tendenz hat, sich zusammenzuziehen. Ich darf Sie darauf aufmerksam machen, daß wir bereits jetzt auf verschiedene Gesetze zurückgreifen müssen, um den wahren Grund, die Anziehungskraft der Atome und so weiter, herauszufinden. Nichtsdestotrotz reden wir getrost von »Oberflächenspannung«, ohne uns immer, wenn wir auf das Phänomen zu sprechen kommen, gleich den inneren Mechanismus vor Augen zu halten.

Auf der nächsten Stufe der Hierarchie gelangen wir vom Wasser zu den Wellen. Hierher gehören Begriffe wie »Sturm«, der eine Unzahl von Phänomenen umfaßt, oder »Sonnenflecken« oder die als »Sterne« bezeichnete Ansammlung von Dingen. Und nicht immer lohnt es sich, die ganze Kette bis zu den Atomen zurückzudenken. Es geht auch gar nicht, müßten wir doch, je höher wir hinaufkommen, um so mehr Schritte zurückgehen, die samt und sonders irgendwo ein bißchen wackeln, da wir sie noch nicht alle erschöpfend durchdacht haben.

Steigen wir in dieser Hierarchie des zunehmend Komplexen immer weiter hinauf, dann landen wir schließlich bei Begriffen wie Muskelkrämpfen oder Nervenimpulsen, ungeheuer komplizierten Dingen in der physischen Welt mit einer hochentwickelten Organisation der Materie. Dann kommen Dinge wie »Frosch«.

Steigen wir nochmals höher hinauf, gelangen wir zu Wörtern und Begriffen wie »Mensch« und »Geschichte« oder »politische Zweckmäßigkeit« und so weiter, deren wir uns bedienen, um die Welt auf einer noch höheren Ebene zu verstehen.

Und schließlich stoßen wir auf unserem Weg auf Begriffe wie das Böse, Schönheit und Hoffnung . . .

Welches Ende ist nun näher bei Gott, wenn ich mich einer religiösen Metapher bedienen darf? Schönheit und Hoffnung oder die fundamentalen Gesetze? Die richtige Antwort muß meines Erachtens natürlich lauten, daß wir die ganze Struktur mit sämtlichen verbindenden Teilen betrachten müssen; daß alle Wissenschaften und nicht nur sie, sondern intellektuelle Anstrengungen aller Art, danach trachten müssen, die Verbindungen zwischen den Hierarchien oder Ebenen herauszufinden: Schönheit mit Geschichte zu verbinden, Geschichte mit der menschlichen Psychologie, die Psychologie wieder mit der Arbeitsweise des Gehirns, das Gehirn mit den Nervenimpulsen, die Nervenimpulse mit der Chemie und so weiter und so fort, von oben nach unten und umgekehrt. Bis jetzt sind wir außerstande – und es wäre witzlos, etwas anderes behaupten zu wollen –, vom einen Ende zum anderen eine durchgehende

Linie zu ziehen. Aber wir haben diese relative Hierarchie auch erst seit kurzem in den Blick bekommen.

Ich für meinen Teil glaube nicht, daß eines der Enden näher bei Gott ist. Egal von welchem Ende aus, allein von einem Ende des Piers loszurennen in der Hoffnung, weiter draußen in dieser Richtung den Stein der Weisen zu finden, ist ein Irrtum. Es ist ebenso irrig, sich nur mit dem Bösen, der Schönheit und der Hoffnung abzugeben, wie sich auf die fundamentalen Gesetze zu beschränken in der Hoffnung, die Welt allein von einer Seite her tiefer begreifen zu lernen. Es ist kurzsichtig von den Spezialisten am einen wie am anderen Ende, einander zu verachten (was sie im übrigen bloß nach Meinung der anderen tun). Die große Masse derer, die sich zwischen den Lagern mühen, einen Schritt mit dem anderen zu verbinden, die an den Enden und in der Mitte ansetzen, um solcherart dieses gewaltige Geflecht ineinander verwobener Hierarchien durchleuchten zu helfen, tragen unermüdlich zum besseren Verständnis der Welt bei.

6. Wahrscheinlichkeit und Unbestimmtheit – Natur in quantenmechanischer Sicht

Am Anfang der Geschichte der experimentellen Beobachtung und aller anderen wissenschaftlichen Beobachtungen stand die auf die einfache Erfahrung mit den Dingen des Alltags gegründete Intuition. Sie war es, die brauchbare Erklärungen für die Erscheinungen lieferte. In dem Maße aber, in dem wir die Beschreibung unserer Wahrnehmungen auszuweiten und logischer zu durchdringen versuchten, indem wir immer mehr Phänomene mit einbezogen, wurden aus den schlichten Erklärungen sogenannte Gesetze. Diese Gesetze aber besitzen eine sonderbare Eigenschaft: Sie scheinen vielfach unsinniger zu werden und sich augenscheinlich vom Einleuchtenden zu entfernen. Nehmen wir ein Beispiel: Der Relativitätstheorie zufolge ist Ihr Eindruck, daß zwei Dinge zur gleichen Zeit passieren, eben Ihr Eindruck und damit basta; ein anderer könnte zu dem Schluß kommen, daß eins der beiden Ereignisse vor dem anderen eintrat und die Gleichzeitigkeit deshalb nichts weiter als ein rein subjektiver Eindruck ist.

Im Grunde aber braucht uns das nicht zu überraschen. Unsere Alltagserfahrungen beziehen sich auf Dinge, bei denen eine große Anzahl Teilchen oder außerordentlich langsame Bewegungen oder irgendwelche anderen besonderen Umstände im Spiel sind, und stellen nur einen kleinen Ausschnitt dar. Der direkten Erfahrung erschließt sich nur ein Bruchteil der natürlichen Erscheinungen. Einzig durch verfeinerte Messungen und sorgfältige Experimente können wir unseren Gesichtskreis erweitern. Dann aber bekommen wir Unerwartetes zu sehen: Dinge, die weit von dem entfernt sind, was wir

vermutet hätten – ganz anders als alles, was wir uns hätten träumen lassen. Unsere Vorstellungskraft wird aufs äußerste gefordert, nicht wie in der Literatur, die uns Dinge vorstellen will, die nicht wirklich da sind, sondern einfach in dem Sinn, daß wir die Dinge, die *da sind*, begreifen sollen. Und diese Situation soll diesmal unser Thema sein.

Beginnen wir mit der Geschichte des Lichts. Zunächst nahm man an, es verhalte sich ähnlich wie ein Schauer von Teilchen, von Korpuskeln, etwa wie Regen oder wie Kugeln, die aus einem Gewehr abgefeuert werden. Weitere Forschungen ergaben, daß diese Annahme nicht zutraf, daß sich das Licht vielmehr wie Wellen verhielt, beispielsweise wie Wasserwellen. Die Forschung des 20. Jahrhunderts wiederum gewann den Eindruck, daß sich Licht in vielerlei Hinsicht doch eher wie Teilchen verhielte. Ja, im Photoeffekt konnte man diese Teilchen, die Photonen, wie sie heute genannt werden, sogar zählen. Auch das Verhalten der Elektronen glich, als man sie entdeckte, exakt dem von Teilchen oder Kugeln. Weitere Forschungen jedoch, zum Beispiel die Experimente über die Beugung von Elektronen, zeigten, daß sie sich wie Wellen verhielten. Was Wunder, daß mit der Zeit die Verwirrung wuchs: Hatte man es nun mit Wellen oder mit Teilchen, mit Teilchen oder mit Wellen zu tun? Für die eine Annahme sprach soviel wie für die andere.

Die Entdeckung der korrekten Gleichungen für die Quantenmechanik 1925 oder 1926 bereitete der wachsenden Verwirrung ein Ende. Heute kennen wir das Verhalten von Elektronen und Licht, wissen aber nach wie vor nicht recht, wie wir es nun bezeichnen sollen. Sagen wir, sie verhalten sich wie Teilchen, erwecken wir einen falschen Eindruck; ebenso, wenn wir ihr Verhalten mit dem von Wellen vergleichen. Sie verhalten sich auf ihre eigene unnachahmliche Weise, die wir mit einem Terminus technicus am besten als quantenmechanische Weise bezeichnen könnten. Und diese läßt sich mit nichts vergleichen, was Sie je gesehen haben. Die Erfahrung, die Sie bis jetzt mit den Dingen dieser Welt gemacht haben, ist

unvollständig. In einem winzigen Maßstab verhalten sich die Dinge einfach anders. Ein Atom verhält sich nicht wie ein an einer Feder aufgehängtes hin- und herpendelndes Gewicht oder wie eine Miniaturausgabe vom Sonnensystem mit kleinen, auf festen Bahnen umlaufenden Planeten. Ebenso wenig scheint es etwas wie eine Wolke oder eine Art Nebel zu sein, der den Kern einhüllt. Sein Verhalten gleicht nichts, was sie bis jetzt gesehen haben.

Immerhin können wir wenigstens eine Vereinfachung vornehmen: Elektronen verhalten sich in gewisser Hinsicht genauso wie Photonen; sie sind beide verrückt, aber beide in exakt derselben Weise.

Ich werde etwas beschreiben, was sich von allem, was Sie bis jetzt wissen, unterscheidet. Sie werden mithin Ihre ganze Vorstellungskraft aufbieten müssen, um sich einen Begriff von diesem ungewöhnlichen Verhalten zu machen. Insofern steht Ihnen jetzt die schwierigste Vorlesung der ganzen Reihe bevor, ein abstrakter Vortrag, der wenig an die normale Erfahrung anknüpfen kann. Aber das läßt sich nicht vermeiden. Eine Vorlesungsreihe über das Wesen physikalischer Gesetze ohne eine Beschreibung des Verhaltens der Teilchen im kleinen Maßstab wäre unvollständig. Es ist charakteristisch für alle Teilchen der Natur und mithin ein universales Merkmal, deshalb kann ich Ihnen, die Sie sich ja über das Wesen physikalischer Gesetze informieren wollen, diesen besonderen Aspekt beim besten Willen nicht ersparen.

Einfach wird es bestimmt nicht werden. Aber die Schwierigkeiten sind in Wirklichkeit eher psychologischer Natur, da Sie sich selber ständig mit der Frage quälen: »Wie kann das nur so sein?« Der Wunsch, die Sache in Begriffen von etwas Vertrautem zu sehen, wird Sie ebenso unkontrolliert wie vergeblich befallen. Ich *werde* die Dinge *nicht* in Begriffen einer Analogie mit etwas Vertrautem beschreiben; ich werde sie einfach beschreiben. Früher einmal konnte man in den Zeitungen lesen, es gebe nur zwölf Menschen, die die Relativitätstheorie verstünden. Das glaube ich nicht. Wohl mag eine

Zeitlang nur ein Mensch sie verstanden haben, weil er als einziger überhaupt auf den Gedanken verfallen war. Nachdem er aber seine Theorie zu Papier gebracht und veröffentlicht hatte, waren es gewiß mehr als zwölf. Andererseits kann ich mit Sicherheit behaupten, daß niemand die Quantenmechanik versteht. Also nehmen Sie die Vorlesung nicht allzu ernst; bilden Sie sich nicht ein, Sie müßten das, was ich Ihnen beschreibe, in Begriffen irgendeines Modells verstehen; lehnen Sie sich entspannt zurück und genießen Sie. Denn ich beschreibe Ihnen jetzt das Verhalten der Natur, und wenn Sie es einfach als möglich akzeptieren, werden Sie von ihr ganz entzückt und hingerissen sein. Also fragen Sie sich nicht dauernd, wenn Sie es fertigbringen: »Aber wie ist das denn möglich?« Das führt in eine Sackgasse, aus der noch keiner wieder herausgekommen ist. Niemand weiß, wieso es so sein kann, wie es ist.

Lassen Sie mich also das Verhalten von Elektronen oder Photonen in der für sie typischen quantenmechanischen Weise beschreiben. Und zwar mit Hilfe von Analogien und Gegensätzen. Mit Analogien allein kämen wir nicht weiter; manches kann ich Ihnen nur erklären, indem ich es als Gegensatz von etwas Ihnen Vertrautem abhebe. Anhand dieser beiden Gesichtspunkte werde ich erst das Verhalten von Teilchen unter Verwendung von Kugeln und anschließend das Verhalten von Wellen unter Verwendung von Wasserwellen untersuchen. Zu diesem Zweck werde ich ein ganz bestimmtes Experiment erfinden und Ihnen zunächst sagen, welcher Art die Situation in diesem Experiment für Teilchen wäre, darauf, was zu erwarten wäre, wenn es Wellen wären, und schließlich, was bei Elektronen und Photonen wirklich geschieht. Dieses eine Experiment genügt, denn ich habe es mir so ausgedacht, daß es das ganze Geheimnis der Quantenmechanik enthält und Sie damit auf sämtliche Paradoxe, Geheimnisse und Absonderlichkeiten der Natur hundertprozentig vorbereitet sind. Bei jeder x-beliebigen anderen Situation in der Quantenmechanik genügt dann der Hinweis:« »Sie erinnern sich an das Experi-

ment mit den zwei Löchern? Das hier ist im Prinzip auch nichts anderes.« Ich werde Ihnen nun das Experiment mit den zwei Löchern, das das ganze Geheimnis birgt, beschreiben. Ich lasse nichts aus; ich enthülle die Natur in ihrer elegantesten und schwierigsten Form.

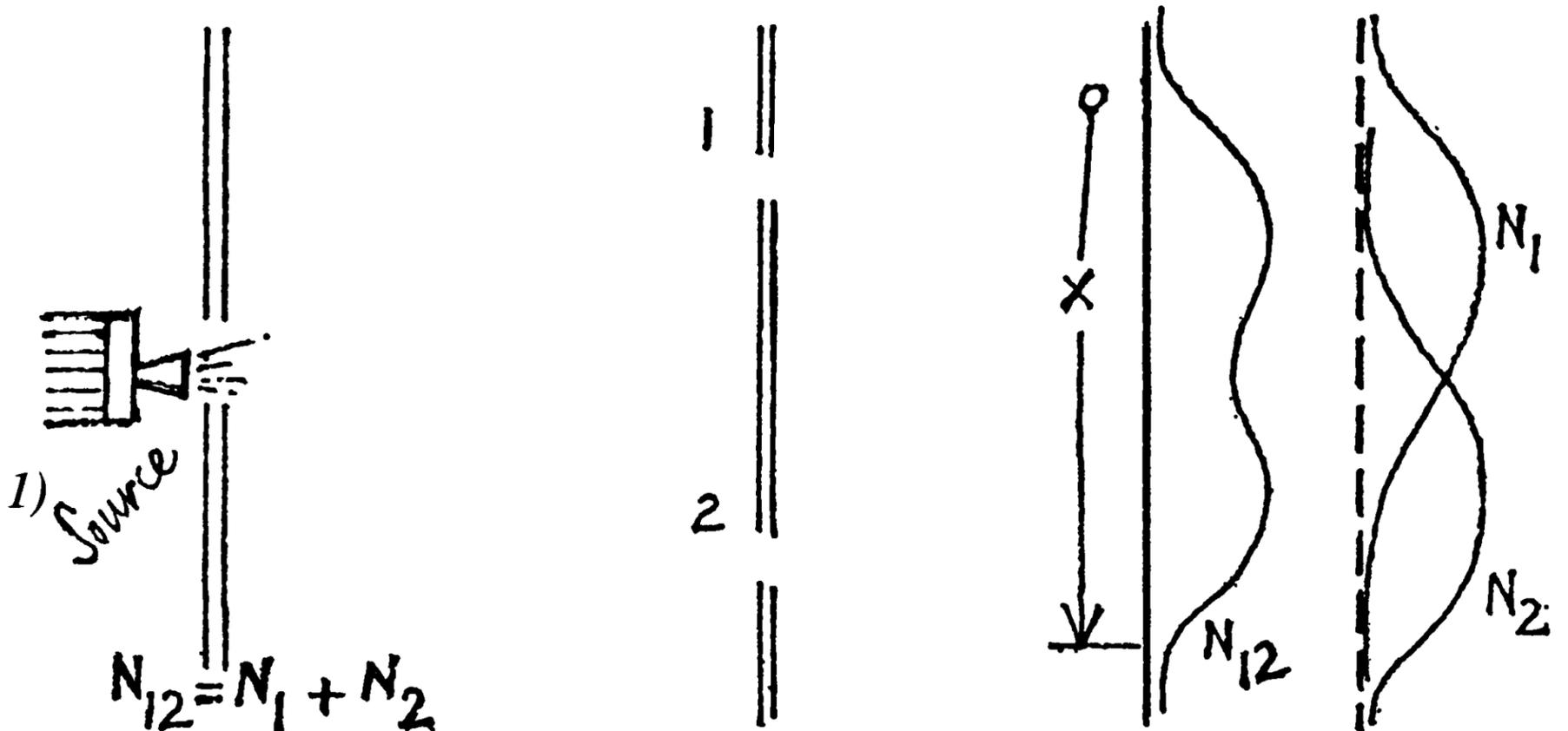


Abbildung 28 1) Source = Quelle

Beginnen wir mit Kugeln (Abb. 28). Nehmen wir an, wir haben eine Kugelquelle, ein Maschinengewehr, und davor eine Panzerplatte mit einem Loch, durch das die Kugeln gehen. Ein ganzes Stück dahinter soll eine zweite Platte mit zwei Löchern stehen – und damit sind wir schon bei den berühmten zwei Löchern, von denen soviel die Rede sein wird, daß ich sie Loch Nr. 1 und Loch Nr. 2 nennen will. Stellen Sie sich runde dreidimensionale Löcher vor – die Zeichnung ist nur ein Querschnitt. Wiederum ein gutes Stück dahinter befindet sich eine weitere Platte als eine Art Kugelfang, auf der wir an verschiedenen Stellen einen Detektor anbringen können. Dieser besteht im Fall der Kugeln aus einem mit Sand gefüllten Gefäß, in dem die Kugeln aufgefangen werden, damit wir sie zählen können. Bei dem Experiment geht es nun darum festzustellen, wie viele Kugeln in verschiedenen Positionen des Detektors aufgefangen werden. Ich werde also auch den Abstand $\langle x \rangle$ unseres Sandgefäßes zu irgendeinem Bezugspunkt

messen und beschreiben, was geschieht, wenn wir ›x‹ verändern, sprich unser Detektorgefäß auf- und abschieben. Zuvor muß ich noch einige Einschränkungen machen und unseren Vergleich mit den Kugeln in drei Punkten idealisieren. Erstens soll das Maschinengewehr recht wacklig und zittrig sein, so daß die Kugeln in verschiedene Richtungen davonfliegen, nicht nur in gerader Linie und somit auch von den Lochrändern der Panzerplatte abprallen können. Zweitens sollen die Kugeln, obwohl das nicht sehr wichtig ist, die gleiche Geschwindigkeit oder Energie besitzen. Und drittens – das ist der wichtigste Unterschied zu echten Kugeln – sollen sie absolut unzerstörbar sein, so daß wir im Sand nicht irgendwelche Bleitrümmern von explodierten Geschossen, sondern ganze Kugeln finden. Stellen Sie sich also unzerstörbare oder harte Kugeln und weiche Panzerplatten vor.

Als erstes fällt uns bei unseren Kugeln auf, daß sie stückweise ankommen. Die Energie kommt in Packen, mit einem Knall. Zählt man die Kugeln, so findet man ein, zwei, drei, vier Stück und so fort. Sie sollen in unserem Fall alle gleich groß sein und entweder ganz im Sand landen oder überhaupt nicht. Mehr noch, wenn ich zwei Gefäße aufstelle, werden sich darin nie gleichzeitig zwei Kugeln fangen, vorausgesetzt, daß das Gewehr nicht zu schnell feuert und der zeitliche Abstand zwischen den Schüssen genügend groß ist, damit ich die Kugeln sehen kann. Verlangsamen wir also die Schußfolge, damit das Gewehr ganz langsam feuert, dann schauen wir schnell in unseren zwei Sandgefäßen nach, und wir werden in den Gefäßen nie zwei Kugeln gleichzeitig finden, weil eine Kugel ein einzelnes, identifizierbares Stück ist.

Mein Ziel nun ist herauszufinden, wie viele Kugeln im Mittel in einem bestimmten Zeitraum anlangen. Sagen wir, wir warten eine Stunde und zählen dann die Kugeln im Sand und errechnen den Durchschnitt. Wir gehen von der Anzahl der pro Stunde eintreffenden Kugeln aus – von der Eingangswahrscheinlichkeit, wie wir auch sagen könnten, da sie die Chancen beziffert, daß eine Kugel durch ein Loch im bereitgestellten

Auffanggefäß anlangt. Natürlich wird die Zahl der eintreffenden Kugeln variieren, wenn $\langle x \rangle$ variiert. Im Diagramm ist horizontal die Anzahl der Kugeln aufgetragen, die eintreffen, wenn ich das Gefäß in jeder Position eine Stunde belasse. Die Kurve, die ich in diesem Fall erhalte, gleicht mehr oder weniger der Kurve N_{12} , weil das Gefäß, wenn es direkt hinter einem der Löcher aufgestellt ist, eine Menge Kugeln abfängt; nicht mehr so viele erhält es, wenn es leicht aus der direkten Linie gerückt wird, da die Kugeln in diesem Fall von den Rändern der Löcher abprallen müssen, bis schließlich die Kurve ganz verschwindet. Alles in allem gleicht die erhaltene Kurve der Kurve N_{12} . Die Zahl der aufgefangenen Kugeln, die wir in einer Stunde erhalten, wenn beide Löcher offen sind, nenne ich N_{12} , was nichts anderes bedeutet als die durch Loch Nr. 1 und Loch Nr. 2 eintreffende Zahl.

An dieser Stelle muß ich Sie jedoch darauf aufmerksam machen, daß diese Zahl nicht notwendig eine ganze Zahl sein muß. Sie kann vielmehr jede beliebige Größe haben, zum Beispiel zweieinhalb Kugeln pro Stunde, obwohl doch die Kugeln stückweise kommen. Zweieinhalb Kugeln pro Stunde besagt nicht mehr, als daß bei einem zehnstündigen Experiment fünfundzwanzig Kugeln einschlagen, in einer Stunde also durchschnittlich zweieinhalb. Sicher kennen Sie alle den Witz über die amerikanische Durchschnittsfamilie mit ihren zweieinhalb Kindern. Natürlich heißt das nicht, daß es in den Vereinigten Staaten eine Familie mit einem halben Kind gäbe – Kinder kommen stückweise. Dennoch kann, wenn Sie den Durchschnitt errechnen, jede beliebige Zahl herauskommen, und genauso verhält es sich mit der Zahl N_{12} . Wenn Sie die Anzahl der durchschnittlich pro Stunde im Sand einschlagenden Kugeln ausrechnen, erhalten Sie nicht notwendig eine ganze Zahl. Was wir hier messen, ist (um den Terminus technicus für den Durchschnitt zu nehmen) die Wahrscheinlichkeit der Einschläge in einem bestimmten Zeitraum.

Was schließlich die Kurve N_{12} angeht, so läßt sie sich offensichtlich als die Summe zweier Kurven deuten. Die eine, die

ich N_1 nennen will, gibt die Zahl der Kugeln an, die eintreffen, wenn Loch Nr. 2 durch ein Stückchen Panzerplatte verschlossen ist, und N_2 die Anzahl, die allein Loch Nr. 2 passiert, wenn Loch Nr. 1 verschlossen ist. Und nun entdecken wir ein sehr wichtiges Gesetz, nämlich, daß die Zahl, die eintrifft, wenn beide Löcher offen sind, genauso groß ist wie die Zahl, die durch Loch Nr. 1 kommt plus der Zahl, die durch Loch Nr. 2 kommt. Diesen Umstand, daß wir nichts weiter zu tun brauchen als zusammenzuzählen, nenne ich »keine Interferenz«.

$$N_{12} = N_1 + N_2 \text{ (keine Interferenz)}$$

Soviel zu Kugeln. Und nun fangen wir das Ganze noch mal von vorne an, diesmal mit Wasserwellen (Abb. 29).

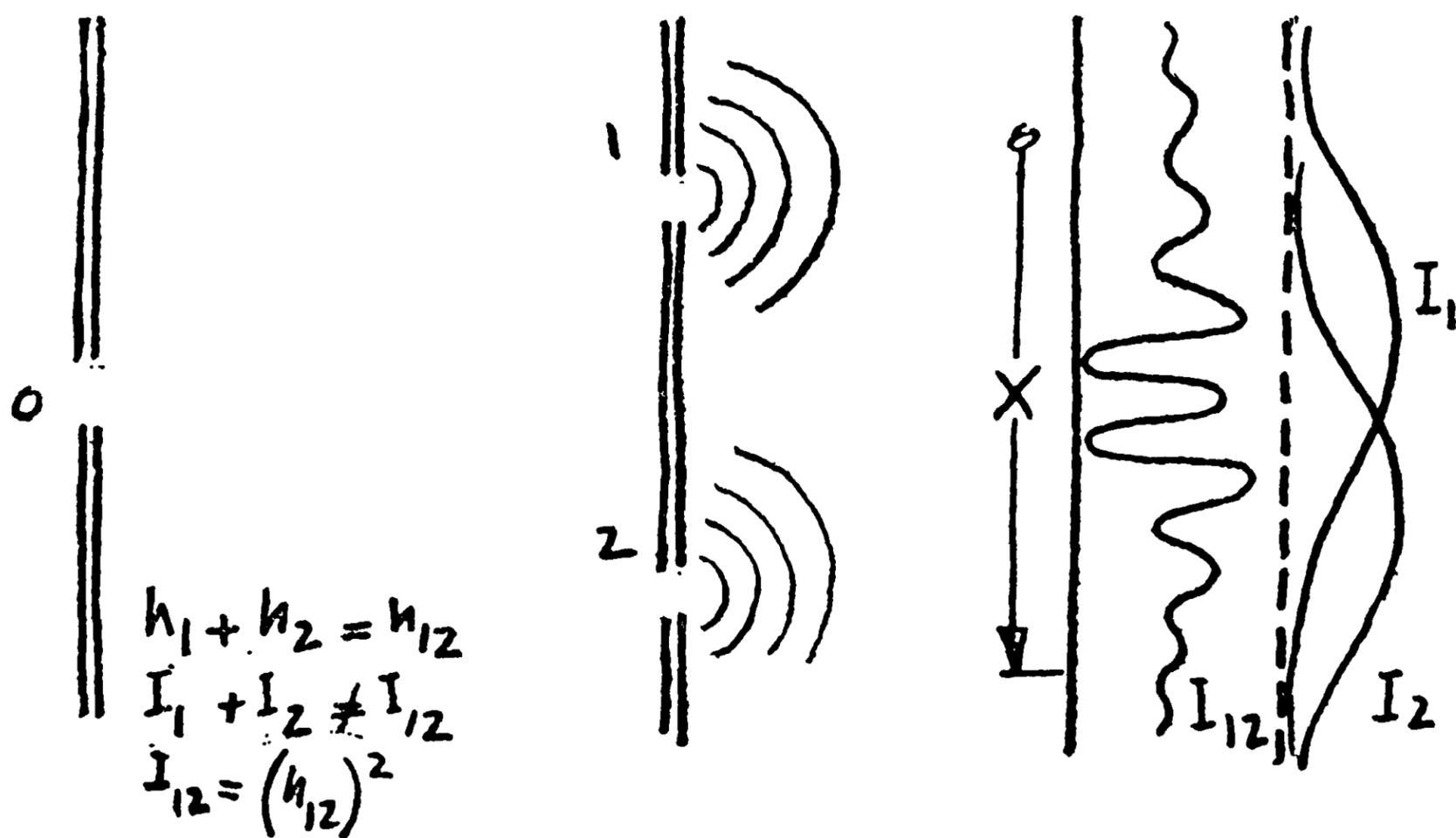


Abbildung 29

Als Quelle dient uns diesmal eine große Menge Zeug, das im Wasser auf und ab schaukelt. Die Panzerplatte wird zu einer langen Boots-kette oder zu einem Hafendamm mit einem Loch im Wasser. Vielleicht sollten wir unser Experiment aber lieber mit kleinen Kräuselwellen statt mit großen Ozeanwogen durchführen; das klingt einleuchtender. Ich stippe meinen Finger wiederholt ins Wasser, um Wellen zu erzeugen und

habe als Barriere ein kleines Stückchen Holz mit einem Loch angebracht, das die Wellen durchläßt. In einigem Abstand folgt die zweite Barriere mit zwei Löchern und schließlich ein Detektor. Und was soll der Detektor? Feststellen, wie stark das Wasser schaukelt. Zum Beispiel könnte ich einen Korken aufs Wasser setzen und messen, wie er sich auf und ab bewegt. Was ich dabei wirklich messe, ist die Bewegung des Korkens, die der von den Wellen getragenen Energie genau proportional ist. Noch etwas, wir müssen den Finger sehr regelmäßig eintauchen, damit die Wellen alle gleich weit voneinander entfernt sind. Wichtig bei Wasserwellen ist nun, daß das, was wir messen, jede Größe haben kann. Wir messen die Intensität der Wellen oder die Energie des Korkens, und wenn die Wellen sehr ruhig sind, wenn mein Finger nur leicht ins Wasser stippt, dann wird sich auch der Korken kaum bewegen. Wie viel oder wenig auch immer, die Bewegung ist proportional. Sie kann jede Größe haben, sie kommt nicht stückweise. Die Regel alles oder nichts gilt hier nicht.

Gegenstand unserer Messung ist die Intensität der Wellen oder, genauer, die von den Wellen an einem bestimmten Punkt erzeugte Energie. Was passiert nun, wenn wir diese Intensität messen, die ich $\langle I \rangle$ nennen will, um Sie daran zu erinnern, daß es eine Intensität und nicht ein Anzahl von irgendwelchen Teilchen ist? Wir erhalten die im Diagramm (Abb. 29) gezeichnete Kurve I_{12} , vorausgesetzt beide Löcher sind offen. Das ist eine interessante, kompliziert anmutende Kurve. Wenn wir den Detektor mehrfach verschieben, zeigt sich, daß sich die Intensität auf eine sonderbare Weise äußerst rasch verändert. Vielleicht kennen Sie den Grund schon. Der Grund liegt in der Wellennatur. Die Wellen, die aus dem Loch Nr. 1 kommen, bestehen aus Wellenbergen und Wellentälern; genauso diejenigen, die aus dem Loch Nr. 2 kommen. Befinden wir uns nun an einem Punkt exakt zwischen den beiden Löchern, so daß die beiden Wellen gleichzeitig eintreffen, türmen sich die Berge aufeinander, und das Wasser wird ganz schön schaukeln. Mitten im toten Zentrum haben wir also ein

ordentliches Geschaukel. Verschiebe ich den Detektor jedoch an einen Punkt, der von Loch Nr. 2 weiter entfernt ist als von Loch Nr. 1, brauchen die Wellen von 2 etwas länger als von 1. Das bedeutet, daß wenn der Wellenberg von 1 eintrifft, der von 2 noch nicht angelangt ist, tatsächlich kommt von 2 ein Wellental heran, so daß das Wasser unter dem Einfluß der Wellen aus den beiden Löchern sich einerseits nach oben und andererseits nach unten zu bewegen versucht, was zur Folge hat, daß es sich überhaupt nicht oder praktisch nicht bewegt. Somit haben wir an dieser Stelle einen tiefen Punkt. Schieben wir den Detektor dann noch ein Stückchen in dieselbe Richtung, und zwar gerade soviel, daß die Wellenberge aus beiden Löchern wieder zusammenstoßen können, auch wenn der eine um eine ganze Welle später dran ist, erhalten wir wieder einen großen Wert, dann einen kleinen, dann einen großen, einen kleinen . . . je nach der »Interferenz« der Wellenberge und -täler. Im übrigen benutzen wir Wissenschaftler auch dieses Wort auf eigentümliche Weise. Beispielsweise sprechen wir von einer »konstruktiven Interferenz«, wenn durch die Überlagerung zweier Wellen eine stärkere Intensität erzeugt wird. Wichtig ist nun, daß I_{12} nicht gleich I_1 plus I_2 ist, sondern konstruktive und destruktive Interferenzen auftreten. Um herauszufinden, wie groß I_1 ist, schließen wir das Loch Nr. 2, und umgekehrt das Loch Nr. 1, um herauszufinden, wie groß I_2 ist. Auf diese Weise erhalten wir die Intensität der Wellen aus jeweils nur einem Loch ohne Interferenz (siehe die Kurven auf Abb. 29). Wie Sie sehen, ist I_1 gleich N_1 und I_2 gleich N_2 , I_{12} aber nicht gleich N_{12} .

In der Tat ist die mathematische Formulierung der Kurve I_{12} recht interessant. Sie besagt, daß die Höhe des Wassers, die wir h_{12} nennen wollen, wenn beide Löcher offen sind, der Höhe des Wassers entspricht, die wir aus dem geöffneten Loch Nr. 1 plus der, die wir aus dem geöffneten Loch Nr. 2 erhalten würden. Insofern löscht natürlich auch ein Wellental beziehungsweise die negative Höhe von Nr. 2 die Höhe von Nr. 1 aus. Doch die Höhe des Wassers stellt nur eine Seite dar.

Die Intensität nämlich ist in keinem Fall, beispielsweise wenn beide Löcher geöffnet sind, gleich der Höhe, sondern statt dessen proportional zum Quadrat der Höhe. Und gerade dem Umstand, daß wir es mit Quadraten zu tun haben, verdanken wir die äußerst interessanten Kurven.

$$h_{12} = h_1 + h_2$$

aber

$$I_{12} \neq I_1 + I_2 \text{ (Interferenz)}$$

$$I_{12} = (h_{12})^2,$$

$$I_1 = (h_1)^2$$

$$I_2 = (h_2)^2$$

Soviel zum Wasser. Und wieder fangen wir von vorne an, diesmal mit Elektronen (Abb. 30).

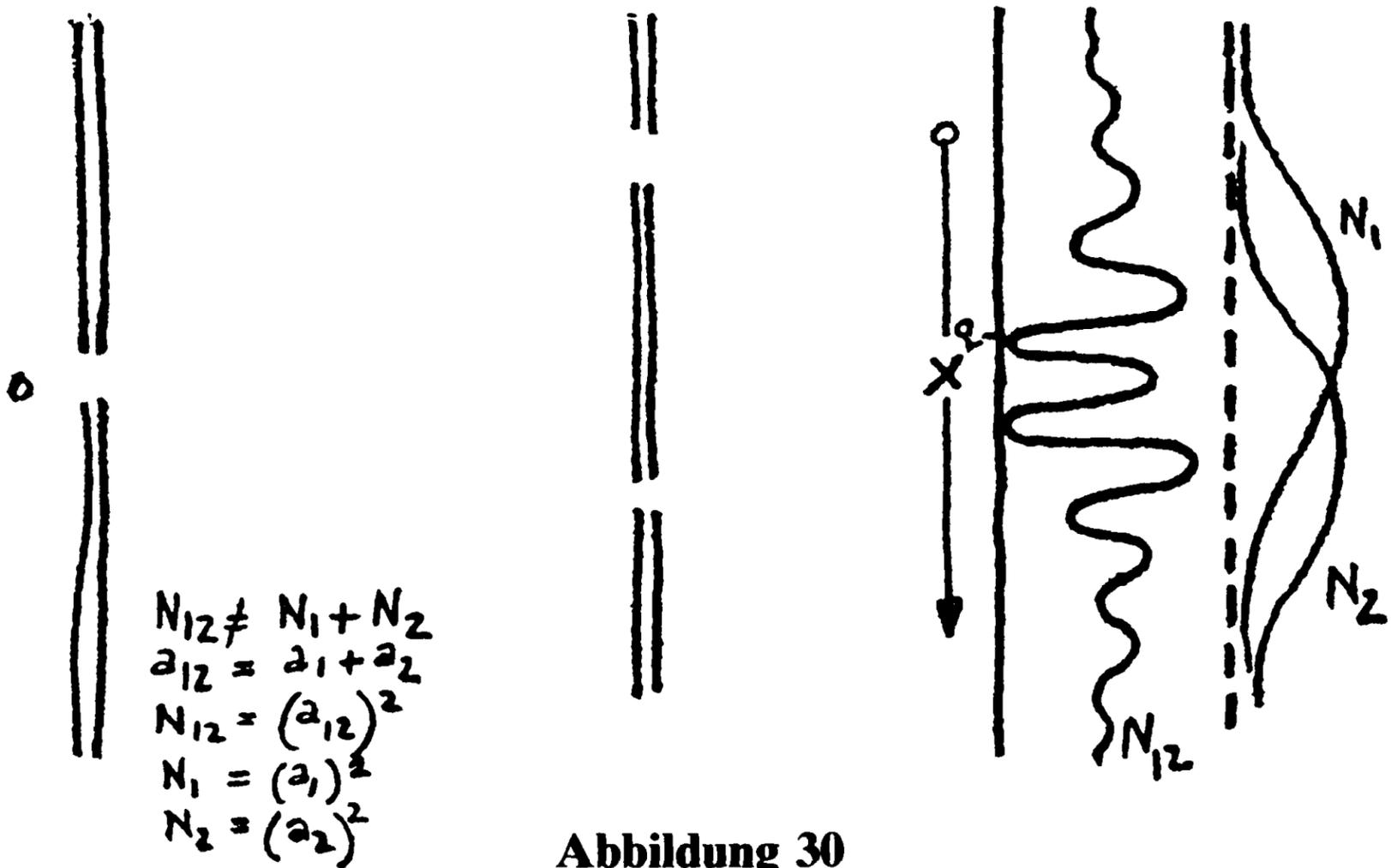


Abbildung 30

Die Quelle ist ein Glühfaden; für die Barrieren nehmen wir Wolframplatten mit den üblichen Löchern, und als Detektor dient uns irgendein elektrisches System, das allerdings so ansprechbar sein muß, daß es die Ladung eines eintreffenden Elektrons registriert, egal, welche Energie die Quelle besitzt. Genausogut könnten wir, wenn Ihnen das lieber wäre, Photo-

nen nehmen, statt der Wolframplatten schwarzes Papier (obwohl sich dieses nicht so gut eignet, da die Fasern keine scharfen Löcher abgeben, weshalb wir uns nach etwas Besserem umsehen müßten) und als Detektor einen Photonenvervielfacher, der das Eintreffen der einzelnen Photonen anzeigt, Was würde in diesen beiden Fällen geschehen? Im übrigen kann ich mich auf den Fall der Elektronen beschränken, da der der Photonen genau gleich gelagert ist.

Als erstes hören wir unseren elektrischen Detektor mit seinem angeschlossenen Verstärker klicken und wieder klicken, woraus wir schließen, daß die Elektronen stückweise eintreffen, zumal das Klickgeräusch stets dasselbe bleibt. Stellen wir die Quelle schwächer ein, verlängert sich der Abstand zwischen den einzelnen Geräuschen, davon abgesehen aber bleiben sie sich gleich. Drehen wir die Quelle auf, folgen sie einander so schnell, daß der Verstärker nicht mehr mitkommt und wir wieder herumdrehen müssen, damit unser Detektor die Klicks auch registrieren kann. Als nächstes bringen Sie einen weiteren Detektor an anderer Stelle an, werden aber feststellen, daß nie beide gleichzeitig klicken, zumindest wenn die Quelle schwach genug und Ihre Zeitmessung präzise genug ist. Haben Sie die Intensität der Quelle so weit beschnitten, daß nur noch wenige Elektronen kommen und die zeitlichen Zwischenräume lang genug sind, werden nie beide Detektoren gleichzeitig anschlagen. Das bedeutet, daß das, was da anlangt, stückweise kommt, eine bestimmte Größe hat und zu einer bestimmten Zeit nur an einem Ort eintrifft. Demnach kommen Elektronen oder Photonen stückweise, und so können wir, wie bei den Kugeln, die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens messen. Dazu verschieben wir den Detektor und lassen ihn an den verschiedenen Stellen, sagen wir, eine Stunde lang die Anzahl der eintreffenden Elektronen messen – ebensogut könnten wir, was allerdings reichlich teuer käme, überall gleichzeitig Detektoren anbringen und die ganze Kurve simultan erstellen. Dann rechnen wir den Durchschnitt aus, und was glauben Sie, welche Zahl kommt heraus? Die-

selbe Art von N_{12} wie bei den Kugeln? Weit gefehlt. Abbildung 30 zeigt, was wir für N_{12} erhalten, das heißt, wenn beide Löcher geöffnet sind: dieselbe Kurve, die die Interferenz der Wellen ergab. Und das ist nun das Phänomenale an der Natur: Diese Kurve steht nicht etwa für die Energie einer Welle, sondern für die Wahrscheinlichkeit, daß eine dieser Stückerheiten eintrifft.

Die mathematische Formulierung bereitet keine Schwierigkeiten. Sie machen aus I einfach ein N. Allerdings müssen Sie dann auch h verändern, das heißt eine neue Größe einführen, die nicht die Höhe von irgend etwas angibt, also erfinden wir ein $\langle a \rangle$, das wir als Wahrscheinlichkeitsamplitude bezeichnen wollen, weil wir nicht wissen, was das bedeutet. In unserem Fall ist a_1 die Wahrscheinlichkeitsamplitude, daß ein Elektron von Loch Nr. 1 eintrifft, und a_2 die Wahrscheinlichkeitsamplitude, daß ein Elektron von Loch Nr. 2 anlangt. Um nun die gesamte Wahrscheinlichkeitsamplitude sämtlicher Eingänge zu erhalten, addieren wir die beiden und quadrieren die Summe; wir machen ganz einfach das, was wir bei den Wellen gemacht haben. Schließlich soll am Ende ja dieselbe Kurve herauskommen, und so können wir getrost dieselben mathematischen Schritte nachvollziehen.

Einen Punkt sollte ich jedoch noch überprüfen, und zwar was mit der Interferenz geschieht. Bis jetzt habe ich nicht gesagt, was passiert, wenn ein Loch geschlossen wird. Versuchen wir also, diese interessante Kurve zu analysieren: Nehmen wir an, die Elektronen kämen durch das eine oder das andere Loch. Wir schließen ein Loch und messen, wie viele nun durch Loch Nr. 1 kommen; auf diese Weise erhalten wir die einfache Kurve N_1 . Dann schließen wir das andere Loch und messen, wie viele durch Loch Nr. 2 kommen, und erhalten die Kurve N_2 . Doch die Addition dieser beiden Kurven ergibt keineswegs dasselbe wie $N_1 + N_2$. Vielmehr tritt Interferenz auf. Die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens wird – mathematisch eine sonderbare Formel – durch das Quadrat einer Amplitude ausgedrückt, die ihrerseits die Summe zweier Teile $N_{12} =$

$(a_1 + a_2)^2$ ist. Nun erhebt sich die Frage, wie es sein kann, daß wir, wenn wir beide Löcher öffnen, nicht die Summe aus beiden erhalten, obwohl die Elektronen beim Passieren von Loch Nr. 1 in eine Richtung und beim Passieren von Loch Nr. 2 in die andere Richtung gestreut werden. Halte ich beispielsweise den Detektor an Punkt q , wenn beide Löcher geöffnet sind, so tut sich praktisch nichts; schließe ich dagegen eins der Löcher, erwische ich eine ganze Menge und immer noch etliche, wenn ich das andere schließe. Sobald ich jedoch beide Löcher öffne, kommt nichts mehr; wenn sie die Möglichkeit haben, durch beide zu kommen, bleiben sie aus. Oder nehmen wir den Punkt in der Mitte. Er ist nachweislich höher als die Summe der beiden Kurven der einzelnen Löcher. Vielleicht glauben Sie nun, wenn Sie es nur schlau genug anstellen, kämen Sie dahinter, daß sie irgendwie durch die Löcher vor- und zurückgehen oder sonst etwas Kompliziertes machen oder eins sich halbiert und durch die beiden Löcher schlüpft oder irgend etwas dergleichen, was das Phänomen erklären könnte. Bis jetzt jedoch ist es niemandem gelungen, eine befriedigende Erklärung zu finden, weil die Mathematik letztlich so außerordentlich einfach ist, ist auch die Kurve so einfach (Abb. 30).

Zusammenfassend kann man also sagen, die Elektronen kommen stückweise wie Teilchen, die Wahrscheinlichkeit dagegen, daß sie Stück für Stück eintreffen, wird auf eine Weise bestimmt, wie man die Intensität von Wellen berechnen würde. In diesem Sinne verhalten sich Elektronen manchmal wie Teilchen und manchmal wie Wellen. Sie verhalten sich gleichzeitig auf zwei verschiedene Arten und Weisen (Abb. 31).

Mehr läßt sich dazu nicht sagen. Ich könnte Ihnen noch eine mathematische Beschreibung liefern, damit Sie die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens von Elektronen unter x -beliebigen Umständen ausrechnen könnten, und damit wären wir im Prinzip am Ende der Vorlesung angelangt – außer daß diese Arbeitsweise der Natur mit einigen Feinheiten verbunden ist,

einer Reihe von Besonderheiten, auf die ich kurz zu sprechen kommen möchte, da sie an diesem Punkt vielleicht nicht gerade jedermann in die Augen springen.

TABLE

BULLETS

COME IN LUMPS

MEASURE PROBABILITY
OF ARRIVAL

$$N_{12} = N_1 + N_2$$

NO INTERFERENCE

WATER WAVES

CAN HAVE ANY SIZE

MEASURE INTENSITY
OF WAVES

$$I_{12} \neq I_1 + I_2$$

SHOWS INTERFERENCE

ELECTRONS (PHOTONS)

COME IN LUMPS

MEASURE PROBABILITY
OF ARRIVAL

$$N_{12} \neq N_1 + N_2$$

SHOWS INTERFERENCE

TABELLE

Kugeln

kommen stückweise

gemessen wird:

Wahrscheinlichkeit des
Eintreffens

$$N_{12} = N_1 + N_2$$

keine Interferenz

Wasserwellen

können jede Größe
haben

Intensität der Wellen

$$I_{12} \neq I_1 + I_2$$

zeigt Interferenz

Elektronen
(Photonen)

kommen stückweise

Wahrscheinlichkeit
des Eintreffens

$$N_{12} \neq N_1 + N_2$$

zeigt Interferenz

Abbildung 31

Als erstes möchte ich einen Satz besprechen, der in Anbetracht des stückweisen Auftretens der Elektronen ganz vernünftig erschiene. Läge es, wenn stets ein komplettes Elektron eintrifft, nicht auf der Hand anzunehmen, daß es entweder durch Loch Nr. 1 oder durch Loch Nr. 2 kommt? Als

Stück scheint es keine anderen Möglichkeiten zu besitzen. Diesen Satz will ich zum Zwecke der Besprechung »Satz A« nennen.

Proposition .A.

*Either an electron goes through
hole N°1 or it goes through
hole N°2.*

(Satz A: Ein Elektron geht entweder durch Loch Nr. 1 oder durch Loch Nr. 2)

Nun wissen wir schon einiges über diesen Satz A. Träfe zu, daß ein Elektron entweder durch Loch Nr. 1 oder durch Loch Nr. 2 geht, müßte sich die Gesamtzahl der eintreffenden Elektronen als die Summe aus den beiden Beiträgen analysieren lassen. Die Gesamtzahl wäre gleich der Anzahl, die durch Loch 1 kommt, plus der Anzahl, die durch Loch 2 kommt. Da sich jedoch die zugehörige Kurve nicht gut als Summe zweier Teile analysieren läßt und da die Experimente, mit denen wir feststellen, wie viele Elektronen kommen, wenn entweder das eine oder das andere Loch geöffnet ist, keineswegs zu dem Ergebnis führen, daß die Gesamtsumme gleich der Summe der beiden Teile ist, müssen wir wohl oder übel zu dem Schluß gelangen, daß dieser Satz falsch ist. Wenn aber nicht stimmt, daß das Elektron entweder durch Loch Nr. 1 oder durch Loch Nr. 2 kommt, könnte es sich vielleicht vorübergehend teilen oder etwas Dergleichen. Demnach muß Satz A logischerweise falsch sein. Unseligerweise oder auch zum Glück können wir die Logik experimentell überprüfen. Wir sollen also herausfinden, ob es zutrifft, daß die Elektronen entweder durch Loch 1 oder durch Loch 2 kommen, oder ob sie vielleicht durch beide Löcher im Kreis laufen und sich zeitweilig teilen oder was weiß ich.

Alles, was wir dabei tun müssen, ist, sie belauern. Dazu brauchen wir Licht. Also stellen wir hinter den Löchern eine

sehr starke Lichtquelle auf. Licht wird von Elektronen gestreut beziehungsweise zurückgeworfen, so daß wir, wenn es stark genug ist, die Elektronen vorbeifliegen sehen können. Also beziehen wir Posten, um festzustellen, ob wir, sobald ein Elektron gezählt wird oder einen Augenblick zuvor, hinter Loch 1 oder Loch 2 einen Blitz oder auch hinter beiden gleichzeitig so etwas wie einen halben Blitz sehen beziehungsweise gesehen haben. Diesmal werden wir es herausfinden, wir sind fest entschlossen, die Augen offenzuhalten. Wir schalten das Licht ein und schauen hin, und siehe da, wir entdecken, daß wir bei jedem Klick des Detektors entweder hinter Nr. 1 oder hinter Nr. 2 einen Blitz sehen, das Elektron also hundertprozentig als Ganzes durch Loch 1 oder Loch 2 anlangt – sobald wir zuschauen. Wie paradox!

Nun wollen wir die Natur ein bißchen in die Zange nehmen. Ich zeige Ihnen gleich, wie. Wir lassen das Licht an und lauern, wie viele Elektronen hindurchkommen. Wir legen zwei Rubriken an, eine für Loch 1 und eine für Loch 2 und tragen jedes Elektron, das im Detektor landet, in die entsprechende Rubrik ein. Wie sieht nun die Rubrik für Loch Nr. 1 aus, wenn wir die Eingänge für sämtliche Detektorpositionen addieren? Was beobachtete ich hinter Loch 1? Die Kurve N_1 (Abb. 30). Diese Rubrik entspricht also dem, was wir erwarteten, als wir Loch 2 schlossen. Oder anders ausgedrückt, sie bleibt sich gleich, ob wir hinschauen oder nicht. Wenn wir Loch 2 schließen, erhalten wir dieselbe Verteilung der eintreffenden Elektronen, wie wenn wir Loch Nr. 1 beobachten. Ebenso gibt die Zahl derer, die durch Loch Nr. 2 anlangen, eine einfache Kurve N_2 . Nun *muß* aber die Gesamtzahl der angekommenen Elektronen die Gesamtzahl sein. Sie muß die Summe aus der Zahl N_1 und der Zahl N_2 sein; schließlich haben wir ja jeden Ankömmling in die Rubrik 1 oder in die Rubrik 2 eingetragen. Die Gesamtzahl der eingetroffenen Elektronen *muß also absolut* gleich der Summe dieser beiden Rubriken sein. Sie muß sich wie $N_1 + N_2$ verteilen. Ich habe jedoch behauptet, sie sei wie die Kurve N_{12} verteilt. Mitnich-

ten, sie ist wie $N_1 + N_2$ verteilt. Natürlich ist sie es wirklich; sie muß es sein, und sie ist es. Kennzeichnen wir unsere bei Licht angestellten Beobachtungen mit einem Strich, dann zeigt sich, daß N'_1 praktisch gleich N_1 ohne Licht und N'_2 nahezu gleich N_2 ist. Die Zahl N'_{12} aber, die wir bei Licht beobachten, wenn beide Löcher geöffnet sind, ist gleich der Zahl, die wir durch Loch 1 plus der Zahl, die wir durch Loch 2 kommen sehen. Dieses Ergebnis erhalten wir, wenn wir Licht eingeschaltet haben. Wir erhalten also unterschiedliche Resultate bei ein- und bei ausgeschaltetem Licht. Bei eingeschaltetem Licht folgt die Verteilung der Kurve $N_1 + N_2$, bei ausgeschaltetem Licht der Kurve N_{12} . Schalten wir das Licht ein, erhalten wir wieder $N_1 + N_2$. Sie sehen, die Natur ist uns entwischt! Sie könnten nun sagen, das Licht beeinflusse das Ergebnis. Das Resultat fällt bei eingeschaltetem Licht anders aus als bei ausgeschaltetem. Sie könnten auch sagen, das Licht beeinflusse das Verhalten der Elektronen oder, nicht ganz korrekt ausgedrückt, das Licht habe die Bewegung der Elektronen beim Experiment beeinflußt und diejenigen, die am höchsten Punkt angelangt wären, irgendwie abgelenkt oder weggestoßen, so daß sie statt dessen an der tiefsten Stelle landeten, wodurch die Kurve zu der einfachen $N_1 + N_2$ -Kurve abgeflacht wurde.

Elektronen sind sehr empfindlich. Einen Baseball können Sie getrost anstrahlen und betrachten, ohne daß er deswegen seinen Weg ändert. Strahlen Sie dagegen ein Elektron an, wird es dadurch ein bißchen herumgestoßen und tut nicht mehr das, was man erwarten sollte. Nur weil das Licht eingeschaltet und so stark ist, tut es etwas anderes. Nehmen wir also an, wir reduzieren die Helligkeit immer mehr, bis das Licht ganz gedämpft ist, und setzen hochsensible Detektoren ein, die auch noch bei äußerst gedämpftem Licht sehen können, und schauen, was dann passiert. Schließlich ist nicht zu erwarten, daß ganz ganz schwaches Licht das Elektron so vollständig beeinflusst, daß es sein Verhalten hundertprozentig von N_{12} zu $N_1 + N_2$ ändert. Je schwächer das Licht wird, de-

sto mehr sollte die Situation der ohne Licht gleichen. Wie also verwandelt sich die eine Kurve in die andere? Aber vergessen wir nicht: Licht ist nicht wie eine Wasserwelle. Es hat zugleich Teilchencharakter und tritt in Photonen auf, und wenn wir die Intensität des Lichts verringern, verringern wir nicht den Effekt, sondern die Anzahl der von der Quelle ausgesandten Photonen. Je mehr ich das Licht zurückdrehe, um so weniger Photonen erhalte ich. Das Minimum, das ich von einem Elektron streuen lassen kann, ist ein Photon; habe ich aber zu wenige Photonen, wird manches Elektron durchschlüpfen, wenn gerade kein Photon vorbeikommt, und so werde ich es nicht sehen. Sehr schwaches Licht bedeutet also nicht eine geringere Störung, sondern lediglich weniger Photonen. Die Folge ist, daß ich bei sehr schwachem Licht eine dritte Rubrik mit der Überschrift »nicht gesehen« einführen muß. Bei sehr starkem Licht brauche ich hier nicht viele einzutragen, bei sehr schwachem die meisten. So habe ich also drei Rubriken: Loch 1, Loch 2 und nicht gesehen. Sie ahnen, was passiert. Die gesehenen verteilen sich nach der Kurve $N_1 + N_2$, die nicht gesehenen nach der Kurve N_{12} . Je schwächer das Licht wird, desto weniger sehe ich und desto größer wird der Teil der nicht gesehenen. Die tatsächliche Kurve ist in jedem Fall eine Mischung aus den beiden Kurven und nähert sich mit abnehmendem Licht kontinuierlich N_{12} .

Ich kann hier nicht auf alle Anregungen eingehen, die Sie vielleicht für weitere Experimente zur Klärung des Problems vorbringen. Sie müssen mir einfach glauben, daß es sich als unmöglich erweist, das Licht irgendwie so einzurichten, daß man einerseits sieht, welches Loch das Elektron passiert, ohne es andererseits in seinem Verhalten zu stören, also ohne die Interferenz zu zerstören. Im übrigen gilt das nicht nur für Licht, sondern auch für alles andere. Was immer sie hernehmen, es ist prinzipiell unmöglich. Zwar können Sie auf vielerlei Weise feststellen, durch welches Loch das Elektron gegangen ist, und es wird sich zeigen, daß es das eine oder das andere gewählt hat. Sobald Sie jedoch versuchen, Ihr Instru-

ment so zu bauen, daß es die Bewegung des Elektrons nicht stört, verweigert es Ihnen die Auskunft. Sie wissen nicht mehr, welches Loch das Elektron passiert hat und erhalten wieder die komplizierte Kurve.

Als Heisenberg die Gesetze der Quantenmechanik entdeckte, begriff er, daß sie nur folgerichtig sein konnten, wenn unseren experimentellen Fähigkeiten bis dahin nicht erkannte prinzipielle Grenzen gezogen waren. Mit anderen Worten, wir können unsere Versuche nicht mit solcher Feinheit durchführen, wie wir gerne möchten. So stellte Heisenberg seine Unschärferelation auf, die auf unser Experiment bezogen besagt: »Es ist unmöglich, irgendeine Vorrichtung zu ersinnen, die imstande wäre festzustellen, welches Loch das Elektron passiert, ohne gleichzeitig das Elektron so zu stören, daß das Interferenzmuster zerstört wird.« (Heisenberg selbst formulierte die Unbestimmtheitsbeziehung etwas anders, aber doch genau in diesem Sinne, so daß man ohne weiteres von einer Aussage zur andern gelangen kann.) Bis heute hat niemand einen Weg drum herum gefunden. Sicher bibbern Sie jetzt vor Ungeduld, mir Methoden vorzuschlagen, wie man doch noch herausbringen könnte, welches Loch das Elektron passiert. Aber bei sorgfältiger Analyse findet sich überall ein Haken. Wie sehr Sie sich auch einbilden, Sie bringen es fertig, ohne das Elektron zu stören, immer gibt es etwas, was den Himmel hält, und stets läßt sich der Unterschied in den Kurvenmustern auf die Störung durch das zur Bestimmung des Wegs des Elektrons benutzte Instrument zurückführen.

Das ist ein Grundmerkmal der Natur, das uns über alles etwas sagt. Wenn wir beispielsweise morgen ein neues Teilchen finden, das Kaon – de facto ist das Kaon bereits entdeckt, wir wollen unser neues Teilchen nur so nennen, damit es einen Namen hat –, und ich Kaonen zur Wechselwirkung mit den Elektronen nehme, um festzustellen, welches Loch das Elektron passiert, weiß ich schon jetzt – so hoffe ich – genug über das Verhalten dieses neuen Teilchens, um sagen zu können: Es kann unmöglich dergestalt sein, daß es mir hilft, den Weg

des Elektrons zu bestimmen, ohne gleichzeitig das Elektron zu stören und das Interferenzmuster zum Verschwinden zu bringen. Insofern kann die Unschärferelation als allgemeines Prinzip benutzt werden, um einen Gutteil der Eigenschaften unbekannter Körper zu erraten, das heißt einen Teil, der ohnehin durch seinen Wahrscheinlichkeitscharakter begrenzt ist.

Kehren wir zu unserem Satz A – »Elektronen müssen entweder durch das eine oder durch das andere Loch gehen« – zurück. Stimmt er nun, oder stimmt er nicht? Physiker verstehen es, Fallen zu umgehen. Sie haben sich folgende Denkgepflogenheit zur Regel gemacht. Verfügt man über einen Apparat, der angibt, welches Loch das Elektron passiert (und über einen solchen Apparat *kann* man verfügen), dann kann man auch sagen, ob es durch das eine oder durch das andere Loch kommt. Verfügt man jedoch nicht über einen solchen Apparat, dann kann man auch nicht sagen, daß es entweder durch das eine oder durch das andere geht. (D. h. *sagen* kann man es immer – vorausgesetzt, man hört sofort auf zu denken und zieht keinerlei Schlüsse aus der Aussage. Die Physiker ziehen es jedoch vor, nichts zu sagen und statt dessen weiterzudenken.) Zu schließen, daß es entweder durch das eine oder durch das andere Loch geht, wenn man nicht hinschaut, heißt – dergestalt ist der Drahtseilakt der Logik, dem wir uns stellen müssen, wenn wir die Natur deuten wollen – in einen Irrtum abrutschen.

Der hier besprochene Satz ist allgemein; er gilt nicht nur für zwei Löcher, sondern kann allgemein folgendermaßen formuliert werden: Die Wahrscheinlichkeit irgendeines Ereignisses in einem idealen Experiment – also einem Experiment, bei dem alles bestmöglich spezifiziert ist – ist das Quadrat von etwas, was ich in unserem Fall ›a‹ genannt habe, nämlich der Wahrscheinlichkeitsamplitude. Kann nun ein Ereignis auf verschiedene Weise eintreten, ist die Wahrscheinlichkeitsamplitude, diese ›a‹-Zahl, gleich der Summe der ›a‹s für jede der verschiedenen Alternativen. In einem Experi-

ment, bei dem festgestellt werden kann, welche Alternative gewählt worden ist, ändert sich die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses; sie ist in diesem Fall die Summe der Wahrscheinlichkeiten jeder Alternative. Anders gesagt, die Interferenz bleibt weg.

Fragt sich also, wie funktioniert es wirklich? Welcher Mechanismus steckt letztlich dahinter? Niemand kennt einen solchen Mechanismus. Niemand vermag Ihnen eine tiefer eindringende Erklärung dieses Phänomens zu geben als die hier angeführte, die sich im Grund auf eine Beschreibung beschränkt. Man kann Ihnen ausführlichere Erklärungen geben in dem Sinn, daß man Ihnen an verschiedenen Beispielen demonstriert, wie unmöglich es ist festzustellen, welches Loch das Elektron passiert, ohne gleichzeitig das Interferenzmuster zu zerstören. Man kann die Experimente über die zwei Schlitze hinaus weiter ausbauen. All das läuft jedoch nur auf eine Wiederholung und Eintrichterung hinaus. Es bohrt nicht tiefer, es zieht bloß weitere Kreise. Ebenso kann man präzisere mathematische Angaben machen, zum Beispiel erwähnen, daß es sich nicht um reale, sondern um komplexe Zahlen handelt und noch einige andere untergeordnete Punkte anführen, die mit der Hauptidee nichts zu tun haben. Das tiefe Geheimnis aber, das ich Ihnen beschrieben habe, läßt sich gegenwärtig nicht tiefer erforschen.

Bis jetzt haben wir die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Elektrons berechnet und uns gefragt, ob sich auf irgendeine Weise feststellen läßt, wo ein einzelnes Elektron wirklich ankommt. Natürlich sträuben wir uns nicht, die Wahrscheinlichkeit mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie zu berechnen, zu der wir ja bei sehr komplizierten Situationen immer greifen, beispielsweise, wenn wir einen Würfel in die Luft werfen. In solchen Fällen sind wir gern bereit einzuräumen, daß wir bei den vielfältigen Widerständen und Atomen und all dem komplizierten Zeug viel zuwenig wissen, um eine endgültige Vorhersage machen zu können. Wir berechnen eben die Wahrscheinlichkeit, daß er so oder so fallen wird. Hier jedoch

behaupten wir – nicht wahr? –, daß die Wahrscheinlichkeit schon ganz zu Beginn zu suchen ist: in den fundamentalen Gesetzen der Physik.

Angenommen, ich habe mein Experiment so aufgebaut, daß ich bei ausgeschaltetem Licht die Interferenzsituation erhalte. Und nun behaupte ich, daß ich selbst bei eingeschaltetem Licht nicht vorhersagen kann, durch welches Loch ein Elektron kommen wird. Ich weiß lediglich, daß es jedesmal, wenn ich hinschaue, das eine oder das andere Loch sein wird. Welches von beiden es sein wird, vermag ich beim besten Willen nicht zu prophezeien. Mit anderen Worten, die Zukunft läßt sich nicht in die Karten schauen. Es ist unmöglich, auf irgendeine Weise oder aufgrund irgendeiner Information vorherzusagen, durch welches Loch das Ding kommen beziehungsweise hinter welchem Loch es auftauchen wird. Das bedeutet, daß die Physik in gewisser Hinsicht die Waffen gestreckt hat – falls es ihr (wie jedermann annahm) ursprünglich darum ging, genügend herauszufinden, um die Entwicklung der Dinge in einer vorgegebenen Situation vorhersagen zu können. Hier ist die vorgegebene Situation: Elektronenquelle, starke Lichtquelle, Wolframplatte mit zwei Löchern – und nun sagen Sie mir, hinter welchem Loch bekomme ich das Elektron zu sehen. Eine der Theorien sucht den Grund für unser Unvermögen, das richtige Loch vorherzusagen, in äußerst komplizierten Vorgängen am Ursprung, in einer Art innerem Räderwerk oder Getriebe, das das Loch jeweils auswählt; die Wahrscheinlichkeit ist fünfzig zu fünfzig, da das Getriebe, wie der Würfel, auf den Zufall abgestellt ist. Die Physik ist noch unvollständig; eines Tages aber wird sie vollständig sein, und wir werden mit Sicherheit das richtige Loch vorhersagen können. Diese Theorie, die sogenannte Theorie der verborgenen Variablen, aber kann nicht zutreffen, da unser Unvermögen, Vorhersagen zu machen, nicht auf einen Mangel an detailliertem Wissen zurückgeht.

Schalte ich das Licht nicht an, sollte ich, wie gesagt, das Interferenzmuster erhalten. Sind aber die Umstände dergestalt,

daß ich ein Interferenzmuster erhalte, ist es unmöglich zu analysieren, durch welches Loch die einzelnen Elektronen gekommen sind, weil sich die Interferenzkurve mathematisch grundlegend vom Beitrag der beiden anderen Wahrscheinlichkeitskurven unterscheidet. Hätten wir allerdings ein für allemal feststellen können, durch welches Loch das Elektron bei Licht kommen würde, wäre es völlig unerheblich, ob das Licht nun eingeschaltet ist oder nicht. Welcher Art das Getriebe am Ursprung auch wäre, dessen Beobachtung uns vorherzusagen erlaubte, ob das Teilchen durch 1 oder 2 geht, wir hätten es ohne Licht beobachten können und hätten deshalb auch ohne Licht sagen können, durch welches Loch die Elektronen nacheinander kommen würden. Könnten wir das aber, müßte sich die zugehörige Kurve als Summe der beiden Kurven für Loch 1 und Loch 2 darstellen lassen, was nicht der Fall ist. Folglich muß es, ob das Licht nun ein- oder ausgeschaltet ist, unmöglich sein, irgendeine Information im voraus darüber zu erlangen, für welches Loch sich das Elektron von Fall zu Fall entscheidet, wenn das Experiment so aufgebaut ist, daß bei ausgeschaltetem Licht Interferenz auftreten kann. Nicht unsere Unkenntnis des inneren Getriebes, der inneren Komplikationen, ist es also, die uns die Wahrscheinlichkeit in die Natur hineinlegen läßt. Sie scheint der Natur vielmehr innezuwohnen. Irgend jemand hat es einmal so formuliert: »Nicht einmal die Natur selber weiß, welchen Weg das Elektron einschlagen wird.«

»Für die Existenz der Naturwissenschaften«, erklärte einst ein Philosoph, »ist unabdingbar, daß dieselben Umstände stets dieselben Ergebnisse erzeugen.« Wie sich zeigt, tun sie das nicht. Wir mögen uns noch so große Mühe geben, bei jedem Versuch, haargenau dieselben Umstände mit denselben Bedingungen zu schaffen, wir können dennoch nicht vorher-sagen, hinter welchem Loch das Elektron auftauchen wird. Trotzdem – auch wenn dieselben Bedingungen keineswegs immer dieselben Ergebnisse erzeugen – machen die Naturwissenschaften einfach munter weiter. Obgleich uns unser Un-

vermögen, genaue Voraussagen machen zu können, betrübt. Schließlich ließen sich durchaus Umstände vorstellen, in denen es lebensnotwendig wäre, das Richtige vorherzusagen. So könnten wir uns – was wir freilich besser unterlassen – eine Vorrichtung ausdenken, etwa eine Photozelle, durch die wir ein Elektron schicken, das, wenn es durch Loch 1 geht, eine Atombombe zündet und den dritten Weltkrieg auslöst, während es, wenn es durch Loch 2 geht, Friedensfühler ausstreckt und den Krieg noch ein bißchen hinauszögert. Dann hinge die Zukunft des Menschen von etwas ab, was keine naturwissenschaftliche Anstrengung der Welt vorhersagen könnte. Die Zukunft läßt sich nicht vorhersagen.

Nicht hochtrabende Vorschriften sind unabdingbar »für die Existenz der Naturwissenschaften« oder für die Bestimmung der Eigenschaften der Natur. Diese werden stets durch unseren Werkstoff bestimmt, durch die Natur selbst. Wir schauen ihn uns genau an und nehmen zur Kenntnis, was wir sehen. Aber wir können nicht im voraus sagen, was dabei herauskommen wird. Nicht selten treten die einleuchtendsten Möglichkeiten nicht ein. Was wir für den Fortschritt der Wissenschaft brauchen, ist Experimentierfreude, ehrliche Berichterstattung – die sich an die Ergebnisse hält und sich nicht am Wunschdenken irgendwelcher Leute orientiert – und schließlich (aber nicht zuletzt) den zur Deutung der Ergebnisse nötigen Verstand. Dieser sollte sich vor allem dessen nicht zu sicher sein, was kommen muß. Er mag voreingenommen sein und sagen: »Das ist äußerst unwahrscheinlich; es gefällt mir auch nicht.« Aber Voreingenommenheit ist etwas anderes als absolute Gewißheit. Ich spreche nicht von absolutem Vorurteil, sondern von Vorliebe. Solange Sie nur voreingenommen sind, spielt es keine Rolle. Erweist sich Ihre Vorliebe nämlich als falsch, werden die ständig wiederkehrenden Versuchsergebnisse Sie mit der Zeit so nerven, daß Sie sich den Fakten schließlich nicht länger verschließen können. Das vermöchten Sie nur, wenn Sie sich bestimmter unabdingbarer Voraussetzungen für die Wissenschaft von vorneherein absolut sicher

wären, wie besagter Philosoph. Wirklich unerläßlich für die Existenz der Naturwissenschaften jedoch sind Geister, die, nichts von solch unabdingbaren Voraussetzungen, die die Natur zu erfüllen hat, wissen wollen.

7. Auf der Suche nach neuen Gesetzen

In dieser Vorlesung möchte ich über das eigentliche Thema der Vorlesungsreihe etwas hinausgehen. Ich möchte nicht so sehr über die Natur selber sprechen, was ja bei Betrachtungen über das Wesen physikalischer Gesetze das mindeste wäre, als vielmehr über unseren gegenwärtigen Stand zur Natur. Das heißt, ich möchte Ihnen sagen, was wir zu wissen glauben, was sich vermuten läßt und wie solche Vermutungen zustande kommen. Einer von Ihnen meinte, es wäre doch ideal, wenn ich Ihnen nicht nur theoretisch schön langsam auseinandersetze, wie man neue Gesetze erraten kann, sondern Ihnen gleich ein Beispiel dafür lieferte. Aber ich weiß nicht, ob mir das glücken wird.

Als erstes möchte ich Ihnen einmal die gegenwärtige Situation beschreiben, also, was wir über Physik wissen. Vielleicht glauben Sie, ich hätte Ihnen das schon alles gesagt, da ich Ihnen alle bekannten großen Prinzipien vorgeführt habe. Aber diese Gesetze müssen für *etwas* gelten; der Satz von der Erhaltung der Energie bezieht sich auf die Energie von *etwas*, und die Gesetze der Quantenmechanik beschreiben das Verhalten von *etwas*. Alle zusammengenommen, aber klären uns diese Prinzipien nicht über den Stoff auf, aus dem unser Forschungsgegenstand, die Natur, gemacht ist. Von diesem Stoff nun, an dem angeblich alle diese Prinzipien beobachtet wurden, soll im folgenden kurz die Rede sein.

Da ist allem voran die Materie – und bemerkenswerterweise ist die Materie überall dieselbe. Der Stoff, aus dem die Sterne gemacht sind, ist derselbe, den wir auf der Erde haben. Das wissen wir, weil das Wesen des von den Sternen ausge-

sandten Lichts eine Art Fingerabdruck darstellt, der uns verrät, daß wir es dort mit denselben Atomen zu tun haben wie hier auf der Erde. Ebenso scheinen die Atome in Lebewesen und unbelebten Körpern dieselben zu sein. Frösche bestehen aus demselben »Brei« wie Felsen, nur in anderer Anordnung. Das vereinfacht unser Problem; wir haben nichts als Atome, überall dieselben Atome.

Die Atome wiederum scheinen alle nach einem allgemeinen Schema aufgebaut. Sie bestehen aus einem Kern und diesen umgebende Elektronen. Tragen wir die Teile der Welt, die zu kennen wir uns einbilden, in eine Tabelle ein, so können wir diese wie in Abbildung 32 ordnen.

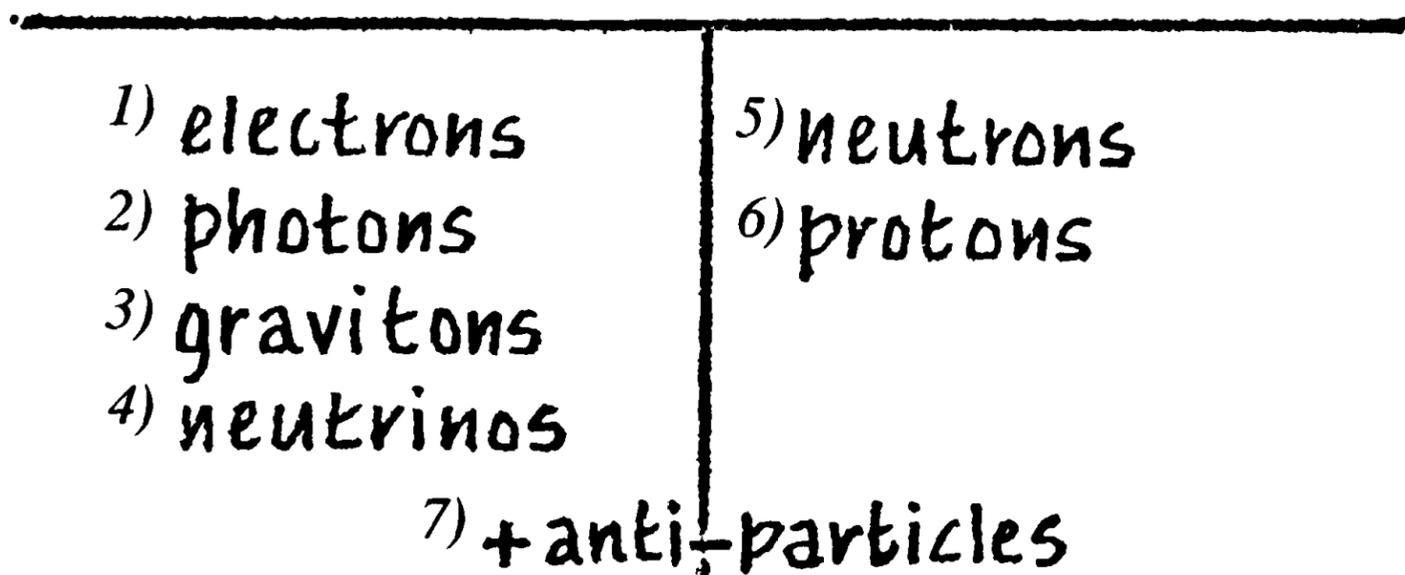


Abbildung 32 1) Elektronen 2) Photonen 3) Gravitonen 4) Neutrinos 5) Neutronen 6) Protonen 7) + Antiteilchen

Da sind einmal die Elektronen, die Teilchen in der Hülle des Atoms. Dann ist da der Kern, der unserem heutigen Wissensstand zufolge aber aus zwei anderen Partikeln besteht, den sogenannten Neutronen und Protonen. Wir sehen die Sterne, die ja nicht zu übersehen sind, sehen aber auch die Atome und das Licht, das sie aussenden, und das selbst wiederum aus Teilchen, aus sogenannten Photonen, besteht. Erinnern Sie sich noch, anfangs sprachen wir über die Gravitation, und wenn die Quantentheorie recht behält, sollte es eine Art Gravitationswellen geben, die sich zugleich wie Teilchen verhalten und die wir Gravitonen nennen. Sollten Sie daran zweifeln, bleiben Sie eben bei der Bezeichnung Schwerkraft. Und

schließlich habe ich den sogenannten Betazerfall erwähnt, bei dem ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino – oder richtiger ein Antineutrino – zerfallen kann. Hier stoßen wir wieder auf ein anderes Teilchen, ein Neutrino. Zu all den aufgeführten Teilchen kommen natürlich noch die entsprechenden Antiteilchen, wodurch die Zahl der Teilchen im Schnellverfahren, gegen das jedoch nichts einzuwenden ist, aufs Doppelte steigt.

Mit den aufgeführten Teilchen lassen sich, soweit wir wissen, alle Phänomene, bei denen eine niedrige Energie im Spiel ist, in der Tat alle nicht außergewöhnlichen Phänomene im ganzen Universum erklären. Wohl gibt es Ausnahmen, wie irgendwelche Effekte von sehr hochenergetischen Teilchen, und im Labor haben wir einige recht sonderbare Dinge zustande gebracht. Abgesehen von diesen Spezialfällen aber lassen sich sämtliche gewöhnlichen Erscheinungen durch Wirkungen und Bewegungen von Teilchen erklären. Vermutlich im Prinzip sogar das Leben selbst. Im Prinzip, das soll heißen, vermutlich könnten wir, wenn wir schon so weit wären, alles auf die Bewegung von Atomen, also von Neutronen, Protonen und Elektronen zurückführen, ohne auf bis dahin unentdecktes physikalisches Neuland zu stoßen. Oder nehmen wir ein anderes Beispiel: Wahrscheinlich läßt sich auch die Tatsache, daß die Sterne Energie ausstrahlen, Sonnen- oder stellare Energie, durch Kernreaktionen erklären. Unser heutiges Atommodell beschreibt, zumindest soviel wir gegenwärtig wissen, das Verhalten der Atome bis ins Detail genau. In der Tat kann ich ohne Übertreibung behaupten, daß es kein uns bekanntes Phänomen gibt, das sich mit Gewißheit nicht auf diese Weise deuten ließe oder uns gar vor ein tiefes Geheimnis stellte.

Das war natürlich nicht immer so. Beispielsweise glaubte zunächst niemand, daß die sogenannte Supraleitfähigkeit, das ist die Fähigkeit von Metallen, Elektrizität bei niedrigen Temperaturen ohne Widerstand zu leiten, sich als Folge der bekannten Gesetze entpuppen würde. Nachdem man sich je-

doch die Mühe gemacht hatte, die Sache einmal gründlich zu durchdenken, zeigte sich, daß unser gegenwärtiges Wissen zum Verständnis durchaus ausreichte. Es gibt allerdings andere Phänomene, wie außersinnliche Wahrnehmungen, die die Physik nicht zu erhellen vermag. Allerdings sind einschlägige Erscheinungen dieser Art nicht recht greifbar und auch nicht über alle Zweifel erhaben. Könnten sie jedoch eindeutig nachgewiesen werden, wäre damit zugleich der Nachweis erbracht, daß die Physik noch unvollendet ist, weshalb sich die Physiker brennend für die Frage interessieren. Viele Experimente scheinen dagegen zu sprechen. Dasselbe gilt für astrologische Einflüsse. Träfe zu, daß man besser erst die Sterne konsultiert, ehe man zum Zahnarzt geht – in Amerika gibt es diese Art von Astrologie –, wäre die Physiktheorie als falsch entlarvt, da sich ein solcher Mechanismus nicht mehr aus dem Verhalten von Teilchen erklären ließe. Deshalb hegen die Naturwissenschaftler auch beträchtliche Zweifel an solchen Vorstellungen.

Auf der anderen Seite erschien das Phänomen der Hypnose, solange es unvollständig beschrieben wurde, gleichfalls als unmöglich. Seit es besser bekannt ist, weiß man jedoch, daß man durch normale physiologische, wenn auch bis jetzt unbekannte Prozesse Hypnose nicht ausschließen kann; daß also offensichtlich keine neue Kraft erforderlich ist.

Während wir unsere Theorie der Vorgänge außerhalb des Atomkerns heute für so exakt und vollständig halten, daß wir uns einbilden, genügend Zeit vorausgesetzt, alles ebenso genau berechnen zu können, wie es gemessen werden kann, erweist sich unser Wissen über die im Kern zwischen Neutronen und Protonen wirksamen Kräfte noch als recht lückenhaft. Soll heißen, daß wir die zwischen Neutronen und Protonen wirksamen Kräfte bis jetzt noch nicht so weit durchleuchtet haben, daß ich, selbst wenn Sie mir genügend Zeit und Computer zur Verfügung stellten, die Energieniveaus von Kohlenstoff oder dergleichen genau berechnen könnte. Dazu wissen wir schlicht und einfach nicht genug. Zwar bewältigen wir die

Berechnung des Energieniveaus bei Elektronen, also bei den Atomschalen, nicht dagegen beim Kern, da wir die hier wirksamen Kräfte noch nicht sehr gut verstehen.

Um diesem Mangel abzuhelpfen, werden schon seit längerer Zeit Experimente mit sehr hoher Energie durchgeführt. Man läßt Neutronen und Protonen mit außerordentlicher Energie aufeinanderprallen, um sonderbare Sachen zu produzieren, durch deren Untersuchung man die Kräfte zwischen Neutronen und Protonen allmählich besser zu verstehen hofft. Allerdings wurde mit diesen Versuchen auch die berühmte Büchse der Pandora geöffnet! Obwohl wir lediglich mehr über die Kräfte zwischen Neutronen und Protonen in Erfahrung bringen wollten, entdecken wir, als wir die beiden aufeinanderhetzten, daß es in der Welt noch mehr Elementarteilchen gibt. In der Tat verfangen sich über vier Dutzend solcher Teilchen im Schleppnetz unserer Experimente, und diese Neuzugänge wollen wir nun, da sie mit Neutronen und Protonen wechselwirken und etwas mit den zwischen ihnen wirksamen Kräften zu tun haben, in die Neutron/Proton-Rubrik einordnen (Abb. 33).

Zusätzlich zu dem aufgefisheten Schlick wurden auch einige für das Problem der Kernkräfte irrelevante Stücke eingefangen, darunter das sogenannte My-Meson oder Myon und ein

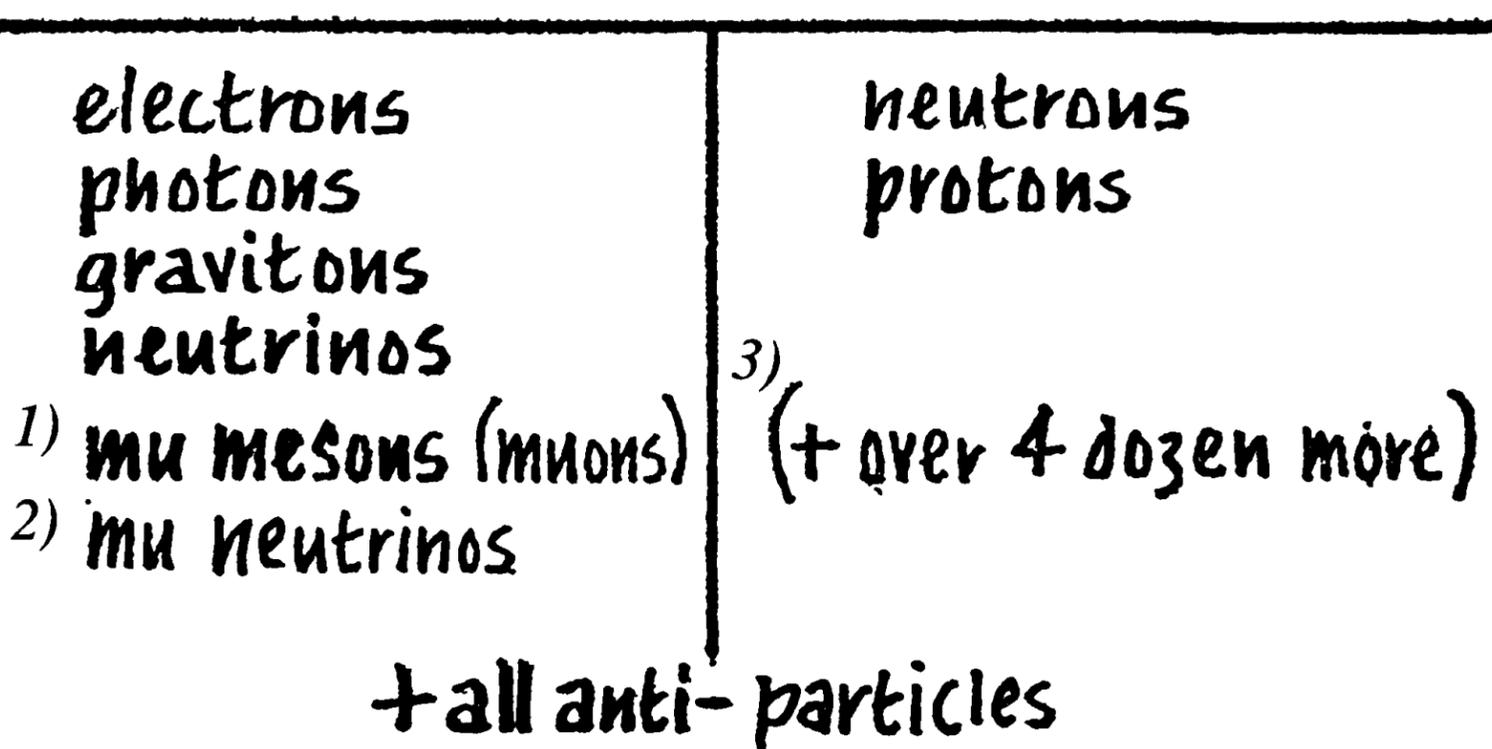


Abbildung 33 1) Myonen 2) Myon-Neutrinos 3) + über 4 Dutzend anderer Teilchen

zugehöriges Neutrino. Wir haben also zwei Sorten von Neutrinos, eins, das zum Elektron gehört und ein anderes, das zum My-Meson gehört. Erstaunlicherweise verhalten sich dieses Myon und sein Neutrino, deren Gesetze wir, soweit sich das experimentell sagen läßt, gründlich erforscht haben, ganz genauso wie das Elektron und sein Neutrino, außer daß das My-Meson 207mal schwerer ist als das Elektron. Das ist geheimnisvollerweise der einzige uns bekannte Unterschied zwischen den beiden Teilchen. Dazu besagte vier Dutzend weiterer Teilchen samt Antiteilchen – ein furchterregendes Aufgebot! Mesonen, Pionen, Kaonen, Lambdas, Sigmas... aber was sollen die Namen! Bei vier Dutzend ein verwirrendes Geklingel. Zum Glück jedoch zeigt sich, daß diese Teilchen sich zu Familien zusammenschließen, was die Sache etwas vereinfacht. Außerdem sind manche dieser sogenannten Teilchen derart kurzlebig, daß sogar ein Streit darüber entbrannte, ob es überhaupt möglich ist, ihre Existenz zu definieren. Doch das soll uns hier nicht weiter interessieren.

Lassen Sie mich den Familiengedanken anhand von Neutronen und Protonen etwas näher erläutern. Neutronen und Protonen haben bis auf etwa ein Zehntel Prozent dieselbe Masse. Das eine ist 1,836-, das andere 1,839mal so schwer wie ein Elektron. Noch bemerkenswerter ist die Tatsache, daß die Kernkraft, die starke Wechselwirkung im Kern, zwischen zwei Protonen die gleiche ist wie zwischen einem Proton und einem Neutron und wie zwischen einem Neutron und einem Neutron. Mit anderen Worten, bei der starken Wechselwirkung ist ein Proton nicht von einem Neutron zu unterscheiden. Also haben wir ein Symmetriegesetz; Protonen können durch Neutronen ersetzt werden, ohne daß sich etwas ändert – vorausgesetzt, wir haben nur mit der starken Wechselwirkung zu tun. Ersetzen wir nämlich ein Proton durch ein Neutron, so macht das in anderer Hinsicht einen ganz gewaltigen Unterschied, da das Proton eine elektrische Ladung trägt, das Neutron dagegen nicht. Mit elektrischen Messungen können Sie den Unterschied zwischen einem Proton und einem Neutron auf Anhieb

feststellen; demnach ist diese Symmetrie, die Ihnen gestattet, eins durch das andere zu ersetzen, eine sogenannte näherungsweise befolgte Symmetrie. Sie gilt für die starken Wechselwirkungen der Kernkräfte, aber nicht in einem tieferen Sinn der Natur, nicht für die Elektrizität. In einem solchen Fall sprechen wir von einer partiellen Symmetrie, und Erscheinungen dieser Art machen uns nicht wenig zu schaffen.

Wie bereits erwähnt, haben sich die Familien in jüngerer Zeit stark vergrößert, und es zeigt sich, daß auch die Möglichkeiten des Austauschs zugenommen haben: Protonen beziehungsweise Neutronen können durch eine größere Anzahl Teilchen ersetzt werden. Allerdings nimmt die Genauigkeit ab. Traf schon die Aussage, daß Neutronen stets durch Protonen ersetzt werden können, nur näherungsweise zu, zumal das hinsichtlich der Elektrizität nicht stimmt, so steht die Symmetrie mit den in Frage kommenden anderen Teilchen auf noch schwächeren Füßen. Nichtsdestotrotz haben sich diese partiellen Symmetrien bei der Gruppierung der Teilchen zu Familien und damit bei der Lokalisierung von Lücken beziehungsweise beim Aufspüren noch fehlender Teilchen als recht hilfreich erwiesen.

Dieses Spielchen, grob über den Daumen gepeilt, Familienbeziehungen zu vermuten und so weiter, ist bezeichnend für das Schattenboxen mit der Natur, das der Entdeckung eines tiefen, fundamentalen Gesetzes voraufgeht. Die Geschichte der Naturwissenschaften bietet manch wichtiges Beispiel dafür. Auf ganz ähnliche Weise fand Mendelejew* das Periodische System der Elemente heraus. Damit war allerdings nur der erste Schritt geschafft. Die vollständige Erklärung wurde erst viel später von der Atomtheorie nachgeliefert. Auf dieselbe Weise ordneten vor etlichen Jahren Maria Mayer und Jensen** die Kenntnisse über die Energieniveaus der Kerne

* Dmitrij Iwanowitsch Mendelejew, 1834–1907, russischer Chemiker.

** Maria Goeppert-Mayer, deutsch-amerikanische Physikerin (1906–1972), erhielt 1963 den Nobelpreis zusammen mit dem deutschen Physiker Hans Daniel Jensen (1907–1973), ehemals Direktor des Instituts für Theoretische Physik in Heidelberg.

im sogenannten Schalenmodell. Kurzum, die Physik liebt es, mit Analogien zu spielen, um die Vielfalt durch Vermutungen und Näherungen etwas zu reduzieren.

Zu diesen Teilchen kommen noch alle Prinzipien, über die wir in den vorausgegangenen Vorlesungen gesprochen haben, die Prinzipien der Symmetrie, der Relativität und der Quantenmechanik und in Kombination mit der Relativität die Notwendigkeit, daß alle Erhaltungssätze lokal sein müssen.

Nehmen wir aber all diese Prinzipien zusammen, entdecken wir, daß es zu viele sind. Sie vertragen sich nicht miteinander. Sie sind unvereinbar, denn wenn wir die Quantenmechanik plus Relativitätstheorie plus dem Lehrsatz, daß alles lokal sein muß, plus verschiedene stillschweigende Voraussetzungen nehmen, erhalten wir bei der Berechnung für verschiedene Dinge unendlich. Wie aber können wir, wenn wir unendlich erhalten, behaupten, das stimme mit der Natur überein? Lassen Sie mich Ihnen ein Beispiel für die stillschweigenden Voraussetzungen geben, denen gegenüber wir zu voreingenommen sind, um ihre wahre Bedeutung zu begreifen: Sagen wir, Sie wollen einen Fall auf sämtliche Möglichkeiten hin untersuchen, die mit einer Wahrscheinlichkeit von meinerseits 50 Prozent, 25 Prozent und so fort eintreten können, so erwarten Sie unter dem Strich die Summe 1. Sie sind sich sicher, daß Sie, wenn Sie sämtliche Alternativen zusammenzählen, eine Wahrscheinlichkeit von 100 Prozent erhalten. Das scheint ganz vernünftig zu sein, aber just solche vernünftig erscheinenden Dinge pflegen für Aufregung zu sorgen. Oder nehmen Sie den Kausalitätssatz, der häufig stillschweigend vorausgesetzt wird, ehe wir merken, daß irgend etwas nicht paßt. Klingt es nicht durchaus plausibel, daß die Wirkung ihrer Ursache nicht vorausgehen kann? Bis jetzt jedenfalls hat noch niemand ein Modell aufgestellt, das sich über die Wahrscheinlichkeit oder das Kausalprinzip hinweggesetzt hätte, das sich im übrigen auch mit der Quantenmechanik, der Relativitätstheorie, der Lokalität und so weiter durchaus vereinbaren läßt. Im Grunde wissen wir also gar nicht genau, welche An-

nahme uns die Schwierigkeiten mit der Unendlichkeit einbrockt. Eine schöne Bescherung! Zum Glück jedoch erweist es sich als möglich, die Unendlichkeiten mit einem etwas plumpen Kunstgriff unter den Teppich zu kehren, so daß wir fürs erste wenigstens weiterrechnen können.

Das also ist unsere gegenwärtige Situation. Nun noch ein Wort zur Entdeckung neuer Gesetze.

Im allgemeinen gehen wir dabei folgendermaßen vor. Erst stellen wir eine Vermutung auf. Dann berechnen wir die Konsequenzen, um zu sehen, welche Folgen ein solches Gesetz überhaupt hätte. Danach vergleichen wir das Ergebnis mit der Natur, mit dem Experiment oder der Erfahrung, das heißt, wir vergleichen es direkt mit der Beobachtung, um zu sehen, ob wir damit hinkommen. Stimmt es mit dem Experiment nicht überein, war die Annahme falsch. So einfach ist das; damit haben wir schon den Schlüssel zur Naturwissenschaft. Dabei spielt es keine Rolle, wie herrlich Ihre Vermutung ist. Ebensowenig fällt dabei ins Gewicht, wie schlau Sie sind oder derjenige, der die Vermutung anstellte, oder wie er heißt – stimmt das Ergebnis mit dem Experiment nicht überein, ist es schlicht und einfach falsch. Natürlich muß man schon halbwegs gründlich überprüfen, ob es wirklich falsch ist: Derjenige, der das Experiment durchgeführt hat, könnte ungenau Bericht erstattet oder irgendeine Kleinigkeit wie Schmutz oder dergleichen übersehen haben; auch könnten bei der Berechnung der Folgen Fehler in der Analyse unterlaufen sein, selbst dem, der die Vermutungen anstellte. Doch all das ist insofern selbstverständlich, als ich diese Überprüfungen allesamt stillschweigend voraussetze. Es versteht sich ja wohl von selbst, daß sowohl Experiment als auch Berechnungen erst gründlich überprüft und die ganze Sache mehrfach hin und her gedreht und gewendet, das heißt mit allen Mitteln sichergestellt werden muß, daß die Konsequenzen auch wirklich logisch aus der Annahme folgen und de facto von dem äußerst sorgfältig überprüften Experiment abweichen.

Um keinen falschen Eindruck entstehen zu lassen: Die Na-

turwissenschaftler verbringen nicht ihre ganze Zeit damit, Vermutungen anzustellen und sie mit Experimenten zu vergleichen. Das hieße, die Geschichte etwas einseitig sehen und die Rolle des Experiments unterbewerten. Die experimentellen Physiker haben im großen und ganzen durchaus ihre eigenen Vorstellungen. Sie experimentieren lustig drauflos, auch wenn niemand eine gewichtige Vermutung angestellt hat, und lenken ihre Schritte sogar sehr oft in eine Richtung, in der, wie man weiß, gar keine Vermutungen von Theoretikern anstehen. Beispielsweise wissen wir von vielen Gesetzen nicht, ob sie auch bei hohen Energien funktionieren. Wir nehmen es der Einfachheit halber so an. Die experimentellen Physiker dagegen haben Versuche bei höheren Energien durchgeführt und in der Tat von Zeit zu Zeit für Aufregung gesorgt, soll heißen, entdeckt, daß die eine oder andere unserer unbesehen hingenommenen Annahmen falsch ist. Auf diese Art und Weise können Experimente also ganz unerwartete Ergebnisse zeitigen und Anlaß zu neuen Vermutungen geben. So war vor seiner Entdeckung, um ein Beispiel zu nennen, kein Mensch auf die Existenz eines My-Mesons samt zugehörigem Neutrino verfallen; und mehr noch, selbst heute vermöchte niemand eine Methode zu benennen, deren konsequente Anwendung das Vorhandensein eines solchen Teilchens nahelegte.

Natürlich haben Sie längst erkannt, daß man mit dieser Methode versuchen kann, jede definitive Theorie zu Fall zu bringen. Gesetzt also, wir haben eine solche Theorie, eine wirkliche Vermutung, deren Folgen wir berechnen und mit Experimenten vergleichen können, so haben wir im Prinzip auch die Möglichkeit, uns ihrer zu entledigen. Eine bestimmte Theorie als falsch hinzustellen, ist kein Kunststück, wohl aber, ihre Richtigkeit zu beweisen. Angenommen, Sie erwögen eine gute Vermutung, berechneten die Folgen und beobachteten bei sämtlichen Experimenten eine Übereinstimmung mit Ihrer Theorie. Bedeutete das bereits, daß Ihre Theorie richtig sein muß? Mitnichten, es bedeutete lediglich, daß sie

für den Augenblick nicht als falsch eingestuft werden kann. Durchaus denkbar, daß in Zukunft weitergehende Folgen berechnet und andere weitgreifende Experimente angestellt würden und Sie dann entdecken müßten, daß die Sache doch einen Haken hat. Zum Beispiel haben sich die Newtonschen Gesetze der Planetenbewegungen enorm lang behauptet. Auch Newton hatte das Gravitationsgesetz erst einmal vermutet, dann alle möglichen Konsequenzen für das System und so weiter berechnet und mit den Versuchsergebnissen verglichen. Jahrhundertlang war niemandem eingefallen, die von ihm aufgestellten Gesetze anzufechten. Bis zur Entdeckung der geringfügigen Abweichung in der Bewegung des Merkurs hatte seine Theorie, da sie nicht als falsch nachgewiesen worden war, als richtig gelten dürfen. Als richtig bewiesen allerdings konnte sie nie werden, weil schon morgen ein Experiment das für richtig Gehaltene als Irrtum hätte entlarven können. Nichtsdestotrotz bleibt bemerkenswert, wie lange sich manche Ideen behaupten können.

Eine der Möglichkeiten, den Fortschritt der Naturwissenschaften zum Stillstand zu bringen, bestünde darin, die Experimente auf Gebiete zu beschränken, deren Gesetze bekannt sind. Nun wenden sich die experimentellen Physiker jedoch mit Vorliebe und größtem Eifer just den Bereichen zu, wo die Möglichkeit, unsere Theorien als falsch nachzuweisen, am größten ist. Mit anderen Worten, die Naturwissenschaftler sind bestrebt, ihren Fehlern so schnell wie möglich auf die Spur zu kommen, denn das ist der einzige Weg voranzukommen. Beispielsweise gibt es derzeit kein großes Forschungsprogramm über Kernreaktionen oder Supraleitfähigkeit, da wir die gewöhnlichen Erscheinungen im Bereich niedriger Energie für geklärt halten und gar nicht wüßten, wo wir Ungeheimheiten suchen sollten. Daß ich solche Phänomene wie Supraleitfähigkeit und Kernreaktionen angesprochen habe, erklärt sich aus der Themenstellung meiner Vorlesungen, denn die Entdeckung fundamentaler Gesetze schließt alle Bereiche der Physik als interessant ein. Jetzt dagegen rede ich

davon, wie man die schwachen Punkte, wo es mit den fundamentalen Gesetzen hapert, aufdeckt, und da niemand weiß, wo es bei den Phänomenen niedriger Energie hapern sollte, konzentrieren sich alle Experimente heute auf das Feld der hohen Energie in der Hoffnung, dort auf ein neues Gesetz zu stoßen.

Noch etwas muß ich klarstellen: Eine vage Theorie läßt sich schwerlich als falsch abstempeln. Ist Ihre Vermutung dürftig und ziemlich vage formuliert und die Methode, die Sie zur Berechnung der Folgen verwenden, ebenfalls etwas unbestimmt – sind Sie sich nicht sicher und sagen: »Ich glaube schon, daß es stimmt, da alles auf das und das zurückgeht und das und das sich mehr oder weniger so und so verhält, und ich in etwa erklären kann, wie das Ganze funktioniert...«, so werden Sie erleben, daß Ihre Theorie in Ordnung ist, weil sie nicht widerlegt werden kann! Auch wenn der Prozeß des Berechnens der Konsequenzen ungenau ist, kann mit einigem Geschick jedes experimentelle Ergebnis passend ausgelegt werden. Dieses Verfahren ist Ihnen vielleicht aus anderen Bereichen vertraut. ›A‹ haßt seine Mutter. Natürlich weil sie ihn als Kind nicht genügend gehätschelt oder geliebt hat. Nun finden Sie aber, indem Sie der Sache nachgehen, heraus, daß sie ihn im Gegenteil sogar sehr geliebt hat und alles in Butter war. Auch gut, dann war sie eben zu nachgiebig! Sie sehen, Ihre Theorie muß nur dehnbar genug sein, und das eine Ergebnis paßt so gut wie das andere. Natürlich gibt es dagegen ein Rezept. In diesem Fall müßte man vorher genau angeben können, wieviel Liebe nicht genug und wieviel Liebe zu nachgiebig ist; dann hätte man eine durchaus legitime Theorie, die man testen könnte. Gewöhnlich wird gegen solche Vorhaltungen eingewandt: »In der Psychologie sind so präzise Abgrenzungen nicht möglich.« Schön, aber dann können Sie auch nicht behaupten, etwas zu wissen.

Um so mehr wird es Sie nach alledem entsetzen zu hören, daß wir auch in der Physik genau solche Beispiele finden können. Ganz ähnlich funktionieren zum Beispiel die näherungs-

weisen Symmetrien. Gehen Sie nämlich von einer näherungsweise befolgten Symmetrie aus und berechnen Sie, als handelte es sich um eine exakte Symmetrie, eine Reihe von Folgen, so wird es Sie, wenn Sie beim Vergleich mit dem Experiment feststellen, daß die Ergebnisse nicht übereinstimmen, nicht wundern. Schließlich war die Symmetrie ja nur eine annähernde. Decken sich die Ergebnisse bis zu einem gewissen Grad, sagen Sie: »Wie schön!«, stimmen sie so gut wie gar nicht überein, erklären Sie: »Dieser bestimmte Stoff muß besonders sensitiv auf das Fehlen der Symmetrie ansprechen.« Nun werden Sie lachen, aber wir sind auf diese Möglichkeit, Fortschritte zu machen, tatsächlich angewiesen. Wenn ein Thema noch neu ist, und das sind diese Teilchen, beginnt jede Wissenschaft sich vorsichtig mit Vermutungen voranzutasten. Darin ist die Physik nicht besser als die Psychologie, wie am Symmetriegesetz exemplifiziert. Also lachen Sie nicht zu sehr. Am Anfang heißt es sehr vorsichtig sein. Wie leicht kann man bei derart vagen Theorien auf die Nase fallen. Es hält schwer, sie zu widerlegen, und bedarf einer gewissen Geschicklichkeit und Erfahrung, um nicht das Gleichgewicht zu verlieren und auszurutschen.

Bei diesem Prozeß des Vermutens, Berechnens und Vergleichens können wir in jeder Phase steckenbleiben. Schon gleich beim Vermuten, wenn uns nichts einfällt. Oder beim Berechnen. Zum Beispiel verfiel Yukawa* 1934 im Zusammenhang mit den Kernkräften auf eine Idee, deren Folgen jedoch niemand berechnen konnte, da die Mathematik zu schwierig war; mithin konnte seine Idee auch nicht mit dem Experiment verglichen werden. Die Theorien lagen lange Zeit auf Eis, bis all diese Extrateilchen entdeckt waren, die Yukawa nicht in Betracht gezogen hatte; deshalb liegen die Dinge wohl nicht ganz so einfach, wie es ihm schien. Und schließlich kann man bei den Experimenten steckenbleiben. Beispiel: die Quanten-

* Hideki Yukawa (1907–1981), japanischer Physiker, ehemals Leiter des Instituts für physikalische Grundlagenforschung in Kyoto. Nobelpreis 1949.

theorie der Gravitation, die nur äußerst langsam, falls überhaupt vorankommt, weil Quantenmechanik und Schwerkraft nicht in ein und dasselbe Experiment miteinbezogen werden können. Im Vergleich zur elektromagnetischen Kraft ist die Schwerkraft einfach zu schwach.

Als theoretischer Physiker gehe ich die Probleme natürlich lieber von dieser Seite her an, und so wollen wir uns jetzt auf die Frage stürzen, wie man solche Vermutungen anstellt.

Wie gesagt spielt es keinerlei Rolle, woher die Vermutung stammt; wichtig ist lediglich, daß sie mit dem Experiment übereinstimmt und möglichst genau formuliert wird. »Wenn's nichts weiter ist«, sagen Sie, »das ist kinderleicht. Man nehme eine Maschine, einen großen Rechner mit einem Extrarädchen zum Zwecke des Vermutens, der jedesmal, wenn er eine Hypothese aufstellt, sofort die Folgen berechnet und diese mit einer Reihe von Experimenten vergleicht.« Mit anderen Worten, zum Vermuten gehört nicht viel. In Wirklichkeit ist das Gegenteil der Fall, und ich werde Ihnen zu erklären versuchen, warum.

Da stellt sich als erstes die Frage, wie beginnen? »Nun«, werden Sie vorschlagen, »fangen Sie doch einfach mit sämtlichen bekannten Prinzipien an.« Wie Sie aber wissen, vertragen sie sich nicht miteinander, wenn wir sie allesamt unter einen Hut bringen wollen. Irgend etwas müssen wir also weglassen. Immer wieder erhalten wir Briefe von Leuten, die uns drängen, Löcher in unsere Vermutungen zu machen, Löcher, um Raum für eine neue Vermutung zu schaffen. Sagt einer: »Da redet Ihr Kerle immer vom Kontinuum des Raums. Aber woher wollt Ihr wissen, daß es, wenn die Dimension nur klein genug ist, wirklich genügend Punkte dazwischen gibt, daß es sich nicht umgekehrt um einen Haufen Pünktchen handelt, die durch kleine Abstände voneinander getrennt sind?« Oder ein anderer: »Wieso glauben Sie eigentlich steif und fest, daß die quantenmechanischen Amplituden, von denen Sie geredet haben, wirklich stimmen? Sie sind so kompliziert und absurd, daß sie vielleicht doch nicht stimmen.« Solche Betrachtungen

liegen auf der Hand, natürlich erst recht für jeden, der sich selber mit all den Schwierigkeiten herumschlägt. Wozu also darauf herumhacken? Das Problem ist nicht nur, was falsch sein könnte, sondern wodurch genau man es ersetzen sollte. Angenommen, im Fall des Raumkontinuums lautete die These präzise, der Raum besteht aus einer Reihe kubisch angeordneter Pünktchen und der Raum dazwischen bedeutet nichts, so könnten wir sie auf Anhieb als falsch widerlegen. Sie funktioniert nicht. Aber es geht nicht nur darum, daß etwas falsch sein könnte, sondern vor allem auch darum, es durch etwas anderes zu ersetzen, und das ist nicht so einfach. Sobald nämlich eine bestimmte präzise Auffassung nachgeschoben wird, zeigt sich binnen kurzem, daß sie auch nicht besser ist.

Die nächste Schwierigkeit besteht darin, daß sich zur Lösung des Problems zahllose Möglichkeiten einfacher Art anbieten. Stellen Sie sich die Situation etwa folgendermaßen vor. Sie arbeiten hart, um einen Safe zu knacken. Sie haben sich schon stundenlang damit herumgeplagt, und da kommt irgendein Hansel daher, der keine Ahnung von Ihrer Aufgabenstellung hat, sondern nur sieht, daß Sie einen Safe knacken wollen, und sagt: »Warum probierst du es nicht einmal mit der Kombination 10:20:30?« Weil Sie keine Schlafmütze sind, haben Sie schon alles mögliche ausprobiert, darunter vielleicht die Kombination 10:20:30. Möglicherweise wissen Sie sogar schon, daß die mittlere Zahl 32 und nicht 20 ist. Vielleicht wissen sie auch, daß es eine fünfstellige Zahl ist . . . Also bitte, schicken Sie mir keine Briefe, um mir zu sagen, wie das Ganze funktioniert. Ich lese sie – ich lese sie stets, um sicherzugehen, daß ich den Vorschlag auch schon in Betracht gezogen habe –, aber es kostet zuviel Zeit, sie zu beantworten, da sie in der Regel von der Art »probier doch 10:20:30« sind. Wie gewöhnlich übertrifft die Phantasie der Natur unsere Einbildungskraft um ein Vielfaches. Das haben die anderen ebenso subtilen wie tiefschürfenden Theorien wohl zur Genüge bewiesen. Vermutungen von einer solchen Feinheit

und Tiefe anzustellen ist nicht so leicht. Dazu muß man wirklich etwas auf dem Kasten haben. Blindlings mit einer Maschine herumhantieren, führt gewiß nicht dahin.

Nun also ein paar Worte zur Kunst, die Gesetze der Natur zu erraten; denn es ist eine Kunst. Wie geht man dabei zu Werke? Eine Möglichkeit wäre, einen Blick in die Geschichte zu werfen, um zu sehen, wie es die anderen angestellt haben. Und das wollen wir als erstes tun.

Beginnen wir mit Newton. In seiner Zeit war das Wissen noch recht bruchstückhaft, er konnte, um die Gesetze zu erraten, Ideen zusammensetzen, die samt und sonders relativ nah am Experiment blieben; zwischen den Beobachtungen und den Tests war kein großer Abstand. Das war der erste Weg, der heute aber nicht mehr ohne weiteres in Frage kommt.

Der nächste, der Großes vollbrachte, war Maxwell, der die Gesetze der Elektrizität und des Magnetismus fand. Er stellte sämtliche von Faraday und anderen entdeckten Gesetze der Elektrizität zusammen, wobei sich zeigte, daß sie sich mathematisch nicht vertrugen. Um das in Ordnung zu bringen, mußte er in eine Gleichung einen zusätzlichen Term einfügen. Dazu erfand er für sich ein Modell von Zwischenrädern und Getrieben und so weiter im Raum, das niemandem einleuchtete, weshalb sich auch kaum ein Mensch um das neue Gesetz kümmerte. Wir glauben heute ebensowenig an die Zwischenräder; nichtsdestotrotz sind die Maxwellschen Gleichungen korrekt. Mag die Logik, die Maxwell zu seiner Einsicht führte, auch falsch sein, die Antwort jedenfalls stimmt.

Völlig anders war die Lage bei der Entdeckung der Relativitätstheorie. Zu dieser Zeit häuften sich in der Physik die Paradoxe; die bekannten Gesetze führten zu widersprüchlichen Ergebnissen. In dieser Situation schlug Einstein neue Pfade des Denkens ein, eines Denkens, das von den möglichen Symmetrien der Gesetze ausging. Erschwerend kam damals die Entdeckung hinzu, daß etwas, was so lange gültig erschienen war wie die Newtonschen Gesetze, am Ende dennoch falsch sein konnte. Ebenfalls schwer zu akzeptieren war, daß die

überkommenen Vorstellungen von Zeit und Raum, die man instinktiv als richtig empfunden hatte, falsch sein sollten.

Die Quantenmechanik wurde auf zwei voneinander unabhängigen Wegen entdeckt – was uns zur Lehre dienen sollte. Auch hier wieder (sogar mehr noch als zur Zeit der Entdeckung der Relativitätstheorie) war die Physik mit ihren Experimenten zuvor auf eine Unzahl von Widersprüchen gestoßen, die man sich absolut nicht mit Hilfe von etwas Bekanntem erklären konnte. Nur bedeutete das in diesem Fall nicht, daß man zuwenig wußte, sondern im Gegenteil, daß man zuviel wußte. Die Vorhersagen erfüllten sich nicht. Den Ausweg aus dieser Situation wiesen Schrödinger*, der die mathematische Formel vermutete, und Heisenberg, der die Ansicht vertrat, man müsse analysieren, was meßbar ist. Diese beiden verschiedenen philosophischen Methoden führten letzten Endes zur selben Entdeckung.

Wieder etwas anders gelagert war die Situation bei der Entdeckung der bislang unvollständig erkannten Gesetze des schwachen Zerfalls in jüngerer Zeit, bei dem ein Neutron (Sie erinnern sich?) in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt. Dies war ein Fall von unvollständigem Wissen, und bis heute wurde nur die mathematische Formel erraten. Diesmal jedoch bestand die Schwierigkeit darin, daß sämtliche Experimente falsch waren. Wie aber kann man die richtige Antwort erraten, wenn das Resultat, nachdem man es berechnet hat, nicht mit den Experimenten übereinstimmt? Allerdings braucht man eine Menge Mut, um den Schwarzen Peter den experimentellen Physikern zuzuschieben. Woher man den nimmt, werde ich später erklären.

Heute haben wir keine Widersprüche – vielleicht. Dafür haben wir dieses Unendlich, das plötzlich auftaucht, wenn man alle Gesetze zusammennimmt. Doch es wird unter den Teppich gekehrt, und zwar so geschickt, daß man manchmal ge-

* Erwin Schrödinger, 1887–1961, österreichischer Physikertheoretiker, erhielt 1933 zusammen mit Paul Dirac den Nobelpreis.

neigt ist, es gar nicht ernst zu nehmen. Auch in unserem Fall sagt uns die Tatsache, daß wir alle diese Elementarteilchen entdeckt haben, nichts, außer daß unser Wissen lückenhaft ist. Ich glaube nicht, daß sich die Geschichte in der Physik wiederholt, und ein Blick auf die angeführten Beispiele scheint diese Meinung zu bestätigen. Der Grund dafür liegt darin, daß Möglichkeiten, wie sie Vorschläge wie »denk an die Symmetriegesetze« oder »fasse die Information in eine mathematische Formel« oder »errate die Gleichung« beinhalten, heutzutage jedermann bekannt sind und ständig ausprobiert werden. Wenn man steckenbleibt, muß die Ursache demnach in einer anderen Richtung zu suchen sein. Jedesmal, wenn wir durch zu große Schwierigkeiten, zu viele Probleme in die Klemme geraten, liegt es daran, daß wir uns noch immer der alten Methoden bedienen. Das nächste Schema, die neue Entdeckung, wartet auf einem gänzlich anderen Weg. Mithin erweist sich ein geschichtlicher Rückblick als wenig hilfreich.

Noch ein Wort zu Heisenbergs Erkenntnis, nicht über das zu reden, was man nicht messen kann, die gern zitiert, jedoch selten wirklich verstanden wird. Man kann sie dahingehend interpretieren, daß man nur solche Konstruktionen oder Erfindungen machen soll, deren berechenbare Folgen sich mit Experimenten vergleichen lassen – soll heißen, daß man nicht eine Konsequenz berechnet wie »ein Mu muß drei Gus sein«, wenn niemand weiß, was ein Mu oder ein Gu sein soll. Das bringt offensichtlich nichts. Lassen sich die Folgen dagegen mit dem Experiment vergleichen, so genügt das vollauf. Dabei kommt es auf ein paar Mus oder Gus nicht an. Dann können Sie soviel davon in Ihre Gleichungen packen, wie Sie wollen, vorausgesetzt, das, was daraus folgt, läßt sich mit dem Experiment vergleichen. Dieser Unterschied wird nicht immer ganz klar. Häufig bekommen wir zu hören, wir dehnten die Idee der Teilchen und Bahnen und so fort ungerechtfertigt auf den Bereich des Atoms aus. Keineswegs. An einer solchen Ausweitung ist nicht nur nichts Ungerechtfertigtes. Sie ist vielmehr genau das, was wir tun müssen und tun sollten und

auch immer tun: etwas so weit wie möglich über Bekanntes, über bereits vorhandene Begriffe hinaus ausweiten. Gefährlich? Ja. Ungewiß? Ja. Und doch ist es der einzige Weg zum Fortschritt. So ungewiß dieser Weg ist, so gewiß ist, daß ihn die Naturwissenschaft einschlagen muß, will sie sich nützlich machen. Denn nützlich wird die Wissenschaft nur, wenn sie uns etwas über Experimente sagt, die noch nicht durchgeführt worden sind. Es bringt nicht viel, wenn sie sich auf die Beschreibung schon durchgeführter Versuche beschränkt. Sie muß die Begriffe über den Bereich hinaus ausdehnen, in dem sie bereits getestet wurden. Nehmen Sie beispielsweise das Gravitationsgesetz, das zur Erklärung der Planetenbahnen entwickelt wurde. Was, wenn sich Newton mit der Feststellung begnügt hätte, »Jetzt begreife ich die Planeten«, und nicht versucht gewesen wäre, die Gravitation mit der Anziehungskraft der Erde auf den Mond zu vergleichen? Und wenn der Mensch unserer Tage nicht gesagt hätte: »Vielleicht hält die Schwerkraft sogar die Galaxien zusammen«? Wir müssen eine solche Möglichkeit in Betracht ziehen. Gewiß könnten Sie dagegen einwenden: »In der Größenordnung von Galaxien ist, da wir nichts darüber wissen, alles denkbar.« Das stimmt zwar, aber es gibt keine Wissenschaft, die eine solche Einschränkung hinnähme. Möglich, daß wir die Galaxien letztlich nicht verstehen können. Auf der anderen Seite ist die Annahme, daß alles auf bekannte Gesetze zurückgeht, ausgesprochen borniert und durch Experimente schnell über den Haufen geworfen. Worauf wir ausgehen, sind gerade solche Hypothesen, die klar umrissen und mit dem Experiment leicht zu vergleichen sind. Im übrigen gibt es im Verhalten der Galaxien bis jetzt nichts, was gegen eine solche Vermutung spräche.

Oder nehmen wir ein anderes, noch interessanteres und wichtigeres Beispiel: Die Vermutung, daß sich alle Aktivitäten der Tiere auf atomarer Ebene erklären lassen, daß sich die Erscheinungen der biologischen Welt, ohne »äußeres Zutun«, auf das Verhalten physikalischer und chemischer Phänomene

zurückführen lassen – ist wohl die bedeutendste, für den Fortschritt der Biologie förderlichste Annahme. Akzeptiert man nämlich den Krethi-und-Plethi-Standpunkt: »Im Bereich des Lebendigen ist alles möglich«, werden wir Lebewesen nie verstehen lernen. Zugegeben, es ist wirklich nicht leicht zu glauben, daß sich die schlängelnden Bewegungen der Fangarme der Kraken in letzter Instanz auf Atome zurückführen lassen sollen, die sich nach den bekannten physikalischen Gesetzen austoben. Nichtsdestotrotz lassen sich auf der Grundlage dieser Hypothese ziemlich genaue Prognosen über die Arbeitsweise dieser Tentakeln aufstellen. Und das bedeutet doch einen großen Fortschritt im Verständnis des Lebendigen. Bis jetzt jedenfalls hat der Krake seine Fangarme noch – soll heißen, konnte man die Annahme nicht als irrig zurückweisen.

Kurzum, Vermutungen anzustellen ist keineswegs unwissenschaftlich, auch wenn viele Nichtwissenschaftler das annehmen scheinen. Vor einigen Jahren unterhielt ich mich einmal mit einem Laien über fliegende Untertassen, über die ich als Wissenschaftler ja alles wissen muß! »Ich glaube nicht, daß es so etwas gibt«, erklärte ich. Worauf mein Gegenüber sofort nachhakte: »Ist es unmöglich, daß es fliegende Untertassen gibt? Können Sie beweisen, daß es unmöglich ist?« »Nein«, entgegnete ich, »beweisen kann ich das nicht. Aber es ist äußerst unwahrscheinlich.« Darauf er: »Sie sind sehr unwissenschaftlich. Wie können Sie behaupten, daß es unwahrscheinlich ist, wenn Sie nicht beweisen können, daß es unmöglich ist?« Genau das aber *ist* der Weg der Wissenschaft. Die Wissenschaft sagt lediglich, was wahrscheinlicher und was unwahrscheinlicher ist, und vergeudet ihre Zeit nicht damit, beweisen zu wollen, was möglich und was unmöglich ist. Ich hätte ihm auch präziser antworten und sagen können: »Nun hören Sie mir einmal gut zu. Nach allem, was ich von der Welt um mich weiß, halte ich es für weitaus wahrscheinlicher, daß die Berichte über die fliegenden Untertassen ein Ausfluß der bekannten irrationalen Züge terrestrischer Intelligenz sind, als daß unbekannte rationale Bemühungen extraterrestrischer

Intelligenz dahinter stecken.« Weitaus wahrscheinlicher, nicht mehr. Immerhin spricht einiges für diese Vermutung. Und wir sind stets bestrebt, die wahrscheinlichste Erklärung zu erraten, wobei wir uns doch immer bewußt bleiben, daß wir, falls es nicht klappt, auch die anderen Möglichkeiten in Betracht ziehen müssen.

Wie aber können wir erraten, was wir beibehalten und was wir ausklammern sollen? Mit all den hübschen Prinzipien und bekannten Fakten befinden wir uns in der Zwickmühle: Entweder wir erhalten unendlich, oder die Beschreibung genügt nicht – irgend etwas fehlt. In manchen Fällen bedeutet das, daß wir eine Idee verwerfen müssen; zumindest in der Vergangenheit hat es sich noch immer gezeigt, daß wir die eine oder andere für wesentlich gehaltene Vorstellung über Bord werfen mußten. Die Frage ist nur, was wirft man weg und was behält man. Alles wegwerfen hieße wohl etwas zu weit gehen; dann bliebe uns nicht mehr viel, womit wir arbeiten könnten. Und die Erhaltung der Energie zum Beispiel macht sich doch ganz gut; ich jedenfalls möchte sie nicht missen. Zu erraten, was man behalten und was man besser ausklammern sollte, erfordert viel Fingerspitzengefühl. Gegenwärtig ist es vielleicht bloß eine Frage des Glücks; aber wie die Dinge liegen, werden wir eine beträchtliche Geschicklichkeit entwickeln müssen.

Wahrscheinlichkeitsamplituden sind etwas recht Sonderbares und kommen Ihnen auf den ersten Blick sicher reichlich verrückt vor. Und doch funktioniert alles, was sich aus der Idee der Existenz der uns so befremdlich anmutenden quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsamplituden ableiten läßt, mit der langen Liste sonderbarer Elementarteilchen hundertprozentig. Deshalb glaube ich nicht, daß sich diese Ideen als falsch erweisen werden, wenn wir den inneren Aufbau der Welt einmal besser durchleuchten können. Dieser Teil wird meiner Ansicht nach Bestand haben, aber das ist nur eine Vermutung. Und ich schildere Ihnen hier, wie ich bei meinen Vermutungen vorgehe.

Andererseits halte ich die Theorie von der Kontinuität des

Raums für falsch, weil wir immer wieder dieses Unendlich erhalten und zudem auf andere Schwierigkeiten stoßen; ebenso wenig wissen wir bis jetzt, was die Größe all dieser Teilchen bestimmt. Ich vermute, daß sich die einfachen Begriffe der Geometrie nicht ohne weiteres auf den unendlich kleinen Raum übertragen lassen. Damit mache ich freilich nur ein Loch, ohne es wieder zu stopfen. Wüßte ich einen Ersatz für diese Theorie, würde ich diese Vorlesung mit einem neuen Gesetz beenden.

Nun haben einige Leute die Unverträglichkeit aller Prinzipien zum Anlaß genommen, uns zu empfehlen, alle Gesetze zusammenzunehmen und äußerst sorgfältig zu rechnen; dann, so meinen sie, würden wir, da es ja nur eine mögliche folgerichtige Welt gibt, nicht nur die Prinzipien ableiten können, sondern auch entdecken, daß es die einzig möglichen Prinzipien sind, wenn das Ganze folgerichtig bleiben soll. Wahrhaftig ein großer Auftrag! Mir kommt es so vor, als sollte der Schwanz mit dem Hund wedeln. Mir scheint, ein paar Dinge müßten wir schon für gegeben nehmen – vielleicht nicht alle über 50 Teilchen, doch einige wie die Elektronen und so fort. Fügt man dann noch alle Prinzipien hinzu, ergeben sich, vermutlich in direkter Folge, die großen Komplikationen. Aber daß man allein mit Argumenten über die Folgerichtigkeit auskommen kann, glaube ich nicht.

Vor ein anderes Problem stellen uns die partiellen Symmetrien. Was haben sie eigentlich zu bedeuten? Jedenfalls ist es äußerst irritierend, daß beispielsweise Neutronen und Protonen beinahe dasselbe sind, nicht jedoch für die Elektrizität, oder daß das Gesetz der Reflexionssymmetrie bis auf eine bestimmte Reaktionsart ausnahmslos gilt. Etwas ist fast symmetrisch, aber nicht ganz und gar. Nun gibt es zu diesem Punkt zwei Schulen. Der einen zufolge ist die Sache ganz einfach: In Wirklichkeit sind die Dinge symmetrisch, erhalten aber durch eine kleine Komplikation diese Aufweichung. Der anderen zufolge, die nur einen Vertreter hat, nämlich mich, könnte die Sache kompliziert sein und erst durch die Komplikationen

einfach werden. Die Griechen hielten die Planetenbahnen für Kreise. In Wirklichkeit jedoch sind es Ellipsen. Sie sind nicht ganz symmetrisch, kommen aber einer Kreisbahn sehr nahe. Nun erhebt sich die Frage, warum kommen sie Kreisen so nahe? Warum sind sie fast symmetrisch? Wegen der langen, komplizierten Wirkung der Gezeitenreibung – eine sehr komplizierte Vorstellung. Möglicherweise ist die Natur im Kern in diesen Dingen komplett unsymmetrisch und erhält diesen beinahe symmetrischen Anstrich, der Ellipsen als Fast-Kreise erscheinen läßt, erst durch die vielschichtige Wirklichkeit. Auch eine Möglichkeit; aber niemand weiß es, alles ist nur Vermutung.

Angenommen, Sie haben zwei Theorien, A und B, mit unterschiedlichen Vorstellungen, unterschiedlicher psychologischer Auswirkung und so weiter, die aber, wenn man ihre Konsequenzen berechnet, genau dieselben Folgen haben. Diese sollen übrigens mit den Experimenten übereinstimmen. So unterschiedlich sich also die beiden Theorien zunächst anhören, führen sie doch zu genau denselben Konsequenzen, was mathematisch gewöhnlich leicht zu beweisen ist, indem man zeigt, daß die Logik aus A und B stets entsprechende Folgen ergibt. Angenommen also, wir haben zwei solche Theorien – wie wollen wir entscheiden, welche richtig ist? Die Wissenschaft weiß keinen Weg, da ja beide in gleichem Maße mit dem Experiment übereinstimmen. So können also zwei Theorien trotz unterschiedlichster Vorstellungen mathematisch identisch sein, und die Wissenschaft weiß kein Mittel, sie zu unterscheiden.

Aus psychologischen Gründen dagegen, das heißt im Hinblick auf die Vermutung neuer Theorien, können die beiden Aussagen alles andere als gleichwertig sein, da die Gedanken jeweils in eine andere Richtung gelenkt werden. Bringen sie nämlich die Theorie in eine bestimmte Art von Rahmen, zuckt Ihnen ein Gedanke durch den Kopf, was Sie ändern könnten. Zum Beispiel ist in Theorie A etwas, was etwas über etwas aussagt, und Sie spießen es auf und sagen: »Diese Idee

hier will ich ändern.« Herauszufinden, was Sie entsprechend in B ändern müssen, ist gar nicht so einfach. Im Gegenteil kann es sogar sein, daß Sie hier nicht nur eine Idee ändern müssen. Mit anderen Worten, obwohl beide Theorien vor der Veränderung identisch waren, kann sich im einen Fall eine Veränderung als ganz natürlich anbieten, die im anderen Fall alles andere als natürlich erscheint. Deshalb müssen wir sämtliche Theorien im Kopf behalten. In der Tat hat ein theoretischer Physiker, der etwas taugt, ständig sechs oder sieben verschiedene theoretische Darstellungen für ein und dasselbe Problem parat. Natürlich weiß er, daß sie gleichwertig sind und niemand je entscheiden können wird, welche auf dieser Ebene richtig ist, dennoch speichert er sie samt und sonders in der Hoffnung, daß sie ihn, was die Aufstellung neuer Vermutungen angeht, auf verschiedene Fährten setzen werden.

Das bringt mich zu einem anderen Punkt, nämlich daß sich die Philosophie oder die Ideen hinter einer Theorie bereits durch winzig kleine Änderungen an dieser Theorie enorm verändern können. Beispielsweise stimmten Newtons Vorstellungen von Raum und Zeit mit den Experimenten sehr gut überein. Dennoch war, um die wahrhaft winzige Korrektur der Merkurbahn anzubringen, eine enorme Änderung im Kern der Theorie erforderlich. Der Grund liegt gerade in der Einfachheit und Vollkommenheit der Newtonschen Gesetze mit ihren definitiven Ergebnissen. Um diese Ergebnisse auch nur um eine Winzigkeit zu ändern, mußte an einem gänzlich anderen Ansatz angefangen werden. Bei der Formulierung eines neuen Gesetzes kann man nicht an etwas Vollendetem einfach ein bißchen herumpfuschen; man muß seinerseits etwas Vollendetes schaffen. Kein Wunder also, daß zwischen der Newtonschen und der Einsteinschen Gravitationstheorie enorme philosophische Unterschiede bestehen.

Was aber hat man unter diesen Philosophien zu verstehen? Sie sind raffinierte Methoden, die Folgen schnell zu berechnen. Eine Philosophie, gelegentlich auch als Einsicht in die Gesetze bezeichnet, ist schlicht und einfach ein Rezept, wie

man die Gesetze im Gedächtnis behalten kann, um möglichst schnell die Folgen abzuschätzen. Einige meinen, und in Fällen wie den Maxwellschen Gleichungen ist der Rat gar nicht so schlecht: »Laß die Philosophie und alles dergleichen links liegen und geh stracks auf die Gleichungen los. Hauptsache ist, die Rechenergebnisse stimmen mit dem Experiment überein. Wozu überhaupt eine Philosophie oder eine Beweisführung oder irgendwelches Geschwätz über die Gleichung.« Das ist insofern nicht ganz von der Hand zu weisen, als man sich, wenn man nur auf die Gleichung abzielt, nicht in einem Vorurteil verrennt und somit die besseren Chancen beim Raten hat. Auf der anderen Seite kann die Philosophie diesen oder jenen Anstoß zum Raten geben. Kurzum, es ist schwer zu sagen.

Denjenigen, die überzeugt sind, daß nur eins zählt, nämlich die Übereinstimmung der Theorie mit dem Experiment, möchte ich eine fiktive Unterhaltung zwischen einem Maya-Astronomen und seinem Schüler zu bedenken geben. Vorausschicken möchte ich, daß die Maya Sonnenfinsternisse oder die Stellung von Mond oder Venus am Himmel mit großer Präzision vorausberechnen konnten, und zwar ausschließlich mit Hilfe der Arithmetik. Sie zählten und subtrahierten und so weiter und ließen den Mond Mond sein. Sie fragten nicht, was er war oder auf welcher Bahn er sich bewegte, sie begnügten sich damit, die Zeit einer Mondfinsternis zu berechnen oder das Einsetzen des Vollmonds und so weiter anzugeben. Nehmen wir nun an, ein junger Mann suchte den Astronomen auf und erklärte: »Ich habe eine Idee. Vielleicht sind die Gestirne da droben Kugeln aus etwas wie Felsgestein und laufen im Kreis herum, und wir könnten berechnen, wie sie sich wirklich bewegen, statt lediglich anzugeben, wann sie am Himmel erscheinen.« – »Mag schon sein«, antwortete der Astronom, »aber wie genau kannst du eine Mondfinsternis vorhersagen?« – »Bis jetzt«, entgegnete unser junger Mann, »habe ich meine Idee noch nicht sehr weit entwickelt.« Darauf der Astronom: »Dann vergiß sie. Wir können es sehr genau!

Also taugt unsere Mathematik viel mehr als deine Idee.« Diese Neigung, Leute, die mit neuen Ideen wie »Die Welt könnte doch auch so und so beschaffen sein« aufwarten, mit der Frage abzuspeisen: »Und wie lautet deine Antwort auf dieses ganz spezielle Problem?«, ist sehr weit verbreitet. Sagt der Neuerer dann: »Soweit bin ich noch nicht«, bekommt er zu hören: »Nun, wir sind schon viel weiter und erhalten sehr präzise Antworten.« Offensichtlich ist es gar nicht leicht zu entscheiden, ob man sich um die Philosophien hinter den Ideen kümmern soll oder nicht.

Ein anderer Weg besteht natürlich darin, neue Prinzipien zu erraten. So vermutete Einstein die Formel für die Idee, daß Energie und Masse stets proportional sein müssen und fügte sie allen anderen Gesetzen seiner Gravitationstheorie hinzu. Außerdem vermutete er, daß es keinen Unterschied macht, ob man sich in einem gleichmäßig beschleunigten Wagen oder in einem Gravitationsfeld befindet, und als er auch dieses Prinzip den anderen hinzufügte, gelang es ihm, die korrekten Gravitationsgesetze abzuleiten.

Nun haben Sie verschiedene Wege, wie man Vermutungen anstellen kann, kennengelernt. Abschließend möchte ich noch einige Anmerkungen zum Endergebnis machen. Allem voran erhebt sich die Frage, was können wir tun, wenn wir fertig sind und eine mathematische Theorie entwickelt haben, aus der man Folgerungen ziehen kann? Und da stoßen wir gleich auf etwas Erstaunliches. Um herauszufinden, was ein Atom in einer bestimmten Situation machen wird, stellen wir Regeln auf, halten sie auf Papier fest und geben sie einem Apparat mit allerlei Tasten und Schaltern ein, die nach einem komplizierten Mechanismus unterschiedliche Verbindungen öffnen und schließen, und das, was dabei herauskommt, ist eine Antwort auf unsere Frage, wie sich das Atom verhalten wird! Wenn wenigstens die Methode, nach der die Schalter betätigt werden, noch etwas mit dem Atommodell zu tun, wenn das Atom irgendwelche Schalter hätte, könnte ich mir immerhin einbilden, den Vorgang mehr oder weniger zu begreifen.

So wundere ich mich immer wieder, wie es möglich ist, etwas mit Hilfe der Mathematik vorauszusagen, die sich doch an Regeln hält, die mit dem, was in dem berechneten Ding vor sich geht, wirklich nichts zu tun haben. Die Vorgänge in der Natur sind zweifelsohne ganz anderer Art als das Betätigen von Schaltern.

Außerordentlich wichtig bei dem »Vermuten-Folgen berechnen-Mit dem Experiment vergleichen«-Spiel ist, daß man weiß, wann man auf der richtigen Fährte ist. Das ist sogar schon möglich, bevor man sämtliche Konsequenzen überprüft hat. Man erkennt die Wahrheit nämlich an ihrer Schönheit und Einfachheit. Nach zwei, drei kleinen Berechnungen kann man, wenn sich zeigt, daß man sich nicht eindeutig auf dem falschen Weg befindet, immer sicher sein, daß man mit seiner Vermutung richtig liegt. Bereits da kann man sehen, daß man den richtigen Weg eingeschlagen hat – das heißt, etwas Erfahrung gehört schon dazu –, und zwar daran, weil gewöhnlich mehr herauskommt, als man hineinsteckt. Man vermutet, daß etwas sehr einfach ist. Erweist sich die Vermutung nicht gleich als falsch, und wird die Sache einfacher als sie war, dann ist sie richtig. Auch Ahnungslose und Spinner und ähnliches Gelichter stellen einfache Vermutungen an, doch die sind auf Anhieb als falsch zu erkennen und zählen nicht. Unerfahrene Studenten wiederum stellen außerordentlich komplizierte Vermutungen an, die zunächst irgendwie richtig aussehen. Dennoch könnte ich ihnen sofort sagen, daß sie nicht stimmen, weil sich die Wahrheit stets als einfacher erweist, als man dachte. Was man zu dem Geschäft braucht? Vorstellungskraft, aber Vorstellungsvermögen in einer schrecklichen Zwangsjacke. Denn wir müssen eine neue Sicht der Welt finden, die einerseits mit allem Bekannten übereinstimmt und andererseits in ihren Vorhersagen irgendwo abweichen muß, da sie sonst uninteressant ist. In den abweichenden Punkten aber muß sie mit der Natur übereinstimmen. Gelingt es Ihnen, eine neue Sicht der Dinge zu entdecken, die mit der ganzen Bandbreite unserer Beobachtungen übereinstimmt, irgendwo aber

neue Pfade einschlägt, ist Ihnen ein großer Coup geglückt. Es ist nahezu, wenn auch nicht ganz unmöglich, eine Theorie zu finden, die sich mit dem gesamten Bereich der überprüften Theorien deckt und doch irgendwo neue Perspektiven eröffnet, selbst wenn diese Perspektiven dann nicht mit der Natur übereinstimmen sollten. Überhaupt eine neue Idee zu entwickeln, ist ungeheuer schwer. Das erfordert eine geradezu phantastische Vorstellungskraft.

Und wie sieht die Zukunft dieses Abenteuers aus? Was wird letzten Endes geschehen? Nun, wir werden weiter Vermutungen anstellen, weitere Gesetze erraten. Wie viele weiß ich nicht. Einige meiner Kollegen glauben, daß diese fundamentale Seite unserer Wissenschaft immer weiter ausgebaut werden wird, ich nicht. Ich glaube nicht, daß wir, sagen wir, noch weitere tausend Jahre ständig neue Entdeckungen machen werden. Auf die Dauer kann es nicht so weitergehen, daß ein Gesetz nach dem anderen entdeckt wird und eine Ebene unter der anderen zum Vorschein kommt. Selbst das würde mit der Zeit langweilig werden. Ich halte es für wahrscheinlich, daß wir in Zukunft entweder den Punkt erreichen, wo alle Gesetze bekannt sind – das heißt genügend, damit die berechneten Folgerungen durch die Bank mit dem Experiment übereinstimmen, was das Ende dieser Linie bedeutete – oder die Experimente immer schwieriger und kostspieliger werden, so daß 99,9 Prozent der Erscheinungen erklärt wären, ständig aber wieder etwas entdeckt würde, was nur sehr schwer zu messen wäre und aus dem bekannten Rahmen fiel. Kaum aber hätte man eine Erklärung für dieses Phänomen gefunden, würde schon das nächste auftauchen und das immer so fort, bis sich die Sache, die sich von mal zu mal mühseliger hinschleppte und uninteressanter würde, schließlich totgelaufen hätte. Auf die eine oder die andere Art, scheint mir, wird das Entdecken schließlich ein Ende nehmen.

Wir haben das große Glück, in einer Zeit zu leben, in der noch Entdeckungen gemacht werden. Es ist wie mit der Entdeckung Amerikas – es wird nur einmal entdeckt. Wir leben

im Zeitalter der Entdeckung der fundamentalen Naturgesetze – eine aufregende, eine wunderbare Zeit, die aber nicht wiederkehren wird. Natürlich wird die Zukunft dem Menschen weitere interessante Aufgaben bescheren, etwa die Verknüpfung der verschiedenen Ebenen der Erscheinungen – in der Biologie und so fort, oder, was die Forschung betrifft, die Erforschung anderer Planeten. Das, was wir heute tun, wird es jedoch nicht mehr geben.

Noch etwas anderes aber wird eintreten, wenn sich herausstellt, daß wir alles wissen oder die weitere physikalische Forschung höchst eintönig wird: Die lebendige Philosophie und die sorgfältige Beachtung all jener Dinge, über die ich gesprochen habe, wird nach und nach verschwinden. Die Philosophen, die mit ihren albernen Kommentaren immer draußen vor der Tür lauerten, werden hereindrängen, weil wir sie nicht mehr mit der Bemerkung verscheuchen können: »Wenn Ihr recht hättet, wären wir imstande, alle übrigen Gesetze zu erraten.« Denn wenn alle Gesetze auf dem Tisch liegen, werden sie auch für alle eine Erklärung parat haben. Beispielsweise mangelte es nie an Erklärungen für die Dreidimensionalität der Welt. Nun, es gibt nur eine Welt, und es läßt sich nicht so ohne weiteres sagen, ob diese oder jene Erklärung zutrifft oder nicht. Wenn aber alles bekannt wäre, dann gäbe es eine Erklärung, warum die bekannten Gesetze tatsächlich die richtigen sind. Gegen diese Erklärung jedoch könnten wir unter den gegebenen Umständen nicht mehr mit dem Argument ankämpfen, daß diese Art des Schlußfolgerns uns nicht erlaube weiterzumachen. So wird es zu einer Degenerierung der Ideen kommen, vergleichbar der, die die großen Forschungsreisenden zu beklagen haben, wenn die Touristen ein Gebiet zu erobern beginnen.

Unserer Zeit ist die Freude, die unerhörte Freude vorbehalten zu erraten, wie sich die Natur in einer bis dahin unbekannt Situation verhalten wird. Wir haben das große Glück, aufgrund unseres Wissens und unserer Experimente in einem bestimmten Arbeitsbereich erraten zu können, was in einem

bis dahin noch von keinem Menschen erforschten Bereich geschehen wird. Das unterscheidet unsere Arbeit bis zu einem gewissen Grad von den geregelt ablaufenden Forschungsarbeiten der Geografen insofern, als wir aus den alten Entdeckungen immerhin allerlei Hinweise auf das noch nicht entdeckte Land ableiten können, auch wenn sich die darauf gegründeten Vermutungen dann von dem bereits Erforschten vielfach stark unterscheiden und eine Menge neuer Überlegungen erforderlich machen.

Wieso ist es überhaupt möglich, daß wir von einem Teilbereich auf den Rest schließen können? Was besagt das über die Natur? Nun, das ist eine unwissenschaftliche Frage, die ich, da ich die Antwort nicht kenne, auch unwissenschaftlich beantworten möchte. Meiner Ansicht nach ist das möglich, weil die Natur einfach und darum von großer Schönheit ist.

Register

- Adams, John Couch 31
Antimaterie 132f.
Antineutrino 85, 96
Antiproton 81
Antiteilchen 81, 132
Äquivalenz von Energie und Masse
45f.
Astrologie 186
Atom(e) 118f., 184f.
Atomkern(e) 152, 184, 186f.
Axiome in der Mathematik 61f., 72
– in der Physik 62ff., 71
- Baryon 85
Baryonenzahl 85f.
–, Erhaltung der 85f.
Beschleunigung 25
Betazerfall 80, 85, 96, 128, 133, 137f.,
185
Bewegung, gleichförmige geradlinige
111ff., 118
Biologie 48
Bohr, Niels 96
Brahe, Tycho 22
Brownsche Bewegung 147
- Cavendish, Henry 40f., 47
Cavendish-Experiment, Messung der
Erdmasse 40f.
- Deduktion 60
Dicke, Robert Henry 42
Differentialrechnung 59
Dirac, Paul 74
Dirac-Gleichung 74
Doppelstern 32f.
Doppelspaltexperiment 161ff.
Drehimpuls 63, 98ff.
–, Erhaltung des 63f., 98f., 103
Drehung im Raum 110ff.
- Einstein, Albert 21, 32, 45f., 70, 82,
84, 90, 98, 115, 198, 206, 208
Elektrizität 43
Elektrolyse 49f.
elektromagnetisches Feld 85
elektromagnetische Wellen 114
Elektronen 79f., 85, 158, 160, 167ff.,
185, 188
Elektronenspin 128
Elementarteilchen 81, 85
Energie 45, 90, 98
–, potentielle 90, 92
Energieeinheiten 94f.
Energieerhaltungssatz 77, 88ff., 148
Energieformen 90f.
Entropie 150
Eötvös, Roland von 42
Erhaltung der elektrischen Ladung
79ff.
Erhaltungssätze 77ff., 101ff.
–, Zusammenhang mit
Symmetriegesetzen 102, 128ff.
Euklid 61, 75
- Fallgeschwindigkeit 28
Faraday, Michael 79, 198
Faradaysches Gesetz 49f.
Feldtheorien 66ff.

Fernwirkung 66
 Flächensatz 26
 –, Beweis des 55 ff.
 Fluktuation 143 f.
 Foucaultsches Pendel 121

 Galaxie 37 f.
 Galaxienhaufen 35, 38
 Galilei, Galileo 24 f., 28, 42, 120 f.
 Galileis »Turm zu Pisa Experiment«
 42
 Gammastrahlen 81
 Gesetze, physikalische 43, 46, 77 ff.,
 94, 110, 151
 –, Eigenschaften der 43, 46 f., 64
 –, Entdeckung neuer 30 f., 74 f., 87,
 105, 191 f.
 –, Grundgesetze der 49 ff.
 –, Gültigkeitsbereich der 65, 96 ff.
 –, Lokalität der 70 f.
 –, Symmetrie der 106 ff.
 –, zeitliche Umkehrbarkeit der 136 ff.
 Gezeiten 28 f.
 Gleichzeitigkeit 82 f., 116
 Goepfert-Mayer, Maria 189
 Gravitation 27, 37 ff., 43, 46 f., 98, 196
 –, Quantentheorie der 46, 196
 Gravitationsgesetz 20 ff., 53, 65 ff., 71,
 108 f., 113 f., 136 f.
 –, Anwendung des 39
 –, Geschichte des 21
 –, Gültigkeitsbereich des 32
 –, Tests des 40 ff.
 –, Universalität des 47
 Gravitationskonstante 40, 45
 Gravitationswellen 184
 Gravitonen 184

Hamiltonsches Prinzip s. Prinzip der
 kleinsten Wirkung
 Hebelgesetz 91 ff.
 Heisenberg, Werner 10, 176, 199 f.
 Helium 153
 Hoyle, Fred 153
 Hypnose 186

Impuls 98
 Impulserhaltung 98, 103
 Induktionsgesetz 100
 Intensität 165 ff.
 Interferenz 164, 166, 169

Jeans, James 75
 Jensen, Hans Daniel 189
 Jupiter 27
 Jupitermonde 30

Kausalität 69
 Kausalitätssatz 190
 Kepler, Johannes 22 ff.
 Keplersche Gesetze 23 f.
 Kernkräfte 186 ff.
 Kohlenstoffatom 153
 Koordinaten 110
 Kopernikus, Nikolaus 21 f.
 Kraft 25 ff., 66
 Kugelhaufen 34, 37 f.

Ladung
 –, Eigenschaften der 79 ff., 84 f.
 –, lokale Erhaltung der 82 ff.
 Lambda 85 ff.
 Lebewesen 94, 124 ff., 202
 Lee, Tsung-Dao 127
 Leptonenzahlen 86
 Leverrier, Urbain 31
 Licht 30, 45 f., 81, 158, 175, 184
 –, polarisiertes 123 ff.
 Lichtgeschwindigkeit 30, 70, 114 f.
 Links-Rechts-Symmetrie 101, 107,
 122 ff., s. a. Parität

Machsches Prinzip 122
 Masse 25 f., 97
 Materie 183
 –, Verhalten der 46
 Mathematik 48 ff.
 – auffassungen 60 f., 71
 –, Wesen der 54 f.

Maxwell, James Clerk 74, 114, 198
Mendelejew, Dmitrij I. 189
Merkur 32, 46
Mesonen
 K-Mesonen 85f.
 My-Mesonen 118, 187f.
 Pi-Mesonen 81, 86
Minimalprinzip s. Prinzip der
 kleinsten Wirkung
Minkowski, Hermann 117
Morrison, Philipp 126

Neptun 32
Neutrino 185, 188
Neutron(en) 80, 85, 96, 184ff.
Newton, Isaac 25ff., 40, 45, 47, 51,
 53, 58f., 64, 70, 97f., 113f., 193,
 198, 206
Newtonsches Gesetz 27, 31, 45, 50,
 66ff., 114, 193

Ordnung 141 ff.
–, hierarchische Ordnung der Welt
 154ff.

Parität 132, s. Links-Rechts-
 Symmetrie
Paritätsverletzung 127ff., 132
Pasteur, Louis 125
Periodisches System 119, 153, 189
Philosophiae naturalis principia
 mathematica (Newton) 58
Philosophie 69, 74f., 206f.
Photonen 158, 160, 167f., 175, 184
Poincaré, Jules Henri 115, 118
Positron 80f.
Potential 66f.
Principia mathematica s. Philosophiae
 naturalis principia mathematica
Prinzip der kleinsten Wirkung 69ff.,
 129ff.
Protonen 79ff., 85, 184f.
Pythagoras-Lehrsatz 61

Quantenmechanik 70, 101f., 119,
 131f., 158, 160ff., 176
Quantentheorie 46, 184
Quasare 95

Raketen 104
Raumspiegelung 122
Raumtranslation 107f., 130f.
Raum-Zeit, vierdimensionale 117
Reibung 93, 138, 147
Relativität 45, 113
Relativitätsprinzip 82, 112, 115f.
Relativitätstheorie 84
Römer, Olaus 30

Salpeter, Edwin 153
Schalenmodell 190
Schrödinger, Erwin 199
Schwerkraft s. Gravitation
Schwerpunkt 103 ff.
Skalentransformation 119ff.
Snow, Charles Percy 10, 75
Spiralnebel 34, 63f.
Stärke der elektrischen versus
 Schwerkraft 43 ff.
Sterne, Entstehung neuer 35f., 39f.
Strangeness 87
–, Erhaltung der 87
Supraleitfähigkeit 185
Symmetrie
–, bilaterale s. Links-Rechts-
 Symmetrie
–, partielle 189

Temperatur 150
Theorie der verborgenen Variablen
 179
Theorien, Richtigkeit von 192ff.
Trägheitsgesetz 25f.

Unendlichkeit 190
Universum, Expansion des 109
Unschärferelation 176f.

Unumkehrbarkeit der Naturabläufe
135 ff.

Weyl, Hermann 107
Wirkung 129 ff.

Vergangenheit 135

Yang, Chen Ning 127
Yukawa, Hideki 195

Wahrscheinlichkeit 177 ff.

Wahrscheinlichkeitsamplitude 169,
177, 203

Wasserstoff 152 f.

Wechselwirkung, starke 87, 188

Zeittranslation 108 ff., 132

Zentrifugalkraft 121

Zukunft 135