

Verständliche Wissenschaft

Vierzehnter Band
Die Relativitätstheorie

Von
Ludwig Hopf



Berlin · Verlag von Julius Springer · 1931

Die Relativitätstheorie

Von

Dr. Ludwig Hopf

Professor an der Technischen Hochschule
Aachen

1. bis 5. Tausend

Mit 30 Abbildungen



Berlin · Verlag von Julius Springer · 1931

ISBN-13:978-3-642-89073-4 e-ISBN-13:978-3-642-90929-0
DOI: 10.1007/978-3-642-90929-0

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1931 by Julius Springer in Berlin.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1931

Meinem hochverehrten Lehrer und Freund
Arnold Sommerfeld
gewidmet

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Vorbereitung.	
1. Kapitel. Die Bedeutung der Relativitätstheorie	I
Die Rolle der Mathematik. — Über Anschaulichkeit. — Die Bedeutung der Relativitätstheorie im naturwissenschaftlichen Denken. — Die Bedeutung der Relativitätstheorie innerhalb der Physik.	
2. Kapitel. Mechanisches und elektromagnetisches Weltbild	7
Grundgesetze der Mechanik. — Absolute und relative Bewegung. — Mechanisches Weltbild. — Elektromagnetische und optische Erscheinungen. — Grundvorstellungen Faradays und Maxwells. — Das System der Elektrodynamik. — Das Licht als elektromagnetische Erscheinung. — Maxwells Methode. — Elektromagnetisches Weltbild. — Elektronentheorie. — Übergewicht des elektromagnetischen über das mechanische Weltbild.	
II. Die spezielle Relativitätstheorie	
3. Kapitel. Der Widerspruch in den Experimenten	29
Die Frage nach der Bewegung des Äthers. — Experimentelle Fragestellung. — Fizeaus Versuch und Michelsons Versuch. — Die Versuchsanordnungen.	
4. Kapitel. Wo liegt der Widerspruch?	41
Gedankenexperimente. — Begriff der Zeitdauer und der Gleichzeitigkeit. — Synchrone Uhren.	
5. Kapitel. Die paradoxen Folgerungen	50
Zeitdauer eines Vorgangs. — Gleichzeitigkeit. — Räumliche Abmessungen. — Überlichtgeschwindigkeit. — Experimentelle Prüfung.	
6. Kapitel. Die Mechanik der Relativitätstheorie	58
Addition von Geschwindigkeiten. — Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit. — Erhaltung der Masse und Erhaltung der Energie. Zahlenwerte.	

	Seite
7. Kapitel. Allgemeine Betrachtungen zur speziellen Relativitätstheorie	68
Emissionstheorie des Lichtes. — Warum gerade die Lichtausbreitung? — Spezielle Relativitätstheorie und Weltbild. — Die vierdimensionale Welt.	
III. Die allgemeine Relativitätstheorie	76
8. Kapitel. Das Problem der allgemeinen Relativität . .	76
Naturgesetze in der speziellen Relativitätstheorie. — Übertragung auf allgemeine Bewegungen. — Erster Einwand.	
9. Kapitel. Mechanik und allgemeines Relativitätsprinzip	82
Widerspruch von der Mechanik her. — Mechanische Versuche. — Trägheitskraft. — Mechanik gegen Relativitätsprinzip. — Und dennoch!	
10. Kapitel. Trägheit und Gravitation	92
Träge und schwere Masse. — Äquivalenz von Gravitationsfeld und beschleunigter Bewegung. — Überwindung des Widerspruchs der Mechanik.	
11. Kapitel. Die Naturgesetze und das allgemeine Relativitätsprinzip	99
Lichtausbreitung im beschleunigten Laboratorium. — Lichtgeschwindigkeit und Lichtstrahlenkrümmung im Gravitationsfeld. — Relativitätsprinzip und Newtonsches Gravitationsgesetz. — Relativität der Masse. — Rotierende Körper.	
12. Kapitel. Zeitmessung	109
Aussagen der speziellen Relativitätstheorie. — Uhren im Gravitationsfeld. — Begriff des Gravitationspotentials. — Spektrallinien als Uhren. — Rotverschiebung. — Zwei Methoden der Zeitmessung.	
13. Kapitel. Geometrie und Gravitationsfeld	119
Raummessung im rotierenden Laboratorium. — Euklidische Geometrie und Wirklichkeit. — Die beiden Wege der Naturbeschreibung. — Nichteuklidische Geometrie. — Nochmals die beiden Wege.	
14. Kapitel. Das Gravitationsgesetz	131
Lichtstrahlen, Gravitationsfeld und Geometrie. — Die Methode der Invarianten. — Der physikalische Inhalt des Einsteinschen Gravitationsgesetzes. — Zusammenfassung.	
15. Kapitel. Blick auf das Weltganze	137
Unvollkommenheit der Theorie. — Die kosmologische Erweiterung der Theorie. — Die de Sittersche Kosmologie. — Noch einmal das Weltbild.	
Sachverzeichnis	146

I. Vorbereitungen.

Erstes Kapitel.

Die Bedeutung der Relativitätstheorie.

Nur selten haben Gedankengänge, die aus der Physik erwachsen sind und die im Grunde nicht aus dem für die Physik notwendigen Rahmen heraustreten, so stark auf das allgemeine Denken gewirkt und so tief die philosophisch interessierten Geister bewegt, wie das Ideengebäude der Relativitätstheorie, das sich seit 1905 immer mächtiger aufrichtet, im wesentlichen das Titanenwerk des einen Mannes, Albert Einstein.

In weiten Kreisen ist das Bedürfnis vorhanden, in diese Ideenwelt einzudringen oder wenigstens ihre Grundzüge zu erfassen; denn es scheint ein ungeheurer *revolutionärer* Geist von dieser Theorie auszugehen, die Jahrtausende alte, scheinbar feststehende Erkenntnisse verwirft und sichere, scheinbar unangreifbare Begriffe als unklar entlarvt. Die Erkenntnis-kritik sieht sich neuen Gedankengängen gegenüber, die das allgemeine Denken aufwühlen, so wie etwa die Ideen der Entwicklungslehre im 19. Jahrhundert. Aber da stellen sich nun dem Eindringen ungeheure *Schwierigkeiten* entgegen; so einfach intuitiv zu erfassen, wie die meisten anderen Ideen, welche von der Naturwissenschaft aus das allgemeine Denken ergriffen haben, sind diese Gedankengänge nicht; es sieht so aus, wie wenn sie nicht jedem ehrlich Bemühten zugänglich wären; und vor allem scheint über dem Eingang zu diesen Erkenntnissen das Wort zu stehen, mit dem schon Leonardo Lernbegierige warnte: „Wer nicht *Mathematiker* ist, der lese mich nicht!“

Die Rolle der Mathematik.

Reden wir zunächst von den Schwierigkeiten: Physikalische Theorien — und somit auch die Relativitätstheorie — ruhen auf *physikalischen* Ideen; sie arbeiten mit physikalischen Begriffen, die an der Erfahrung über Naturvorgänge sich gebildet haben, nicht etwa mit mathematischen Begriffen, die lediglich aus mathematischen Überlegungen herkommen und nur dem Mathematiker begreiflich sind. Die Mathematik dient nur dazu, um quantitative Folgerungen aus den physikalischen Ideen zu ziehen und um diesen eine *einfache* Form zu geben. Dies mag manchem Leser paradox klingen; denn die gute Hälfte der Menschheit hat eine abergläubische Scheu vor allem Mathematischen und sieht darin etwas unbezwinglich Schweres. Aber in der Tat wäre kein Menschengestalt imstande, die Konsequenzen einer physikalischen Idee bis in alle Einzelheiten zu überblicken, wenn nicht die wunderbaren Mittel der Mathematik existierten, durch welche eine solche Idee formalisiert und in ein allgemeines, einmal vorhandenes Schema eingepreßt werden kann. Man kann das *schwere* — für den Menschengestalt zu schwere — *physikalische Problem* auf ein *leichteres mathematisches* reduzieren und alle Zwischengedankengänge dort durchführen, um erst das Ergebnis wieder ins Physikalische zu übersetzen. Das ist im allgemeinen der Weg der theoretischen Physik. Und aus diesem Sachverhalt können wir hier eine Konsequenz ziehen, welche für jede populäre Darstellung physikalischer Theorien gilt: Wenn man auf mathematische Darstellung verzichtet (und das soll ja schließlich bei populärer Darstellung immer der Fall sein), so wird dadurch das Problem nicht erleichtert; es wird eine technische, aber keine sachliche Schwierigkeit aus dem Wege geräumt. Ein gleichwertiges Verständnis der physikalischen Zusammenhänge ist ohne die Hilfe der Mathematik *schwerer* zu erlangen; aber wer die Sprache der Mathematik nicht versteht, der kann trotzdem zum richtigen Verständnis gelangen. Nur eines muß bei jeder populären Darlegung vor Augen gehalten werden: eine wirkliche, *sachliche Schwierigkeit* kann durch noch so allgemein verständliche Darlegung

nicht aus dem Wege geräumt werden. Man könnte sie höchstens verschleiern; aber damit wäre das Ziel verfehlt. Will man zum Verständnis kommen, so muß die Schwierigkeit ins Auge gefaßt und überwunden werden, erst recht, wenn man auf die Hilfe der Mathematik verzichtet.

Über Anschaulichkeit.

In der Relativitätstheorie ist die Schwierigkeit eine besonders große, und gerade von der Art, daß sie bei Vermeidung mathematischer Symbole und Überlegungen besonders stark ansteigt. Dieser Punkt sei jeder weiteren Erörterung vorausgestellt; denn gerade hierin liegt meines Erachtens die große Bedeutung der Relativitätstheorie über die Physik hinaus.

Wir fordern von den Theorien, welche uns die Natur erklären und näherbringen und welche uns zur Beherrschung der Naturvorgänge verhelfen sollen, vor allem *Anschaulichkeit*. Das heißt: der unserm Geist zunächst unbegreifliche Naturvorgang soll durch ein Bild ersetzt werden, das uns vertraut ist, das womöglich unserer sinnlichen Erfahrung auf anderen Gebieten entnommen ist. Man denke an die Erfassung der optischen und der akustischen Erscheinungen durch das Bild der *Wellen!* Durch den Hinweis auf das an einer freien Wasseroberfläche Beobachtete gewannen die optischen und akustischen Theorien Anschaulichkeit, obwohl bei tieferem Eindringen nur eine gewisse Analogie mit den Wasserwellen übrigbleibt. Das einmal erfaßte Bild kann so modifiziert werden, daß es den optischen und akustischen Erscheinungen gerecht wird, ohne daß die Anschaulichkeit völlig verlorengelht; das bedeutet, daß die *Anschauung* von wellenartigen Vorgängen schließlich durch Aufnahme der optischen und akustischen Erscheinungen sich weit *über die ursprüngliche Anschauung* der Wasserwellen hinaus *ausdehnt*. Nicht nur das Anschauungsbild hat uns zum Verständnis der neuen Erscheinung verholfen, sondern auch die Erfahrungen an der neuen Erscheinung haben das Anschauungsbild erweitert und vertieft. Die Naturerscheinungen, die außerhalb der unmittelbaren sinnlichen Erfahrung liegen, werden zunächst durch

Bilder aus dieser Erfahrung gedeutet; aber das, was wirklich die Erscheinungen regelt, sagen wir einmal „die Naturgesetze“, hat mit diesen Bildern nichts zu tun; es mag ein reiner Zufall sein, daß in unserer täglichen Erfahrung eine Erscheinung (wie die Wasserwellen) liegt, welche als rohes Bild zum Verständnis dienen kann, um dann selbst durch die Erfahrungen modifiziert zu werden.

Aber *warum sollten die Naturgesetze immer so sein, daß sich ein solches Bild finden läßt?* Was haben die Naturgesetze mit unserer zufälligen alltäglichen Erfahrung zu tun? Was mit den Anschauungsbildern und den Begriffen, die sich im Menschen nach den Notwendigkeiten seines Alltags bilden, nicht nach den Gesetzen der Natur? Wir müssen also damit rechnen, daß nicht alle Erfahrungen sich ohne weiteres auch nur roh in Bilder einfügen lassen, die wir anschaulich nennen, weil unser Alltag sie uns darbietet. Die wahren, hinreichenden Bilder für die Naturgesetze gewinnen wir ja doch erst bei innigerer Vertrautheit mit allen Erscheinungen. Nur ein erstes Hintasten kann das Bild sein; von dem Wasserwellenbild bis zu dem Wellenbild, das uns die akustischen und optischen Erscheinungen restlos darstellt, ist ein weiter, mühevoller Weg, und am Ende dieses Weges steht die „Anschauung“ dieser Vorgänge, die vorher nichts weniger wie anschaulich waren. Aber in langer wissenschaftlicher Arbeit hat sich das Bild der Wellen selbst gewandelt, unsre Anschauungsfähigkeit hat sich vervollkommnet, unser Geist hat sich der Natur angepaßt; das ursprüngliche Bild ist belanglos geworden. Aus diesen Überlegungen folgt, daß wir „Anschaulichkeit“ im primitiven Sinn nicht von einer Theorie der Naturerscheinungen verlangen können; daß nicht die Natur sich nach unsrer Anschauung richtet, sondern daß unsre Anschauungsfähigkeit sich nach der Natur richten muß. *Unsre naturwissenschaftliche Arbeit ist ein großer Prozeß der Anpassung an die Natur.* Und im Laufe dieses Prozesses mögen Bilder und Begriffe, die uns anschaulich, ja die uns selbstverständlich sind, zu Schemen werden. Wollen wir uns der Natur anpassen und nicht die Natur vergewaltigen, so müssen wir unsern Geist und das, was sich in ihm als Begriffe im

„Kampf ums Dasein“ gebildet hat, vergewaltigen. Die Anschauung kann uns in vielen einfachen Fällen vorwärtsführen; wo aber die Wissenschaft tiefer an das Innere der Natur heranreicht, wo sie in Sphären dringt, die weit von unserer Alltagssphäre liegen, da kann es nötig werden, von unserer gewohnten Anschauung abzurücken und erst langsam bei tieferem Eindringen die neue Anschauung auszubilden, welche uns eine gewisse Klarheit über die Naturvorgänge vermittelt.

Die Bedeutung der Relativitätstheorie im naturwissenschaftlichen Denken.

An einer solchen Stelle unsrer Naturerkenntnis steht die *Relativitätstheorie*; sie führt uns von vertrauten Alltagsanschauungen zu einer tieferen, neuen Schau der Naturvorgänge, die zunächst fremdartig anmutet, aber zu einer größeren Erkenntnisfähigkeit hinführen muß. Daß dieser Prozeß nicht mit der Relativitätstheorie beginnt, sondern daß sie nur eine — vielleicht die entscheidende — Etappe auf einem lang vorher beschrittenen Weg zu einer neuen Naturschau ist, wird im nächsten Kapitel gezeigt werden. Hier soll nur klar hervorgehoben werden, daß in diesem Wandel der Anschauung die große Schwierigkeit beim Verständnis der Relativitätstheorie liegt, eine Schwierigkeit, die durch keine Darstellung beseitigt werden kann und die jeder Lernende neu in sich überwinden muß. Und diese Schwierigkeit wird nur größer, wenn auf mathematische Hilfe verzichtet wird; denn die *mathematische Formulierung endet nicht* mit unsrer Fähigkeit, etwas *anschaulich* zu erfassen; in mathematischen Symbolen können wir noch Dinge fassen, die sich unsrer Begriffsbildung und unsrer Sprache entziehen. Das ist das größte an der Mathematik, daß ihre Logik weit über unsre menschliche Denkfähigkeit hinausweist und das letzte Mittel ist, mit dem wir in die nicht menschlichen Tiefen der Natur vordringen können. Verzichten wir auf dieses Hilfsmittel, so müssen wir um so schärfer die gewohnten Begriffe ansehen und um so freier uns ihnen gegenüberstellen.

Der „gesunde Menschenverstand“ kann uns vielleicht in

allen menschlichen Angelegenheiten gut leiten, der Natur gegenüber versagt er, weil die Natur nicht nach den Gesetzen des menschlichen Lebens gebaut ist. Aber der Geist, der sich der Natur hingibt und sich an der Erfahrung von der Natur bildet, ist fähig, sich zum Begreifen des nicht Menschlichen an der Natur zu entwickeln.

Wer die Relativitätstheorie verstehen will, muß sich von vielen Denkgewohnheiten frei machen können; dieser Umstand gibt der Relativitätstheorie ihren *revolutionären* Charakter, vor allem in den Augen der Nichtphysiker. Und gewiß hat hier eine Umwälzung in unserm Denken stattgefunden; Begriffe wie Zeit und Raum, die vorher nur in der Philosophie, in der Erkenntniskritik, und zwar ohne Beziehung zur Naturwissenschaft ihre Rolle spielten, werden als physikalische Begriffe geprägt, bekommen einen anderen Sinn als in den früheren Untersuchungen. Die Domäne der Naturwissenschaft erscheint erweitert, und daß dies eine revolutionäre Tat ist, läßt sich nicht abstreiten. Es kann kein philosophisches Denken über Raum und Zeit in der Zukunft geben, das nicht die Ergebnisse der physikalischen Forschung mit einbezieht.

Die Bedeutung der Relativitätstheorie innerhalb der Physik.

Ganz anders ist aber die Stellung der Relativitätstheorie *innerhalb der Physik*; es ergäbe ein ganz verkehrtes Bild, wenn man in diesem Zusammenhang von einer Umwälzung der Begriffe, von einer Revolution sprechen wollte. Die Relativitätstheorie ist vielmehr — wie in den folgenden Ausführungen gezeigt werden wird — die Vollendung einer Bewegung, die bereits ein halbes Jahrhundert lang die größten Geister beschäftigt hat; sie gibt eine Lösung, und zwar eine zwangsläufige, eindeutige Lösung auf eine jahrzehntelang unlösbar scheinende Frage. Sie vollbringt schließlich die Vereinigung getrennter Ideenreihen und formt aus den überlieferten und durchgearbeiteten Gebieten der Physik ein in sich vollendetes *System* von einer *Klarheit*, die früher nie erreicht worden ist. Und dies geschieht in einer Zeit, welche

der spätere Geschichtsschreiber der Physik gewiß als die revolutionärste von allen Zeiten ansehen wird. Aber die große Revolution der Physik, welche alte Begriffe auflöst, feststehende Ansichten zertrümmert und einen ganz neuen Aufbau von unten herauf fordert (und vielleicht auch schafft), geht *nicht* von der *Relativitätstheorie* aus, *sondern* von der *Quantentheorie*, besser gesagt, von den unabweisbaren Erfahrungen, die zu dieser geführt haben. In diesem Sturm, der das Gebäude der Physik, ja das ganze Gebäude der naturwissenschaftlichen Erkenntnis erschüttert, steht unerschüttert gerade die Relativitätstheorie und die großartige Einheit, die durch sie der *klassischen Physik* zuteil geworden ist. Darum ist innerhalb der Physik die Relativitätstheorie keineswegs das revolutionierende, vielmehr das *konservative* Element, welches die alte Physik durch die Umwälzungen hindurch erhält und in das große Neue, das in diesem Jahrhundert aufwächst, hineinfügt.

Von der Quantentheorie und den damit zusammenhängenden Problemen soll in diesem Buche nicht weiter die Rede sein. Es soll gezeigt werden, aus welcher Lage der Physik die Relativitätstheorie erwachsen ist, welches ihre Grundgedanken sind und in welcher Weise sie das System der klassischen Physik abschließt. Um nicht allzusehr zu verwirren, soll immer der Grundgedanke im Auge behalten werden. Alle Einzelheiten, auch über die Experimente, alles Technische und Mathematische soll beiseite bleiben; es gibt ja viele schöne Bücher, welche das Material sehr ausführlich behandeln und die als Aufbau auf dieses Büchlein gelesen werden können.

Zweites Kapitel.

Mechanisches und elektromagnetisches Weltbild.

In der Entwicklung des physikalischen Weltbildes während des 19. Jahrhunderts treten vor allem zwei große Ideenkreise hervor. Der eine gruppiert sich um die Wärmelehre, die großen, alles beherrschenden Sätze und die teils daraus entstehende, teils im Gegensatz dazu sich durchsetzende Ato-

mistik. Diese ganzen Probleme können wir bei unsrer jetzigen Aufgabe aus dem Spiel lassen. Um so wichtiger ist der andere Ideenkreis, die *Wandlung des mechanischen zum elektromagnetischen Weltbild*.

Gestützt auf die großen Erfolge, welche die Newtonschen Begriffsbildungen vor allem im Verständnis der astronomischen Erscheinungen errangen, bildete sich im 18. Jahrhundert ein Lehrgebäude der *Mechanik* aus, das eine wunderbare Geschlossenheit zeigte, Naturvorgängen befriedigend gerecht wurde und reiche Anwendung in der Technik fand. Dieses Lehrgebäude schien das Fundament für die ganze Naturwissenschaft zu bilden; die mechanischen Gesetze schienen die tiefsten der Natur zu sein, und die Aufgabe der Naturwissenschaft schien darin zu bestehen, alle Erscheinungen der Natur — vielleicht auch der belebten — durch diese Gesetze zu verstehen, ihren mechanischen Charakter zu deuten. Diesem Anspruch auf den Rang der höchsten übergeordneten Naturgesetze können wir die Berechtigung entnehmen, von einem mechanischen „Weltbild“ zu sprechen. Welches sind seine Grundgesetze?

Grundgesetze der Mechanik.

In einem *leeren Raum*, der selbst ganz eigenschaftslos ist, bewegt sich *Materie*. Diese mag aus größeren oder kleineren Teilen bestehen. Die einzelnen Materieteilchen beeinflussen einander; sie üben Kräfte aufeinander aus, die als Stoß- oder Druckkräfte infolge der gegenseitigen Undurchdringlichkeit in der täglichen Erfahrung liegen. Sie wirken aber aufeinander auch, wenn sie sich nicht unmittelbar berühren, durch den leeren Raum hindurch; sie ziehen nach dem von Newton entdeckten Gesetz einander in ganz bestimmter Weise an, um so mehr, je mehr Materie sie enthalten und je näher sie einander sind. Diese Anziehung, eine *Fernkraft*, die durch den leeren Raum hindurch wirkt, ohne ein übertragendes Medium, ohne eine vermittelnde Materie, war für Newton selbst noch etwas Unbegreifliches; später gewöhnte sich die Anschauung an diese Begriffsbildung, und die Fernwirkung verlor ihren geheimnisvollen Charakter.

Wird nun auf ein Materieteilchen eine *Kraft* durch andere Materie — sei es als Fernwirkung, sei es durch Berührung — ausgeübt, so ändert sich sein Bewegungszustand in einer ganz bestimmten Weise, welche für unser Problem von fundamentaler Wichtigkeit ist. Es wird nämlich die Geschwindigkeit des Materieteilchens der Größe nach verändert oder in eine andere Richtung gezwungen (oder beides). Solange ein Teilchen sich selbst überlassen ist und nicht irgendwie von außen beeinflußt wird, solange muß es nicht etwa im Raum stillliegen. Es kann stillliegen oder sich mit *unveränderter Geschwindigkeit geradlinig* weiterbewegen; es kann nicht „von selbst“ langsamer werden oder schneller werden oder seine Richtung ändern. Solche Wirkungen können nur die Folge von äußeren Einflüssen sein, die von andern Materieteilchen ausgehen; wir nennen diese Einflüsse *Kräfte*. Man kann nun Versuche anstellen, dieselbe Kraft (etwa einer gespannten Feder) auf verschiedene Teilchen wirken lassen und die jeweilige Geschwindigkeitsänderung, die wir „Beschleunigung“ nennen, messen. Man findet, daß nicht immer dieselbe Beschleunigung eintritt, sondern daß sie nur halb so groß wird, wenn man das Materieteilchen etwa durch Hinzufügen eines ganz gleich beschaffenen verdoppelt. Newton faßte die experimentellen Ergebnisse in das *Grundgesetz der Mechanik* zusammen, das für unsre ganzen weiteren Betrachtungen von grundlegender Bedeutung ist:

Kraft gleich Masse mal Beschleunigung.

Das heißt: die Wirkung einer Kraft in Gestalt einer Beschleunigung hängt ab von einem Faktor, der die Menge der Materie mißt und den wir die *Masse* nennen, der z. B. doppelt so groß wird, wenn wir die Menge der Materie verdoppeln, was wir ja durch Hinzufügen eines ganz gleich beschaffenen Teilchens zu einem gegebenen Teilchen sehr exakt ausführen können. Da wir Kraft und Beschleunigung messen können — wie, kümmert uns hier nicht —, haben wir in diesem Gesetz ein Mittel in der Hand, um die Masse zu messen, die uns für die Menge der Materie charakteristisch ist.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Materie, die einen

integrierenden Bestandteil des mechanischen Weltbildes darstellt, ist ihre *Unzerstörbarkeit*. Die äußere Erscheinung mag sich ändern; die Materie kann ja in verschiedenen Formen, als Gas, als Flüssigkeit, als fester Körper, auftreten; sie kann auch chemisch in ganz verschiedener Weise zusammentreten. Immer muß sich die Materie erhalten, immer muß die Masse unverändert bleiben, und wenn ein Stück Materie alle Erscheinungsformen, einschließlich chemischer Verbindungen, durchläuft und wieder in ihren Anfangszustand zurückkehrt, bleibt die Masse immer dieselbe; sie wird nicht kleiner, nicht größer. Dieses Grundgesetz wird ja bekanntlich von der ganzen chemischen Wissenschaft bestätigt; wenn man eine bestimmte Menge Natrium und eine bestimmte Menge Chlor zu Kochsalz zusammentreten läßt, so hat dieses wohl keine Eigenschaft mehr mit den Ausgangsprodukten gemein, aber die Menge, welche man durch die Masse bestimmen kann, ist mit beliebiger Genauigkeit dieselbe.

Absolute und relative Bewegung.

An dem Newtonschen Grundgesetz ist aber noch ein Umstand für unsre weiteren Überlegungen von besonderer Wichtigkeit: Die *Geschwindigkeit* selbst geht in das Gesetz *nicht* ein, sie hat keine mechanische Bedeutung; nur die *Geschwindigkeitsänderung* tritt hier auf. Wenn also irgendein Körper sich gleichförmig und geradlinig bewegt, so wirken keine Kräfte auf ihn, er fühlt von dieser Bewegung nichts. Die gleichförmige geradlinige Bewegung relativ zum leeren Raum ist nicht merkbar, nicht meßbar, sie hat keinen physikalischen Sinn. Wenn wir von der Erde aus nicht durch den Weltraum andere Körper, nämlich die Himmelskörper, sehen könnten, so gäbe es keine Möglichkeit, die Bewegung der Erde im Weltraum festzustellen. Es hat eben gar *keinen Sinn, von einer Bewegung „im Weltraum“ zu reden*. Wir können nur sagen, die Erde bewege sich *relativ zu andern Weltkörpern*, etwa den Fixsternen.

Gibt es nur Bewegung von Materie gegen Materie, von Körper gegen Körper, nicht Bewegung von Materie gegen leeren Raum, so hat es auch keinen Sinn, von zwei relativ zu-

einander bewegten Körpern, den einen als bewegt, den andern als ruhend anzusehen. Es gibt *keine absolute Ruhe oder Bewegung*, nur Relativbewegung eines Körpers gegen den andern. Jedes Kind macht einmal mit Erstaunen die Beobachtung, daß es im Bahnhof nicht unterscheiden kann, ob der eigene oder der fremde Zug fährt, und vielleicht kommt jedem Kind bei einer Eisenbahnfahrt einmal der Gedanke: „Vielleicht liege ich still und die Welt fährt mir entgegen.“

Es muß hier ausdrücklich betont werden: Wir sprechen jetzt nur von gleichförmigen (d. h. unbeschleunigten) und geradlinigen Bewegungen. Nur von solchen können wir sagen, daß sie mechanisch bedeutungslos sind, und daß sie nur relativ zu einem andern Körper existieren. Ist ein Körper *beschleunigt*, so wirken *Kräfte* auf ihn, und an diesen können wir die Beschleunigung feststellen. Wir fühlen an dem Stoß sehr wohl, daß unser Zug zum Stehen gebracht wurde, auch wenn wir keine andern Körper sehen, also etwa die Fenster verdunkeln; wir merken auf einer Drehscheibe (Teufelsrad der Volksfeste!) sehr wohl, daß das Rad sich dreht, d. h. daß wir uns darauf zwar gleichförmig, aber nicht geradlinig bewegen. Dieser Unterschied der beschleunigten von der unbeschleunigten Bewegung liegt schon in dem Grundgesetz, das die Beschleunigung, aber nicht die Geschwindigkeit enthält. Eine Beschleunigung gegen den leeren Raum — wir nennen sie eine „*absolute*“ Beschleunigung — hat ihren Sinn, nicht aber eine geradlinige Geschwindigkeit gegen den leeren Raum, eine „*absolute*“ Geschwindigkeit. Dieser Punkt ist besonders wichtig für die Überlegungen, die später bei Besprechung der allgemeinen Relativitätstheorie angestellt werden; hier wollen wir nunmehr ausschließlich von geradlinig gleichförmiger Geschwindigkeit sprechen und feststellen, daß die *alte Mechanik* für eine solche Bewegung das Relativitätsprinzip ausspricht (oft „*Galileisches Relativitätsprinzip*“ genannt): *Es gibt keine absolute geradlinig-gleichförmige Geschwindigkeit, sondern nur Bewegung von Materie relativ zu Materie*. Alle Erscheinungen verlaufen gleich — oder anders ausgedrückt: alle Naturgesetze sind die gleichen — auf einem ruhenden und auf einem geradlinig-

gleichförmig bewegten Körper; denn es gibt ja kein Mittel, zu unterscheiden, welcher Körper absolut ruht, welcher absolut bewegt ist; es gibt nur Relativbewegung, und jeder der relativ zueinander (unbeschleunigt) bewegten Körper bzw. ein auf dem Körper sitzender Beobachter mag sich mit Fug und Recht für ruhend halten.

Damit hängt nun wieder ein andres wichtiges Gesetz zusammen, das man als *Additionstheorem der Geschwindigkeiten* bezeichnet; wir wollen uns hier auf den Fall beschränken, daß ein Körper aus zwei Ursachen zwei in der gleichen Richtung gelegene Geschwindigkeiten bekommt. Stellen wir uns etwa vor, ein Mensch stehe am Ufer eines Flusses; ein Schiff fahre mit einer bestimmten Geschwindigkeit vorbei, und auf dem Schiffsdeck bewege sich ein Mensch ebenfalls mit einer bestimmten Geschwindigkeit in der Fahrtrichtung oder der Fahrtrichtung entgegen. Welche Geschwindigkeit hat der Mensch auf dem Schiff relativ zu dem Menschen am Ufer? Offenbar die Summe von Schiffsgeschwindigkeit und Gehgeschwindigkeit, wenn er in der Fahrtrichtung marschiert, und die Differenz, wenn er entgegen der Fahrtrichtung marschiert. Wenn er z. B. entgegen der Fahrtrichtung gerade mit der Geschwindigkeit des Schiffes (relativ zum Ufer) wandert, so hat er relativ zu dem Menschen am Ufer die Geschwindigkeit Null, oder wie man sagt: er ruht relativ zu dem Beobachter am Ufer. Dies alles mag dem Leser trivial erscheinen; es ist uns aus der täglichen Erfahrung selbstverständlich geworden.

Mechanisches Weltbild.

Wenn wir nun vom *mechanischen Weltbild* der Physik reden, so meinen wir die Anschauung, wonach diese Grundgesetze der Mechanik die tiefsten Grundgesetze der physikalischen Welt darstellen sollen. Unzerstörbare Materie soll sich nach dem Newtonschen Gesetz bewegen, wobei die einzelnen Teile Fernkräfte aufeinander ausüben. Die wechselvollen Erscheinungen, welche uns die Erfahrung darbietet, wären auf solche einfachen Erscheinungen zurückführbar, wenn wir uns nur die richtige Vorstellung vom mechanischen Aufbau und

den Kräften bildeten. Das Programm der Physik wäre also das Herausarbeiten mechanischer Bilder für das Naturgeschehen. Und in der Tat läßt sich viel auf dieser Basis erreichen; wir haben ja eine Mechanik einzelner Körper, die aus kleinsten Teilen bestehen, und eine Mechanik kontinuierlicher Massen, wie Flüssigkeiten. Wir können die akustischen Erscheinungen, das ganze komplizierte Gebiet der Töne durch das rein mechanische Bild der Schwingungen von Körpern und der Schwingungen infolge Zusammendrückung und Wiederausdehnung des kontinuierlichen Mediums Luft verstehen. Wir können Erscheinungen der Wärme und die Eigenschaften der Gase durch das Bild frei fliegender und miteinander zusammenstoßender Atome erfassen. Wir finden in den chemischen Erscheinungen unzerstörbare kleinste Materieteilchen, die ganz spezifische Kräfte von der Art der Fernkräfte, wenn auch nicht nach so einfachen Gesetzen wie die Gravitation der Himmelskörper, aufeinander ausüben. Eine große Vielgestaltigkeit von Erscheinungen kann auf rein mechanischem Grunde entstehen. Die Zurückführung der ganzen Physik auf mechanische Bilder mußte nicht als Utopie erscheinen und wird heute noch von manchen Forschern für möglich gehalten.

Elektromagnetische und optische Erscheinungen.

Da wurde in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts unsre Kenntnis der physikalischen Welt um eine Erscheinungsgruppe bereichert, die sich aus wenigen schon früher bekannten Erfahrungen in unerwarteter Weise vergrößerte und einen immer mehr von den mechanischen Erscheinungen verschiedenen Charakter zeigte, die *elektrischen und magnetischen Phänomene*. Die einfachsten, zuerst bekannten Erscheinungen, die elektrische Ladung eines Körpers, die Abstoßung gleichartiger und Anziehung verschiedenartiger elektrischer oder magnetischer Pole, der elektrische Strom, dies alles, das hier als bekannt vorausgesetzt werden kann, war keineswegs fremdartig für ein an mechanischen Vorgängen geschultes Anschauungsvermögen. Ein Anziehungsphänomen lag ja in

der Gravitation schon vor; die Abhängigkeit von der Entfernung ist sogar in der Elektromagnetik dieselbe wie bei der Gravitation. Die Bilder des elektrischen „Stroms“ und der elektrischen „Spannung“ sind ja direkt aus der Mechanik entnommen. Aber was nun weiter hinzukam, war doch ganz andersartig; und die große Wandlung in unsrer physikalischen Gesamtanschauung ist eng verknüpft mit dem Namen Michael Faraday. Das wichtigste Phänomen, das er ans Licht brachte und das hier als typisch hervorgehoben werden soll, ist die *Induktion*: nähert man einem Magnetpol oder einem Stromkreis etwa einen Metalldraht, in welchem ein elektrischer Strom fließen kann, so entsteht ein solcher Strom dort, und zwar um so stärker, je rascher die Annäherung stattfindet; läßt man in zwei benachbarten Stromleitern den einen Strom wachsen oder fallen, so entstehen in dem andern Stromleiter Stromstöße, die in gesetzmäßiger Abhängigkeit von der *Änderung* des Stroms im ersten Leiter sind. Wir brauchen hier nicht auf Einzelheiten dieser und ähnlicher Erscheinungen einzugehen; das Wesentliche ist die schon Faraday gewordene Erkenntnis, daß hier nicht nur in den geladenen und Strom führenden materiellen Körpern etwas vorgeht, sondern daß der *Hauptträger dieser Vorgänge der Raum* zwischen den Körpern sein muß, und zwar ganz gleichgültig, ob dieser Raum mit Luft, d. h. mechanischer Materie, gefüllt oder ganz leer ist.

Und auf Faradays Schultern stand J. Clerk Maxwell, der die Einzelerkenntnisse und Grundanschauungen Faradays zu einem in sich geschlossenen System ausbaute und nun wohl den bedeutungsvollsten Schritt der Physik im letzten Jahrhundert tat: *er ordnete das Licht unter die elektrischen Phänomene ein*. Um die Bedeutung dieser Erkenntnis für unser jetziges Problem klarzustellen, müssen wir uns zunächst etwas mit den Theorien über die Natur des Lichtes befassen: Zwei Anschauungen stehen sich zunächst gegenüber, beide auf dem Boden der mechanischen Weltanschauung erwachsen; entweder das Licht besteht aus kleinen (unwägbar kleinen) Teilchen, welche vom aussendenden Körper nach allen Richtungen fortgeschleudert werden, oder das

Licht ist eine Wellenbewegung in einem den leeren Raum erfüllenden Medium, welche sich in diesem Medium mit einer bestimmten Geschwindigkeit fortpflanzt, genau wie der Schall in der Luft. Wir brauchen hier nicht auf die Experimente einzugehen, die den Wellencharakter des Lichtes zwingend erweisen. Für uns ist eine andere Erfahrungstatsache, welche für die zweitgenannte Auffassung spricht, von ungleich größerer Bedeutung, nämlich die *bestimmte, von Richtung, Geschwindigkeit des aussendenden Körpers und Wellenlänge (Farbe) unabhängige Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im leeren Raum*. Schon im 17. Jahrhundert hatte Olaf Römer aus astronomischen Messungen die Lichtgeschwindigkeit bestimmt und einen sehr großen, aber nicht etwa unendlich großen Wert gefunden. Und feinere, spätere, mit allen experimentellen Mitteln sichergestellte Experimente haben dies Resultat bestätigt: Das Licht pflanzt sich im leeren Raum mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/s fort, also mit einer alle damals bekannten anderen Geschwindigkeiten, selbst die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn um die Sonne um das Vieltausendfache übertreffenden Geschwindigkeit, die nur *eine Eigenschaft des leeren Raumes selbst ist*.

Es ergibt sich eine Analogie zwischen Schall und Licht insofern, als beide sich als Wellenbewegungen in einem Medium fortpflanzen, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die nur Eigenschaft des Mediums ist. Da man nun sehr schwer den Begriff einer „Eigenschaft des leeren Raumes“ bilden kann, führt diese Erfahrung unmittelbar zu der Vorstellung eines den ganzen Raum erfüllenden materiellen Körpers, welchen man „Äther“ nennt und welcher Träger der Lichterscheinungen ist. Der leere Raum hat hier aufgehört, wirklich leer zu sein, er hat eine Eigenschaft erhalten, und wenn auch der Äther nicht mit irgendwelchen materiellen Mitteln nachweisbar ist, so kann man sich ihn doch als eine Art Materie vorstellen, die sich nicht wesentlich von der uns bekannten Materie unterscheidet; er kann zwar weder die Eigenschaften eines festen Körpers noch die einer Flüssigkeit, noch die eines Gases haben; aber es mag ja noch ein anderer Aggregatzustand der Materie existieren.

Grundvorstellungen Faradays und Maxwells.

Die Schwierigkeiten, nun ein wirklich befriedigendes mechanisches Bild des Äthers zu zeichnen und so die Lichterscheinungen in das mechanische Weltbild einzuordnen — so wie es mit den Schallerscheinungen restlos geschehen ist —, sind nie ganz überwunden worden, wenn auch wohl niemand in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts an der Möglichkeit eines solchen Bildes gezweifelt haben mag. Da entstand — nachdem Faraday die Zusammenhänge schon gefühlt und gesucht hatte — in Maxwells Theorie der elektrischen Erscheinungen ein Gedankensystem, welches die optischen Phänomene vollständig (und damals restlos) umfaßte. Für das Verständnis der Relativitätstheorie ist von diesem Gedankensystem das Folgende von Wichtigkeit: Der Hauptträger der *elektromagnetischen Erscheinungen* ist der leere Raum, den wir uns deshalb, um präzisere Vorstellungen bilden zu können, von einem hypothetischen Stoff, dem „Äther“, erfüllt denken. Dieser Äther durchdringt auch alle Materie, so daß die elektrischen Vorgänge in der Materie ganz analog zu denen im leeren Raum verlaufen; die Art und Weise, wie die Materie auf die Vorgänge in dem sie durchdringenden Äther Einfluß nimmt, können wir als für unser Problem belanglos hier vollständig beiseite lassen. Im Äther wirkt ein elektrisches und magnetisches „Feld“; dies bedeutet so viel, daß in jedem Punkt des vom Äther erfüllten Raums ein beschreibbarer und durch Instrumente meßbarer Zustand existiert, der von Punkt zu Punkt veränderlich sein kann, so etwa wie eine Spannung in einem elastischen Medium (man denke etwa an ein deformiertes Stück Gummi, das in jedem Punkte mehr oder weniger stark angespannt ist) oder wie die Geschwindigkeit in einer strömenden Flüssigkeit. Wir brauchen diese *mechanischen Bilder* zunächst unbedingt, schon um überhaupt etwas bezeichnen und mit Worten beschreiben zu können. Man sagt, im ganzen Raum herrscht ein elektrisches oder ein magnetisches Feld, in jedem Punkte haben die elektrische bzw. die magnetische „Feldstärke“ eine gewisse, durch eine Maßzahl angebbare Größe und eine gewisse Rich-

tung (längs der aus der Technik wohl manchem Leser bekannten „Kraftlinien“). Bringt man an irgendeinen Punkt dieses Raumes einen elektrisch geladenen Körper oder einen Magnetpol, so treten die Anziehungen bzw. Abstoßungen auf, die dem Leser wohl bekannt sind. Diese „Feldwirkung“, die Wirkung von Punkt zu Punkt durch ein Medium hindurch, stellt sich der „Fernwirkungs“auffassung der Mechanik, von der oben die Rede war, gegenüber.

Es sei gestattet, nunmehr zur näheren Erklärung ein typisches Beispiel zu wählen, das die Vorgänge illustrieren und an Stelle einer allgemeinen Diskussion etwas Greifbares setzen mag:

M sei ein Eisenstab, der von einem Leitungsdraht D umschlungen sei. Fließt ein Strom durch diesen Draht, so wird bekanntlich der Eisenstab magnetisiert und ist vollkommen gleich einem Magneten; je nach der Richtung des Stromes im Draht wird links oder rechts der Nordpol liegen. Sendet man durch den Draht einen Wechselstrom, so wird offenbar an derselben Seite in raschem Wechsel ein Süd- oder Nordpol erscheinen, und die Wirkungen auf einen Magneten, der in der Nähe, etwa bei m , liegt, werden ständig wechseln. Nun liegt gleichfalls in der Nähe von M ein Metalldraht S , von dem wir zunächst annehmen, daß er in sich geschlossen sei. Er liege der Einfachheit halber gleichfalls so, daß die Achse des Stabes M durch seinen Mittelpunkt gehe.

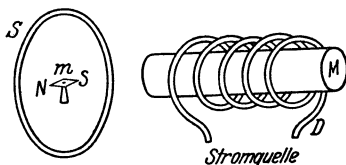


Abb. 1.
Elektromagnetische Induktion.

Fließt nun in D ein Gleichstrom, so wird M magnetisiert und zieht den einen oder den andern Pol von m an, übt aber gar keine Wirkung auf S aus, d. h. es fließt kein Strom in S (wobei von der Wirkung der elektrischen Ladungen auf D abgesehen wird). Man deutet dies nun so, daß man im ganzen Raum um M ein magnetisches Feld annimmt; die magnetische Feldstärke am Ort von m bewirkt die Anziehung oder Abstoßung der Pole von m ; eine elektrische Feldstärke gibt es nirgends. Fließt aber nun in D ein veränderlicher

Strom, etwa ein Wechselstrom, so ändert sich ständig das Magnetfeld, und diese *Veränderung des Magnetfeldes ruft nun überall ein elektrisches Feld hervor*, das man z. B. in dem Draht *S* durch den elektrischen Strom, den es erzeugt, wahrnehmen kann. Man nennt diese Erscheinung *Induktion* und kann das Gesetz etwa so formulieren: *Zeitliche Änderung des Magnetfeldes in einer Richtung (Achse von M) ruft ein elektrisches Feld hervor, das diese Richtung umschlingt, so wie der Draht S die Richtung der Achse von M umschlingt (Faradaysches Gesetz).*

Nun betrachten wir einen geraden *stromführenden Metalldraht* und untersuchen mit Hilfe eines kleinen Magneten,

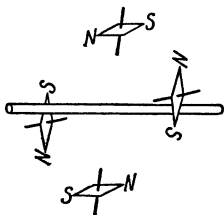


Abb. 2. Magnetfeld eines elektrischen Stromes.

ob in der Umgebung ein *magnetisches Feld* ist und welche Richtung es hat. Dieser Magnet stellt sich nun immer so ein, wie es in Abb. 2 dargestellt ist, d. h. er zeigt ein magnetisches Feld, welches den Strom umschlingt. Und hier können wir wieder ein mechanisches Bild gebrauchen: Wenn wir uns an Stelle des Drahtes einen Wirbelkern, etwa einen sich drehenden Körper, der die Flüssigkeit mitnimmt, denken, so bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen so um diesen Kern, wie die magnetischen Kraftlinien um den elektrischen Strom verlaufen (*Ampèresches Gesetz*).

Zu diesen beiden Gesetzen kommen noch die beiden Erfahrungsgesetze, daß die elektrische Kraft ihren Ursprung in *elektrischen Ladungen* hat, daß es aber *keine magnetischen Ladungen*, nur Magneten mit Nord- und Südpol, gibt.

Zu diesen beiden Gesetzen kommen noch die beiden Erfahrungsgesetze, daß die elektrische Kraft ihren Ursprung in *elektrischen Ladungen* hat, daß es aber *keine magnetischen Ladungen*, nur Magneten mit Nord- und Südpol, gibt.

Das System der Elektrodynamik.

Diese Erfahrungen und Gesetze können zum Fundament einer ganz für sich bestehenden Lehre von den elektromagnetischen Erscheinungen, einer „*Elektrodynamik*“, gemacht werden. Dabei wird nun als Hauptträger der ganzen Erscheinungsgruppe derselbe Äther angesehen, der auch für die optischen Erscheinungen verantwortlich gemacht wird. Infolgedessen hat schon Faraday einen Zusammenhang zwi-

schen Elektromagnetik und Licht vermutet, und in der Tat konnten Weber und Maxwell Zahlenbeziehungen zwischen elektrischen und optischen Größen finden. Aber eine Einbeziehung der optischen Erscheinungen ist auf dem geschilderten Fundament doch noch unmöglich, da das Entstehen und die Ausbreitung von Wellen nicht zu verstehen ist. Da tat Maxwell einen Schritt von entscheidender Tragweite, der uns hier einesteiis interessiert, weil dadurch die *Elektrodynamik* erstmalig zu einem gewissen *Abschluß* kam, andernteils aber auch wegen der *Methode*:

Die grundlegenden Gesetze zeigen in zweierlei Hinsicht einen Unterschied zwischen dem magnetischen und dem elektrischen Feld:

1. Es gibt elektrische Ladungen, aber keine magnetischen. Dies ist eine unumstößliche Erfahrungstatsache.
2. Wenn irgendwo im Raum infolge von Vorgängen in der Nähe die magnetische Feldstärke sich ändert, so wird ein elektrisches Feld induziert; wenn aber irgendwo im Raum sich die elektrische Feldstärke ändert, wird dann vielleicht auch eine magnetische Feldstärke induziert? Wir haben eine solche Wirkung des elektrischen *Stroms* kennengelernt. Wenn die Änderung der elektrischen Feldstärke im Äther gradeso wie ein elektrischer Strom wirken würde, dann würde ein höherer Grad von Symmetrie in den Grundlagen vorhanden sein.

Eine solche Induktion müßte etwa folgendermaßen vor sich gehen: Wenn der Körper *K*, etwa ein metallischer Leiter, elektrisch aufgeladen wird, so wird in der ganzen Umgebung, also auch an der Stelle, wo sich der kleine Magnet *NS* befindet, die elektrische Feldstärke geändert. Denn vor der Ladung war sie ja Null, und nach der Ladung hat sie den Wert, der aus den bekannten Anziehungs- und Abstoßungsgesetzen folgt. Während der Dauer der Aufladung ändert sich also die elektrische Feldstärke. Dies müßte

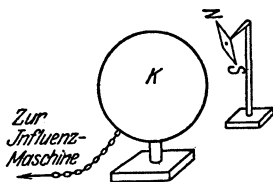


Abb. 3. Verschiebungsstrom.

nun, wenn die unter 2) genannte Wirkung eintreten sollte, eine bestimmte Einstellung, also eine Anzeige der Magnetnadel zur Folge haben. Aber dies Experiment kann man nicht anstellen — heute ebensowenig wie zu Maxwells Zeit —, weil die Wirkungen zu klein zur Messung sind; aus demselben Grund kann man aber auch nicht sagen, daß eine solche Induktionswirkung, die von einer Änderung der elektrischen Feldstärke herrühren könnte, der Erfahrung widerspreche.

So ließ sich denn Maxwell in dem Gebiet, das außerhalb der damaligen Versuchsmöglichkeiten lag, von dem *Wunsche nach Symmetrie der Grundgesetze*, von einem ganz formalen Bedürfnis *leiten* und nahm die Existenz einer derartigen Wirkung an: wo kein Leiter sich befindet, in welchem ein gewöhnlicher elektrischer Strom fließen kann, da soll eine Veränderung der elektrischen Feldstärke, ein sog. „*Verschiebungsstrom*“, genau dieselbe magnetische Wirkung haben wie ein gewöhnlicher elektrischer Strom.

Diese Hypothese gab dem ganzen Bild der elektromagnetischen Erscheinungen eine schöne Abrundung und Symmetrie; eine solche Annahme kann zunächst natürlich keine neuen Tatsachen ans Licht bringen; aber sie kann die alten Tatsachen von einer neuen Seite zeigen und durchsichtiger erscheinen lassen.

Das Licht als elektromagnetische Erscheinung.

Und so führte gerade diese Annahme des Verschiebungsstroms mit einem Schlag zu einer besonderen Klarheit über die Gesamtheit der elektrischen *und optischen* Erscheinungen. Nun konnte man einfach aussprechen, daß die elektromagnetische Induktion sich im leeren Raum fortpflanzt. Denn danach bringt eine Änderung der elektrischen Feldstärke an irgendeiner Stelle des leeren Raumes ein Magnetfeld hervor. Dies Magnetfeld aber ändert auch seine Stärke; denn es war ja vorher Null und ist infolge der Änderung des elektrischen Felds gewachsen. Dieses veränderliche Magnetfeld muß also nach seinen Induktionsgesetzen seinerseits ein elektrisches Feld erzeugen, dieses dann wieder ein magnetisches usw. So erzeugt nun insbesondere ein wechselndes elektrisches Feld,

das etwa als Wechselstrom in einem Leiter vorhanden ist, durch Induktion in seiner Umgebung ein Magnetfeld; dies Magnetfeld erzeugt wieder ein elektrisches Feld usw., und die gegenseitige Induktion schreitet durch den Äther fort. Und zwar schreitet sie — wie aus den elektrischen Induktionserscheinungen allein geschlossen werden kann — *gerade mit der Lichtgeschwindigkeit* fort. *Das Licht ist also nichts anderes wie die elektromagnetische Induktionserscheinung bei raschem Wechsel*, wesensgleich mit den Vorgängen beim Wechselstrom; nur daß beim Wechselstrom bei etwa 50 Hin- und Herschwingungen in der Sekunde die Vorgänge im Äther schwer zu beobachten, die Vorgänge im erzeugenden elektrischen System die Hauptsache sind, während beim Licht, bei einigen tausend Billionen Schwingungen in der Sekunde, die Äthervorgänge der Beobachtung zugänglicher sind als die erzeugenden Systeme.

Allgemein bekannt ist die großartige Konsequenz dieser Anschauung für die *Technik*: die Entdeckung der elektrischen Wellen, der drahtlosen Telegraphie usw.; man suchte und fand die Wechselvorgänge und ihre elektromagnetische Induktion im Gebiet der Schwingungen von 50 in der Sekunde bis tausend Billionen in der Sekunde. Diese Entdeckung war natürlich auch experimentell keine Kleinigkeit, und Jahrzehnte vergingen zwischen Maxwells kühnem Gedanken (1864) und der ersten Herstellung elektrischer Wellen durch Heinrich Hertz (1887). Aber die Wurzel dieser Entwicklung liegt in den Ideen der Theorie; der Skeptiker mag daraus erkennen, daß die Theorie dem Experiment bedeutend voraus-eilen und das Experiment führen kann. Es ist kein Zufall, sondern erkenntnistheoretisch wohl zu verstehen, daß es in der Physik meist so sein muß. Das Wort von der „grauen Theorie“ paßt hier nicht; es wird auch nur vom Teufel gesprochen, und in ganz anderem Sinn!

Maxwells Methode.

Wir müssen noch ein wenig bei Maxwells *Methode* verweilen; denn sie ist typisch gerade auch für die Entwicklung der Relativitätstheorie und die Schlußweise Einsteins, und

sie wird sicher den nicht physikalisch geschulten Leser zunächst verblüffen: Es liegen klare elektrodynamische Versuche vor und außerdem eine vage Vorstellung vom Zusammenhang dieser Versuche mit den Lichterscheinungen. Der Träger aller dieser Vorgänge ist ein hypothetischer Äther, dessen genaue Beschaffenheit noch unbekannt ist, der wohl Materie sein muß, aber doch ganz anders ist wie die uns bekannte Materie. Die Eigenschaften dieses Äthers müssen erst erraten, aus den von ganz verschiedenen Seiten — Optik, Elektrodynamik — her gewonnenen Erfahrungen zusammengesetzt werden; vorher kann das Problem der mechanischen Konstitution dieses Äthers gar nicht aufgerollt werden. Wie können wir zur Klarheit über diese Eigenschaften, zu einer Theorie kommen? Hier ist der Punkt erreicht, wo die „Anschauung“ versagt. Ganz gewiß paßt kein Bild aus unsrer alltäglichen, ja selbst aus unsrer früheren physikalischen Erfahrung. Wir müssen uns also von unsrer bisherigen „Anschauung“ loslösen, müssen eine Theorie ohne Anschauung aufbauen, eine Theorie, die nicht nur über unsre Begriffe, sondern über das, was wir bisher für naturmöglich gehalten haben, hinausgeht. Was kann uns aber darüber hinaus zum Führer dienen? Die Klarheit darüber, daß die wahren verwendbaren Begriffe geschlossener, einfacher sein müssen als die aus unsrer Erfahrung genommenen, daß eine zufällige, vom Menschen geschaffene, anthropomorphe Einkleidung alle unsre Begriffe trübt. Wir müssen das von den Begriffen entfernen, was unbewußte menschliche Zutat ist. Und dazu gibt es keinen anderen, oder wenigstens keinen besseren Weg als den der mathematischen Formulierung. Bei Maxwell ist es der Mangel an Symmetrie in der mathematischen Formulierung, der ihn zur Einführung des neuen, so bedeutungsvollen Begriffes des „Verschiebungsstromes“ antreibt; wir werden später (bei Besprechung der allgemeinen Relativitätstheorie) noch klarer sehen, wie die Begriffsbildung über das anthropomorphe Beiwerk hinweggeht.

Darum hat Maxwell schon gesagt: die mathematischen Gleichungen sind wesentlich klüger als der Mensch, der sie aufstellt. So hat er selbst die Gesetze der Elektrodynamik in

Gleichungen gefaßt (die bis heute nur die „*Maxwellschen Gleichungen*“ heißen), aus denen Generationen immer weiter Neues gelernt und geschlossen haben, was selbst ein Maxwell nicht ahnen konnte. In der mathematischen Formulierung, in diesen Runen der modernen Zeit, konnten Gedanken festgehalten werden, deren anschauliche, begriffliche, ja sprachliche Formulierung nicht möglich ist, weil alle diese Möglichkeiten nur an der täglichen Erfahrung herangebildet sind und versagen, wenn der Weg der Forschung von dem Menschlichen in das Menschenfremde, in die vom Menschen nicht abhängige Natur hineinführt.

Elektromagnetisches Weltbild.

So lag ein Gedankensystem vor, das einen weiten Teil der bekannten physikalischen Vorgänge umspannte (und in der Folgezeit noch viel mehr umspannen sollte); es war auch für Maxwell eine selbstverständliche Aufgabe, dieses Gedankensystem der Mechanik unterzuordnen, d. h. ein *mechanisches* Bild für den Äther zu suchen. Ist der Äther eine besondere Art von Flüssigkeit? Ist er ein fester Körper? Ist er wie ein Werk von Rädern, die in seltsamer Weise ineinandergreifen? Die besten Köpfe haben solche Bilder gesucht, Maxwells ganzes Leben war mit dieser Frage ausgefüllt. Und das Ergebnis: *unmöglich!*

Man mußte resignieren; aber aus dieser Resignation entstand eine positive Anschauung von ungeheurer Tragweite: Es ist prinzipiell *unmöglich, elektrodynamische Erscheinungen mechanisch zu deuten*; es ist ein Vorurteil, daß die mechanischen Gesetze allein die tiefsten der Natur seien; *die elektrodynamischen Gesetze*, so einfach und erhaben, wie sie Maxwell aussprach, sind *ebenso tief in der Natur gelegen wie die mechanischen*. Vielleicht läßt sich eines Tages umgekehrt die Mechanik auf die Elektrodynamik zurückführen oder beide auf ein Gemeinsames, Übergeordnetes.

Dieser Wandel der Anschauung wird kaum durch etwas besser illustriert als durch die beiden Motti, die der große deutsche Physiker Boltzmann seinen Büchern über die Faraday-Maxwellschen Gedanken vorangeschickt hat:

Als er 1891 den 1. Band seiner „Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität“ veröffentlichte, da legte er die ganzen Gedankengänge und Rechnungen dar, deren formale Richtigkeit und deren Erfolg in der Forschung auf der Hand lag, die aber mit unanschaulichen Begriffen arbeiteten und darum ein wenig als dunkle Mystik erscheinen mußten. Damals schrieb er das Faustwort voran:

So soll ich denn mit saurem Fleiß
Euch lehren, was ich selbst nicht weiß.

Das eigentliche Problem schien ihm noch ungelöst. Aber einige Jahre später (1893) veröffentlichte er den 2. Band dieser Vorlesungen. Und da begann er mit einem anderen Faustwort:

War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb,
Die mir das innere Toben stillen,
Das arme Herz mit Freude füllen
Und mit geheimnisvollem Trieb
Die Kräfte der Natur rings um mich her enthüllen?

Der Ton liegt auf „enthüllen“. Dieselben Gedanken, die früher noch als ein geheimnisvolles Problem erschienen, enthüllen jetzt; sie lösen die Aufgabe, zum Verständnis der Natur zu führen; was vorher das Hauptproblem schien, die Zurückführung auf anschauliche, d. h. mechanische Begriffe, ist nun überhaupt kein Problem mehr. Die Elektrodynamik steht gleichberechtigt neben der Mechanik.

Elektronentheorie.

Die Möglichkeit, die Elektrodynamik sogar der Mechanik überzuordnen und die *Grundbegriffe der Mechanik elektrodynamisch zu deuten*, ergab sich um die Jahrhundertwende aus der Elektronentheorie (H. A. Lorentz 1892). Wir wollen hier nicht auf die Gesamtheit der Erfahrungen und der Ideen eingehen, die einen Weiterbau der Elektrodynamik im Sinn dieser Theorie notwendig und erfolgreich machten. Vor allem die Grundidee, daß die elektrische Ladung nicht bis zu beliebig kleinen Teilen unterteilbar ist, liegt ganz abseits von

dem Gedankengang, der uns hier beschäftigt. Für uns ganz wesentlich ist die Erkenntnis, daß die elektrische Ladung etwas für sich Bestehendes ist, das man z. B. in den sog. Kathodenstrahlen als negative Ladung beobachtet, daß es nicht etwa, wie früher angenommen, nur geladene Materie gibt. Die *Elektronentheorie* deutet verschiedene, z. T. damals ganz neue Erscheinungen, wie die erwähnten Kathodenstrahlen, Radiumstrahlen und einige weniger allgemein bekannte Vorgänge, als Wirkungen reiner Ladungen, die in ihrer Umgebung ein Feld nach den Maxwell'schen Gleichungen erzeugen. Man braucht nun nicht mehr besonders von einem elektrischen Strom zu sprechen; ein elektrischer Strom ist identisch mit der Bewegung solcher (atomistisch verteilter) Ladungen. Und nun zeigt sich, daß solche Ladungen, wenn sie bewegt werden, fast genau die Eigenschaften der Materie zeigen, welche der Mechanik zugrunde liegen; eine gleichförmige Bewegung im Äther behalten sie ungestört in gerader Richtung bei, zu einer Beschleunigung ist eine Kraft nötig, die natürlich nur durch ein elektrisches Feld hervorgerufen werden kann. Und diese Kraft ist bei allen in der Mechanik bekannten Geschwindigkeiten proportional der Beschleunigung genau wie bei einem materiellen Teilchen. Das heißt aber: *eine Ladung, etwa ein Elektron ohne jede weitere Materie, hat genau so gut eine „Masse“* wie die Körper unsrer täglichen mechanischen Erfahrung. Die Folgerung aus diesem Ergebnis für das Weltbild liegt nun auf der Hand: Es war nicht möglich, ein mechanisches Bild der elektromagnetischen Erscheinungen zu geben; aber nun ist es ja umgekehrt möglich, die Materie elektromagnetisch aufzufassen. Wenn alle Körper in irgendeiner — uns noch völlig unbekanntem und angesichts der chemischen Erfahrungen sicher sehr komplizierten — Weise aus negativen und positiven Ladungen aufgebaut sind, so haben sie gerade die Eigenschaft, sich wie die materiellen Körper der Mechanik zu verhalten.

Also ziehen wir die Konsequenz, *vom mechanischen Weltbild* abzurücken und *zum elektrodynamischen* überzugehen! Wir sehen nun die elektrodynamischen Gesetze als die einfachsten und tiefstliegenden der physikalischen Natur an und

die mechanischen Gesetze nur als ihre Folgerung; die Materie besteht ganz und gar nur aus elektrischen Ladungen. Daß sie einer Beschleunigung widersteht, daß sie, wie man sagt, „Trägheit“ zeigt, liegt nur daran, daß die beschleunigten elektrischen Ladungen im Äther magnetische Felder erzeugen müssen. Man nennt diese Erscheinung in der Elektrotechnik „Selbstinduktion“. Was wir an der Materie als „Masse“ wahrnehmen, ist nur die Selbstinduktion bei der Beschleunigung der Ladungen, die diese Materie bilden.

Dieses Gedankensystem ist zunächst natürlich ein Programm; seine Aussagen gehen — wie dies freilich beim mechanischen Weltbild nicht anders war und bei jedem Weltbild sein wird — weit über das, was wirklich gesicherte Erfahrungen sind, hinaus. Die Gravitation hat ja z. B. noch keinen Platz in diesem System; das mag wenig stören; denn auch in der alten Mechanik stand sie für sich und unbegriffen neben den Grundgesetzen; erst die später auseinanderzusetzende allgemeine Relativitätstheorie hat diese Beschränkung aufgehoben. Aber die Hauptaufgabe, welche den Physikern durch die Elektronentheorie gestellt wurde, war die *Auflösung der Materie in positive und negative Ladungen*. Erwies sich diese Hypothese als richtig, so war das elektrodynamische Weltbild mehr wie ein interessantes Gedanken spiel, nämlich eine wirkliche Erkenntnis. Dann lohnte sich die ungeheure geistige Anstrengung, die Vergewaltigung unsres Geistes, welche die so anschauliche, aus der Erfahrung vertraute mechanische Auffassung der Natur durch das nur formale, schwer vorstellbare elektrodynamische Weltbild ersetzte und einen komplizierten Mechanismus für scheinbar so einfache, klare Vorgänge, wie die Beschleunigung eines Körpers annahm.

Wohl nur sehr selten hat ein Gedanke in der Physik die experimentelle Wissenschaft so stark angeregt und solche herrlichen Früchte getragen wie dieser. Seine Auswirkung ist ein beispielloser Siegeslauf von Entdeckung zu Entdeckung, ein Einblick in eine neue Welt, die wirklich die vorausgesagten Züge trägt. Das Ende ist ein ebenso beispielloses Versagen nicht nur der elektrodynamischen, sondern aller

überlieferten Vorstellungen in der Welt der Atome und eine Revolutionierung der ganzen Physik und vielleicht der ganzen Naturwissenschaft. Aber dies liegt außerhalb des Rahmens, der uns hier gesteckt ist, und soll darum nur angedeutet werden.

Übergewicht des elektromagnetischen über das mechanische Weltbild.

Das Verhältnis der *Elektrodynamik* zur *Mechanik* stellt ein einfacher Versuch klar: In den Kathodenstrahlen und den vom Radium ausgesandten Strahlen erkannte man bald geladene Teilchen, auf die man durch ein elektrisches oder magnetisches Feld einwirken kann. Diese „Strahlen“ erfahren dadurch Beschleunigungen, und wenn man die Kraft des Feldes und die Beschleunigung mißt, so kann man die Masse der Strahlteilchen bestimmen; denn die Kraft ist ja gleich Masse mal Beschleunigung; das ist die einzige Definition, d. h. Meßvorschrift für die Masse. Die Versuche — deren Schwierigkeiten und Auswertung wir hier natürlich übergehen müssen — zeigen, daß eine solche Masse vorhanden und meßbar ist; es wird wirklich etwa die Beschleunigung doppelt so groß, wenn die Kraft verdoppelt wird. Nun sagt die elektrodynamische Auffassung, daß die ganze Masse nur von den magnetischen Feldern herrührt, welche durch Bewegung der elektrischen Ladung erzeugt werden. Eine so entstehende Masse könnte aber, wie aus den Maxwell'schen Gleichungen folgt, *nicht unabhängig von der Geschwindigkeit* sein, sondern müßte mit der Geschwindigkeit stark ansteigen, wenn man mehr oder weniger sich der Lichtgeschwindigkeit annähert. Im alten Lehrgebäude der Mechanik brauchte man dieselbe Kraft, etwa um einen Körper in 1 Sekunde aus der Ruhe heraus auf eine Geschwindigkeit von 10 Metern in der Sekunde zu bringen und um denselben Körper in 1 Sekunde von einer Geschwindigkeit von 1000 auf 1010 Meter in der Sekunde zu beschleunigen. Ist die Masse aber elektromagnetischen Ursprungs, so muß im letzteren Fall die nötige Kraft größer sein; meßbar wird der Unterschied erst, wenn es sich um einen etwa mit 100000 Kilo-

metern in der Sekunde bewegten Körper handelt. Nun gab es eine solche Geschwindigkeit in der Welt der mechanischen Erfahrungen nicht; das schnellste Geschöß hat etwa 1000 Meter in der Sekunde, die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne etwa 40 Kilometer in der Sekunde. Aber gerade die Forschungen über den elektrodynamischen Aufbau der Materie hatten Körper von ganz anderer Geschwindigkeit ans Licht gebracht, eben die in den Kathoden- und Radiumstrahlen bewegten geladenen Teilchen; es gibt negativ geladene, vom Radium ausgeschleuderte Teilchen, deren Geschwindigkeit nur um wenige (5 bis 10, in einem Fall sogar nur 1,4) Prozent unter der des Lichtes bleibt. Die Messung der Masse von solchen Teilchen zeigte nun in der Tat eine *wesentliche Vergrößerung gegenüber der Masse* ganz gleich gestalteter Teilchen, von kleinerer Geschwindigkeit. Damit war die rein elektrodynamische Natur dieser Teilchen erwiesen; es war ein eigentlich *mechanisches Phänomen aufgezeigt, das der überlieferten Mechanik widersprach*, aber von der neuen Elektrodynamik, der Elektronentheorie, mit der Genauigkeit der Versuche quantitativ begriffen wurde.

Streng genommen könnte man angesichts dieses Ergebnisses zweierlei Folgerungen ziehen: *Erstens* könnte man sagen, die gemessenen Teilchen seien als reine elektrische Ladungen erwiesen, aber die anderen materiellen Körper seien von ganz anderer Art; sie gehorchen dem Grundgesetz der alten Mechanik, wonach die Masse eines Körpers von der Geschwindigkeit unabhängig ist. *Zweitens* könnte man schließen, die Natur aller Materie sei rein elektrodynamischer Natur, wie die Natur der gemessenen Teilchen, und wenn man nur mit andern Körpern dasselbe Experiment wie mit den Radiumteilchen anstellen, d. h. sie auf so große Geschwindigkeit bringen könnte, dann würde sich auch an ihnen das Gesetz, wonach die Masse eines Körpers dieselbe bei Ruhe und bei sehr großer Geschwindigkeit sei, als unhaltbar herausstellen. Die mechanischen Grundgesetze seien nur an Geschwindigkeiten gewonnen, die außerordentlich klein gegen die Lichtgeschwindigkeit seien; bei solch kleinen Geschwindigkeiten sei nach Aussage der elektrodynamischen Gesetze

die Massenveränderlichkeit so klein, daß sie mit den besten experimentellen Mitteln nicht wahrgenommen werden könne. Die Grundgesetze der alten Mechanik seien nur Näherungsgesetze, die bei kleinen Geschwindigkeiten gelten, die exakten Gesetze für die Bewegung der Körper folgen aus den elektrodynamischen Gesetzen und der Erkenntnis, daß alle Materie nur aus elektrischen Ladungen — den letzten Einheiten unsrer physischen Welt — bestehe.

Es konnte kaum ein Zweifel bestehen, daß man sich dieser zweiten Anschauung anschließen mußte, und damit war das *Übergewicht des elektrodynamischen über das mechanische Weltbild* entschieden.

II. Die spezielle Relativitätstheorie.

Drittes Kapitel.

Der Widerspruch in den Experimenten.

Die ganze hier kurz geschilderte Entwicklung des elektrodynamischen Weltbildes muß man sich vor Augen halten, wenn man die Stellung der Relativitätstheorie innerhalb der Physik richtig würdigen will. Einfacher sind nun die Schwierigkeiten zu überblicken, welche den *Ausgangspunkt der Relativitätstheorie* bilden.

Die Frage nach der Bewegung des Äthers.

Die wichtigsten, grundlegendsten Naturvorgänge finden wir im leeren Raum lokalisiert, dort, wo keine Materie zu konstatieren ist; dies widerspricht unserem Vorstellungsvermögen; ein wirklich leerer Raum muß eigenschaftslos sein. Wir gehen also sofort dazu über, einen hypothetischen Stoff, den Äther, anzunehmen, der den Raum erfüllt und der Träger der elektromagnetischen und optischen Erscheinungen ist. Dieser Äther macht sich mechanisch nicht bemerkbar; denn die Mechanik nötigt uns ja gar nicht, seine Existenz anzu-

nehmen. Und gibt es einen Äther, so müssen wir jedenfalls sagen: *eine Bewegung relativ zum Äther ist, solange wir mechanische Vorgänge verfolgen, nichts anderes wie eine Bewegung gegen den leeren Raum*, wie eine „absolute“ Bewegung; man kann sie mit keinem mechanischen Mittel konstatieren. Es gibt in der Mechanik auch keine Bewegung relativ zum Äther, sondern nur Relativbewegung von Materie gegen Materie, und der Äther kann hier nicht als Materie angesprochen werden; denn das „*Relativitätsprinzip der Mechanik*“ ist ja innerhalb der Mechanik eine durch keine Theorie umstoßbare Erfahrungstatsache.

Nun bekommt aber *innerhalb der Elektrodynamik der Äther sehr bestimmte Eigenschaften*; er unterscheidet sich von allen anderen Stoffen — die wir materielle Stoffe nennen — sicher wesentlich; wir können uns kein mechanisches Bild nach dem Muster der Materie vom Äther machen; aber wir kennen doch seine Eigenschaften und können alle Vorgänge in ihm mit Hilfe unsrer wundersamen Maxwell'schen Gleichungen genau beschreiben, besser wie irgendwelche Vorgänge in der materiellen Welt. Wenn wir also von der Physik nicht mehr fordern, daß sie uns mechanische Bilder von den Naturvorgängen gibt, sondern daß sie uns die Naturvorgänge genau beschreibt, in einfache Gesetze zusammenfaßt und vorhersehen läßt, dann können wir eigentlich nicht mehr sagen, der Äther sei etwas Geheimnisvolles, Widerspruchsvolles, Unbekanntes. Sondern wir müssen im Gegenteil sagen, daß wir den Äther sehr gut kennen, besser als irgendeinen materiellen Stoff, daß also nicht der Äther, sondern die Materie das Geheimnisvolle, Unbekannte sei.

Aber eine Frage ist noch ganz ungelöst, nämlich die nach der *Bewegung dieses Äthers*. Auch wenn wir von einer stofflichen Vorstellung des Äthers ganz absehen und nicht an eine Strömung oder Drehung oder dergleichen von der Bewegung der Materie her genommene Vorgänge denken, hat diese Frage einen Sinn. Das Relativitätsprinzip der Mechanik ist ja einfach für Vorgänge, bei welchen die Eigenschaften des Äthers sich nicht zeigen. Aber wenn wir nun diese Eigenschaften ausnutzen, also nur etwa auf einem Körper ein Licht

anzünden, dann muß doch eine Bewegung des die Lichtquelle tragenden Körpers gegen den die Lichtausbreitung vermittelnden Äther wahrgenommen werden. Es muß dann doch einen Sinn haben, von der Bewegung eines materiellen Körpers gegen den Äther zu sprechen. Eine solche Bewegung hat doch zunächst hier gar nicht mehr den Charakter der „Absoluten“ wie in der Mechanik; eine Relativbewegung der Materie gegen den Äther ist keineswegs ein Unding, sondern im Gegenteil die nächstliegende Annahme. Was in den Ausführungen des vorigen Kapitels klargestellt ist, das bezieht sich auf ruhende oder langsam bewegte Körper; das eine an schnell bewegten Körpern angestellte Experiment, das erwähnt wurde, die Massenmessung an rasch bewegten Kathodenstrahlteilchen, haben wir auch nur rein qualitativ benutzt, nämlich zur Feststellung der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Auch zur quantitativen Erfassung dieser Versuche fehlt noch die Grunderkenntnis über die Bewegung von Materie gegenüber dem Äther.

Von diesem Problem nimmt die hier zu schildernde Theorie ihren Ausgang. Man kann die Frage ja so stellen: *Ist das Relativitätsprinzip der Mechanik auf die Elektrodynamik übertragbar, oder was ist an seine Stelle zu setzen?* Diese Frage kann zwei Antworten finden: *Entweder* das Relativitätsprinzip gilt in der Elektrodynamik nicht mehr, die Bewegung eines materiellen Körpers gegen den Äther hat einen Sinn; dann setzt diese Theorie der Relativität der mechanischen Bewegungen einen absoluten Ruhezustand, nämlich den des Äthers entgegen; man könnte sie daher als „*Absoluttheorie*“ bezeichnen. *Oder* es gilt allen Schwierigkeiten zum Trotz auch für elektromagnetische und optische Vorgänge das Relativitätsprinzip, es ist auch für diese Erscheinungen keine Bewegung von Materie gegenüber dem Äther vorhanden; dann erhält man eine „*Relativitätstheorie*“. Dies und nichts anderes ist der Sinn des Wortes „*Relativitätstheorie*“; es hat nichts mit allgemeiner, verschwommener philosophischer Skepsis und Relativierung von Begriffen zu tun — und ist auch wohl keine „*Dekadenzerscheinung*“.

Experimentelle Fragestellung.

Die Entscheidung über die Existenz oder Nichtexistenz einer *Bewegung gegen den Äther* liegt natürlich nur beim *Experiment*; denn die Physik, wie jede reine Naturwissenschaft, beruht ganz und gar nur auf Erfahrung. Wir müssen also Versuche über Lichtausbreitung von ruhenden und von bewegten Körpern aus anstellen; solche Versuche sind freilich sehr schwierig; denn die Lichtgeschwindigkeit ist ja so ungeheuer groß, daß jede Bewegung eines irdischen Körpers nur geringe Bedeutung haben kann. In der Tat kann der Einfluß der Bewegung des Körpers relativ zum Äther auf die Erscheinungen der Elektromagnetik nicht sehr groß sein, und es läßt sich zeigen, daß nur ganz wenige, für die Experimentalphysik und erst recht für die Technik nicht gerade besonders wichtige Vorgänge nach der Absoluttheorie anders verlaufen müssen wie nach der Relativitätstheorie. Aber die physikalische Meßtechnik ist gerade auf dem optischen Gebiet so überaus fein entwickelt, daß selbst die ganz feinen und äußerste Präzision erfordernden Versuche ein sicheres, unantastbares Ergebnis liefern. Und vom Standpunkt der Theorie sind es eben gerade diese ganz feinen Effekte, die uns die Begrenztheit unserer groben, an offener liegenden Erscheinungen gewonnenen Bilder aufzeigen und zur Bildung exakterer Vorstellungen zwingen.

Halten wir an der unabweisbaren Vorstellung des Äthers fest, so sind zweierlei Möglichkeiten der Bewegung vorhanden: *entweder* der Äther ist überall in absoluter Ruhe, ein bewegter Körper bewegt sich also durch den Äther hindurch und der ihn durchdringende Äther nimmt an der Bewegung nicht teil, *oder* der bewegte Körper nimmt den Äther bei seiner Bewegung mit, der Äther erhält vom Körper dessen Bewegungszustand, so daß etwa der im Wasser enthaltene Äther (der ja für die Lichtausbreitung im Wasser sorgt) mitfließt, wenn das Wasser fließt.

Um die Fragestellung noch klarer zu machen, wollen wir zunächst vom analogen Problem im akustischen Gebiet sprechen; wir wissen ja schon, daß bei den *Schallphänomenen*

das mechanische Bild zur restlosen Erfassung genügt. Es sei eine Luftmasse gegeben, die von einem Schallsignal durchstrichen wird; wir verfolgen einen Schallstrahl auf seinem Weg und haben solche Instrumente zur Verfügung, daß wir die Zeit zwischen der Abgabe des Signals an einer Stelle und der Ankunft an einer anderen Stelle messen können. (Solche Instrumente gibt es; sie finden ihre praktische Verwendung z. B. im Behm-Lot zur Messung der Dicke von Wasser- und Luftschichten.) Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit hängt nur vom Medium (Luft) ab, in welchem die Fortpflanzung vor sich geht; wenn der aussendende und der empfangende Körper sich gegen die Luft bewegen, so ändert sich natürlich der Weg, den das Signal zurücklegen muß, da der Empfangsapparat während der Laufzeit des Signals seinen Ort gewechselt hat; aber die Geschwindigkeit bleibt dieselbe, d. h. die

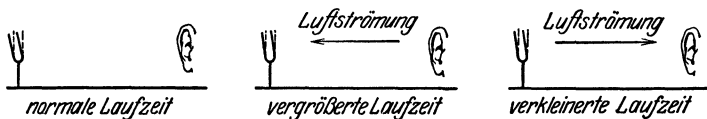


Abb. 4. Ausbreitung des Schalles in der Luft.

Laufzeit wächst an, wenn der Weg anwächst, und zwar proportional; erhöht sich der Weg etwa um 10%, so erhöht sich auch die Laufzeit um 10%. Ein entsprechender Einfluß zeigt sich natürlich, wenn zwar die Instrumente ruhen, aber die Luft strömt. Wenn (Abb. 4) Aussender und Empfänger in einer bekannten Entfernung stehen, so wird man bei ruhender Luft aus der Laufzeit die gewöhnliche Schallgeschwindigkeit (332 m/s) messen; wenn die Luft vom Aussender zum Empfänger strömt, so wird die Laufzeit vermindert, im gegenteiligen Fall vermehrt werden. Denn die Ausbreitung des Schalles erfolgt relativ zum fortpflanzenden Medium; wenn das Medium sich selbst bewegt, so addiert sich diese Bewegungsgeschwindigkeit zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit hinzu; das Additionstheorem der Geschwindigkeiten, wie es oben aus der Mechanik hervorgehoben wurde, hat seine Gültigkeit. Das Resultat der Versuche ist also dies: Eine *Relativbewegung* des aussendenden und empfangenden Kör-

pers gegen die Luft läßt sich *sehr wohl wahrnehmen*; es ist dabei freilich gleichgültig, ob der Körper bewegt ist und die Luft ruht, oder ob umgekehrt der Körper ruht und die Luft strömt. Das Medium, in welchem sich der Schall fortpflanzt, bewegt sich mit der bewegten Luft; das ist etwas trivial, denn wir sehen ja die Luft selbst als dieses Medium an.

Fizeaus Versuch und Michelsons Versuch.

Übertragen wir nun diese Erfahrungen auf die *Lichtausbreitung*, so können wir ja nicht so ohne weiteres etwa die Luft oder das Wasser, in welchem sich Licht ausbreitet, als den Träger der Lichterscheinung ansehen; denn der Äther ist ja im Gegensatz zu dem Schall ausbreitenden Medium auch im leeren Raum vorhanden. Nun hat Fizeau (1851) einen *Versuch* angestellt, um die Geschwindigkeit eines sich in Luft ausbreitenden Lichtstrahls zu messen, wenn die Luft ruht, und wenn sie in Richtung vom aussendenden zum empfangenden Körper und umgekehrt strömt. Aus diesem Versuch ergab sich, daß die Strömung der Luft keinen Einfluß hat, daß die Laufzeit unabhängig von Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung dieselbe bleibt, ganz im Gegensatz zu dem eben geschilderten Versuch mit der Schallausbreitung¹. *Der Äther, welcher die Lichtausbreitung vermittelt, wird also vom bewegten Körper, den er durchdringt, nicht mitgenommen.*

Vielleicht stößt die Vorstellung eines die Materie durchdringenden Äthers bei Lesern, denen physikalische Überlegungen weniger geläufig sind, auf besondere Schwierigkeiten. Mit dem Wort „Äther“ ist ja hier nur ein Medium gemeint, welches Träger der elektromagnetischen und optischen Erscheinungen in der gleichen Weise ist wie der leere Raum. Das, was wir Materie nennen, zeigt sich aber der

¹ Dem physikalisch erfahrenen Leser muß hier eingestanden werden, daß Fizeau seinen Versuch in Wirklichkeit mit Wasser angestellt hat und daß im Wasser sich infolge der Lichtbrechung ein Effekt der „Mitführung“ zeigt, der aber nichts mit dem hier besprochenen zu tun hat; dieser Effekt wird von der Relativitätstheorie richtig erfaßt, soll hier aber nicht weiter betrachtet werden, damit alle unnötigen Komplikationen vermieden werden.

modernen Atomphysik gleichfalls als fast leerer Raum; nur in Räumen, die sehr klein sind im Vergleich mit dem Ausdehnungsraum, den wir als von Materie erfüllt ansehen, sind die Bausteine (Elektronen, Protonen, Kerne) anzutreffen, von denen die materiellen Wirkungen ausgehen. Licht, das durch Wasser oder Luft hindurchgeht, durchstreicht daher fast nur leeren Raum, also dasselbe, was wir im Weltraum „Äther“ nennen.

Überlegen wir so die Konsequenzen des Fizeauschen Versuches, so kommen wir zu einer Vorstellung, die große logische Einfachheit und Anschaulichkeit für sich hat, nämlich zu der Vorstellung des *ruhenden, den ganzen Raum erfüllenden Äthers*, der sich um die Bewegung der Materie nicht weiter kümmert. Diese Annahme ist in der Tat eine Grundlage der Lorentzschen Elektronentheorie, die als konsequente „Absoluttheorie“ vor Einstein die Elektrodynamik beherrschte. Danach hätte der Begriff einer Relativgeschwindigkeit zwischen Äther und Materie einen Sinn, und man müßte von einem bewegten Körper aus die Relativgeschwindigkeit zwischen diesem und dem Äther messen können, so wie man aus dem obenerwähnten Versuch mit der Schallausbreitung die Bewegung der Instrumente gegen die Luft bestimmen kann. Nun sitzen wir ja auf einem bewegten Körper, nämlich der Erde, die auf ihrer Bahn um die Sonne 40 Kilometer in der Sekunde zurücklegt, d. i. weit mehr als irgendein irdisches bewegtes Objekt. Die große Frage ist also die: *Können wir von der Erde aus eine Bewegung der Erde im Raum mit optischen Mitteln wahrnehmen*, nachdem dies mit mechanischen Mitteln unmöglich ist?

Wenn wir Licht von einer irdischen Lichtquelle ausenden, so breitet es sich nach allen Richtungen gleichmäßig, mit gleicher Geschwindigkeit aus; nun läuft die Erde in einer Richtung dem Lichtstrahl nach, in der andern vom Lichtstrahl weg; also muß es dem Beobachter so erscheinen, wie wenn das Licht sich nach der einen Richtung schneller fortpflanze wie nach der andern. Das Licht muß in Abb. 5 früher auf das Auge *B* treffen als auf das Auge *A*; denn

das Licht breitet sich in einem Medium aus, das die Erdbewegung nicht mitmacht, und *B* läuft dem Licht entgegen, während *A* vor dem Licht davonläuft. Würde die Erdbewegung mit Lichtgeschwindigkeit vor sich gehen, so könnte ja das Lichtsignal überhaupt nie nach *A* gelangen.

Der Versuch, bei welchem die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Richtungen von der Erde aus verglichen wird, ist schon von Maxwell erdacht und mit den feinsten Mitteln der Experimentierkunst von A. A. Michelson zuerst 1881 ausgeführt worden. Sein Ergebnis ist das überraschendste: auch von der bewegten Erde aus gesehen finden wir nach

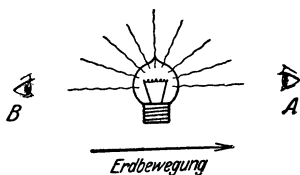


Abb. 5. Lichtquelle auf der bewegten Erde.

allen Richtungen gleiche Lichtgeschwindigkeit; wir merken nichts davon, daß die Erde dem Lichtstrahl in der einen Richtung nachläuft, in der andern vor ihm wegläuft. Wir können von der Erde aus auch mit den feinsten Mitteln der Optik, die genügend fein zur

Konstatierung eines solchen Effektes wären, *keine Bewegung der Erde gegen den Äther wahrnehmen*; das Relativitätsprinzip behält auch in der Optik und somit im elektrodynamischen Weltbild seine Gültigkeit.

Dies Ergebnis steht also im *vollsten Widerspruch* zu dem Ergebnis des Fizeauschen Versuches; und diese beiden Versuche sind nicht die einzigen, aus denen man solch bindende Schlüsse auf die Bewegung des Äthers ziehen kann; sie sind hier nur als besonders beweiskräftig und leicht verständlich hervorgehoben. Ihre Ergebnisse scheinen sich gegenseitig vollkommen auszuschließen. Das Nächstliegende wäre also wohl, das eine oder das andere Experiment für falsch zu halten; diese Möglichkeit besteht aber nicht angesichts der äußersten Feinheit und Kritik, mit der die Physiker nun schon jahrzehntelang diese Versuche diskutiert und wiederholt haben, und angesichts der zahlreichen anderen Versuche, die zum gleichen Ergebnis führen. Wir können hier auch nicht auf die rein physikalisch-technischen Erwägungen eingehen, welche zur Kritik der Versuche selbst herangezogen werden

können; wir wollen vielmehr die Versuche als richtig annehmen (kein Physiker zweifelt mehr daran). Aber es wird vielleicht manchen Leser interessieren und kann für das Folgende wertvoll sein, wenn hier wenigstens diese beiden Versuchsanordnungen kurz beschrieben werden.

Die Versuchsanordnungen.

Der *Fizeausche Versuchsapparat* besteht aus einer Lichtquelle P , zwei Röhren R , in welchen Wasser (es könnte prinzipiell auch Luft sein) in der Pfeilrichtung hin und zurück strömt, und einem Aufnahmeapparat, etwa einer photographischen Platte M . Dazu kommen die Blenden B , die Sammellinsen L , welche die vom Brennpunkt P der einen Linse kommenden Strahlen nach dem Brennpunkt M der anderen Linse leiten. In M entstehen sogenannte *Interferenzstreifen*; darunter versteht man ein System von hellen und dunklen Streifen, die man an Stelle des einfachen Lichtpunktes von P im Punkte M sieht, und die daher rühren, daß das Licht eine Wellenerscheinung ist. Die hellen und dunklen Linien kommen daher, daß die beiden Lichtwellenzüge, die auf den zwei verschiedenen Wegen von P nach M gelangt sind, dort sich verstärken, wenn Wellenberg auf Wellenberg trifft, und sich schwächen bis zum vollkommenen Auslöschen, wenn Wellenberg und Wellental sich überlagern. Dieses Interferenzphänomen gibt uns die Möglichkeit, Gangunterschiede zwischen den beiden Strahlwegen festzustellen, die von der Größe eines Bruchteils der Lichtwellenlänge, d. h. von der Größenordnung eines hunderttausendstel Millimeters sind. Würde nun die Strömung des Wassers die Lichtausbreitung beeinflussen, also den Lichtweg in der einen Röhre verkleinern, den Lichtweg in der andern Röhre vergrößern, so müßten die hellen und dunklen Stellen des Interferenzbildes bei strömendem Wasser eine andere Lage haben als bei ruhendem Wasser. Genauer gesagt: Man kann nicht etwa feststellen, um wieviel

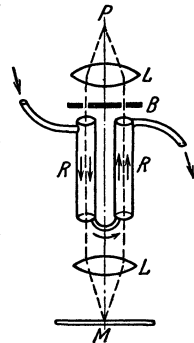


Abb. 6.
Fizeaus Versuch.

der eine Lichtweg größer ist als der andere; aber wenn man einmal bei ruhendem Wasser ein bestimmtes Streifenbild hat, so könnte man eine Änderung dieses Bildes beobachten, wenn der Unterschied der Lichtwege sich infolge der Wasserströmung nur um einen Bruchteil der Wellenlänge änderte. Man sagt: „Die Interferenzstreifen müßten sich ständig verschieben“, wenn man die Wassergeschwindigkeit größer und größer werden läßt. Dies ist nun nicht der Fall, und man schließt, daß die Strömung des Wassers keinen Einfluß auf die Lichtfortpflanzung hat, daß *die Materie den Äther nicht mitnimmt*.

Auch beim Versuche von Michelson werden zwei Lichtwege verglichen. Der Apparat besteht einfach aus einer Lichtquelle P und zwei Spiegeln S_1 und S_2 . Der Aufnahmeapparat steht bei der Lichtquelle P .

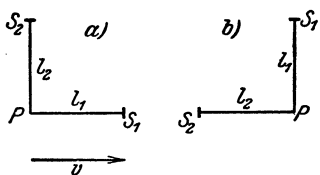


Abb. 7. Michelsons Versuch.

steht bei der Lichtquelle P . Liegt diese ganze Apparatur etwa ruhig im Äther, so wird man, solange die beiden Arme l_1 und l_2 einigermaßen gleich groß sind¹, im Aufnahme-

apparat ein Interferenzstreifenbild sehen. Und dieses Bild kann sich nicht ändern, wenn man den ganzen Apparat dreht, etwa in die Lage b) der Abbildung. Bewegt sich jetzt die ganze Apparatur in Lage a) mit der Erde in der Richtung des Pfeils, in welche der Arm l_1 gelegt sei, so braucht der Lichtstrahl für den Weg l_1 länger als für den Weg l_2 . Der Spiegel S_1 läuft ja vor dem Lichtstrahl davon, daher wird der Spiegel S_2 vor S_1 erreicht; dies wird etwas dadurch kompensiert, daß der Rückweg von S_1 nach P dadurch verkürzt wird, daß nunmehr P dem Lichtstrahl entgegenläuft; aber diese Kompensation ist keine vollständige.

Vielleicht darf ich dem Leser hier die kleine Rechnung zumuten; scheint sie ihm zu schwierig, so muß er es mir eben glauben, daß das Licht von P nach S_1 und zurück länger braucht als von P

¹ Daß dies der Fall sein muß, liegt an einer für unsre Überlegungen gleichgültigen Forderung, nämlich der „Kohärenz“ der beiden Lichtstrahlen. Dies nur für den Leser, der sich schon mit physikalischer Optik befaßt hat.

nach S_2 und zurück: Wir wollen die Lichtgeschwindigkeit c nennen, die Erdgeschwindigkeit v ($c = 300\,000$ km/s, $v = 40$ km/s); ferner sei die Zeit, die das Licht von P nach S_1 braucht, t_1 genannt, die Zeit zum Rückweg t'_1 , die Zeit von P nach S_2 werde mit t_2 bezeichnet; der Rückweg dauert hier offenbar gerade so lange wie der Hinweg, also ist die Gesamtzeit von P über S_2 nach P zurück gleich $2t_2$. Die Zeit t_2 ist leicht zu berechnen, wenn sich die Leser an den alten und beliebten Pythagoras erinnern. Da nämlich die Erde in der Zeit t_2 die Strecke vt_2 zurücklegt, das Licht die Strecke ct_2 und die Richtung der Erdbahn senkrecht zu l_2 stehen soll, so haben wir ein rechtwinkliges Dreieck mit der Hypotenuse ct_2 und den Katheten l und vt_2 , und da lehrt der Pythagoräische Satz:

$$c^2 t_2^2 = v^2 t_2^2 + l_2^2 \quad \text{oder}$$

$$t_2 = \frac{l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

Auf dem Weg von P nach S_1 sollte das Licht gegenüber der Apparatur die Geschwindigkeit $c - v$ haben, auf dem Rückweg $c + v$, entsprechend dem Weg- oder Entgegenlaufen des Apparats. Also ist die Zeit $t_1 = \frac{l_1}{c - v}$, die Zeit $t'_1 = \frac{l_1}{c + v}$;

die Summe $t_1 + t'_1$ ist offenbar verschieden von $2t_2$. Auch dies können wir mit ganz elementaren Mitteln ausrechnen: Es ergibt sich

$$t_1 + t'_1 = \frac{l_1}{c - v} + \frac{l_1}{c + v} = \frac{2cl_1}{c^2 - v^2}.$$

Nun vergleichen wir (aus Rücksicht auf den mathematisch weniger geübten Leser) nicht die Zeiten selbst, sondern ihre Quadrate:

$$(t_1 + t'_1)^2 = \frac{4c^2 l_1^2}{(c^2 - v^2)^2},$$

$$(2t_2)^2 = \frac{4l_2^2}{c^2 - v^2} = \frac{4l_2^2(c^2 - v^2)}{(c^2 - v^2)^2}.$$

Da l_1 gleich l_2 gemacht wurde, ist offenbar $(2t_2)^2$ um $\frac{4l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)^2}$ kleiner als $(t_1 + t'_1)^2$.

Nun kann man, wie schon oben beim Fizeauschen Versuch erwähnt, nicht den Unterschied der beiden Lichtzeiten selbst feststellen, schon deshalb, weil man nicht mit der Genauigkeit einer Lichtwellenlänge die beiden Arme einander

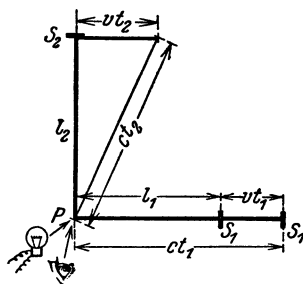


Abb. 8. Michelsons Versuch.

gleichmachen kann. Aber man kann den Apparat aus der Stellung a) in die Stellung b) der Abb. 7 drehen, und in dieser Stellung muß nun die Laufzeit des Lichtstrahls über S_2 größer sein als die über S_1 . Es müssen sich die Interferenzstreifen verschieben, und zwar schon bei den minimalen Änderungen, welche die Laufzeiten hier erfahren. Aber der Versuch zeigt, daß die Interferenzstreifen sich nicht ändern, daß man also die Bewegung der Erde durch den Äther optisch nicht feststellen kann; wenn der Begriff des *Äthers* einen greifbaren Sinn haben soll, so muß er sich *mit der Materie bewegen*; das ist die zwingende Folgerung aus dem Michelsonschen Versuch und widerspricht der ebenso zwingenden Folgerung aus dem Fizeauschen Versuche vollständig.

Ein kleines Bedenken kann noch geäußert werden: Vielleicht war gerade zur Stunde des Versuches die Bewegung der Erde gegen den Äther Null; denn diese Bewegung setzt sich zusammen aus der Bewegung der Erde um die Sonne und der Bewegung des ganzen Sonnensystems gegen den Äther; die beiden Anteile könnten sich zufällig gerade aufheben. Um diese Möglichkeit auszuschließen, hat Michelson seinen Versuch zweimal mit einem halben Jahr Zwischenzeit angestellt; in dieser Zeit ändert sich die Bewegung der Sonne selbst sicher nicht, während die Bewegung der Erde relativ zur Sonne sich umkehrt; die Kompensation könnte nur einmal, nicht beide Male auftreten. Und doch zeigt der Versuch beide Male dasselbe, nämlich keine Verschiebung der Interferenzstreifen, *keine Bewegung der Erde relativ zum Äther*.

Infolgedessen bleibt nur noch übrig, entweder wieder zur Vorstellung der absolut ruhenden Erde, also zum vorkopernikanischen Weltbild zurückzukehren — woran niemand ernstlich denken kann — oder irgendwo in unseren Anschauungen einen ganz grundsätzlichen Umsturz zu versuchen. —

Viertes Kapitel.

Wo liegt der Widerspruch?

Zwei einwandfreie Versuche ergeben gegenteilige, sich gegenseitig widersprechende Resultate; ein tiefer Widerspruch steckt in den Versuchen; wie ist er zu lösen? Die Antwort Einsteins (1905) ist, daß der *Widerspruch nur scheinbar vorhanden ist*, daß wir selbst erst den Widerspruch in die Versuchsergebnisse hineinbringen durch *unbegründete Voraussetzungen*, die uns nur die Gewohnheit eingibt; daß die Experimente selbst frei von Widersprüchen sind, sich vielmehr ergänzen und gemeinsam das Fundament der Elektrodynamik bewegter Körper bilden können.

Gedankenexperimente.

Um diesen Gedanken recht klar zu begreifen, müssen wir den Widerspruch, so wie ihn die Experimente hervorbringen scheinen, noch schärfer ins Auge fassen. Wir wollen die Experimente zu Gedankenexperimenten umdenken, die den paradoxen Charakter noch besser hervortreten lassen:

A und B seien zwei physikalische Laboratorien mit Menschen darin, die wir kurz „Beobachter“ nennen; d. h. sie müssen wenigstens, wie in Abb. 9, einen Maßstab und eine Uhr besitzen und damit umgehen können. A ruhe, B bewege sich mit der Geschwindigkeit v geradlinig und gleichförmig. Von B gehe ein Lichtsignal aus. Der Beobachter A sieht das Lichtsignal sich in Kugelwellen mit der Geschwindigkeit c ausbreiten; diese Kugelwellen breiten sich konzentrisch um den Punkt des Raumes aus, von dem das Signal ausging; von der Bewegung des Laboratoriums B bleibt die Ausbreitung des Signals ganz unabhängig; denn wir wissen aus der ganzen Summe optischer und elektrischer Erfahrungen, daß die Lichtgeschwindigkeit c nur eine Eigenschaft des leeren Raumes ist, und aus dem Fizeauschen Versuch, daß ein bewegter Körper den Äther, in welchem sich das Lichtsignal ausbreitet, nicht mitnimmt. Für den Beobachter A hat das in B ausgesandte Licht ganz analoge Eigenschaften wie

Schallwellen, die von einem bewegten Körper in der Luft ausgehen, etwa von einer fahrenden, pfeifenden Lokomotive.

Ein Beobachter B , welcher denselben Vorgang der Lichtausbreitung von B aus betrachtet, sieht etwas ganz anderes. Er sieht das Lichtsignal von sich aus nach jeder Richtung mit derselben Geschwindigkeit c sich ausbreiten. Dies folgt aus dem Michelsonschen Versuch. Ein wenig anders ausgedrückt: Der Beobachter in A sieht das Licht in seinem ruhenden Raum mit der Geschwindigkeit c sich ausbreiten und könnte dadurch zu dem Schlusse verführt werden, daß der Beobachter in B dasselbe Signal in der mit v bezeichneten Richtung der Abbildung (seiner Bewegungsrichtung) mit der Geschwindigkeit $c - v$ müßte fortschreiten sehen, in der entgegengesetzten Richtung mit der Geschwindigkeit $c + v$. Der Beobachter in B sieht aber dasselbe Signal nach jeder beliebigen Richtung mit der Geschwindigkeit c sich fortpflanzen, wie wenn es sich in einem Raum ausbreitete, der relativ zu B in Ruhe ist. Man kann allgemein sagen: Jeder Beobachter sieht das Licht mit der konstanten Geschwindigkeit c sich ausbreiten, gerade wie wenn der leere Raum relativ zu jedem beliebig bewegten Beobachter (sowohl zu A wie zu B) in Ruhe wäre.

Noch paradoxer gestaltet sich dieser Fall, wenn wir die Geschwindigkeit des Körpers durch die *Lichtgeschwindigkeit* selbst ersetzen ($v = c$ setzen). Der Beobachter sei etwa in A und sehe ein Lichtsignal durch den Raum gehen und komme auf den Gedanken, auf der Front der Lichtwelle mit Lichtgeschwindigkeit den Äther zu durchfliegen, unter Umkehrung eines Faustwortes: „Vor mir die Nacht und hinter mir den Tag!“ Er besteige das bereitstehende Ätherroß und reite an der Wellenfront. Was wird er sehen? Nicht das Erwartete; denn nach unserem eben gewonnenen Satze sieht er ja das Licht in einem Raum sich ausbreiten, der relativ zu ihm selbst ruht. Er sieht die Lichtwellenfront mit Lichtgeschwindigkeit seinem Ätherroß vorausseilen. Notabene: Noch haben wir *keine Theorie* entwickelt, die Paradoxe sind lediglich eine *Konsequenz einwandfreier Experimente*.

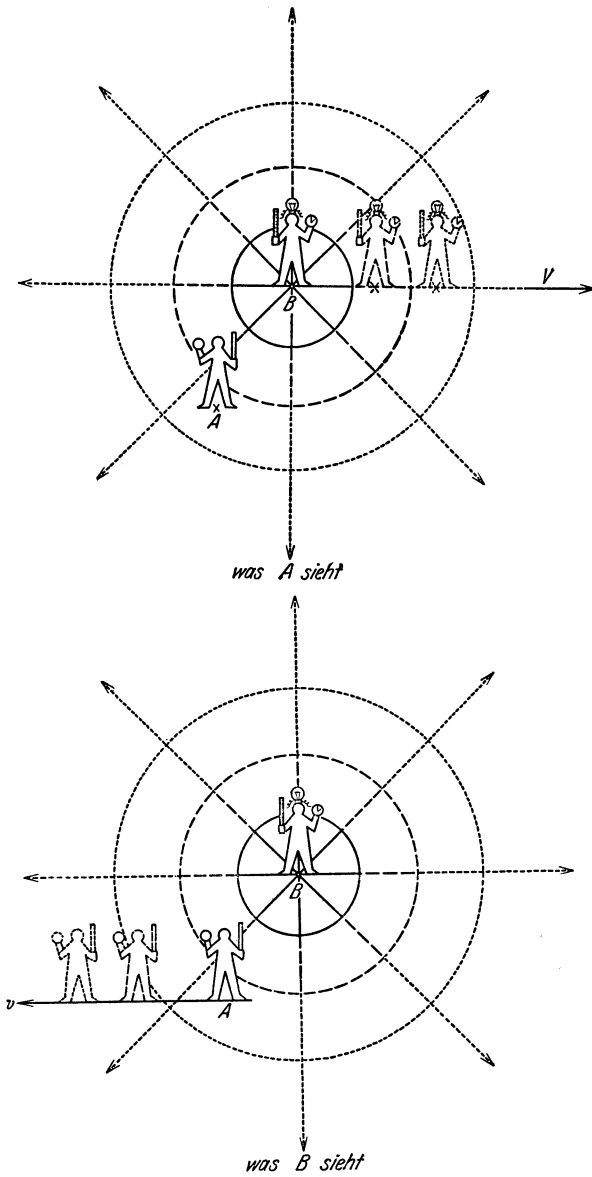
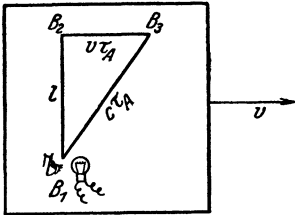


Abb. 9. Vorgang der Lichtausbreitung, von 2 verschiedenen Beobachtern gesehen.

Nun sehen wir uns die einzelnen Vorgänge noch genauer an: In dem Laboratorium B befinde sich die Lichtquelle B_1 und das Aufnahmegerät B_2 ; die Strecke B_1B_2 sei senkrecht auf der Richtung der Bewegung v ; die Entfernung B_1B_2 sei l . Wir messen die Zeit, welche das Licht braucht, um von B_1 nach B_2 zu gelangen, auf zweierlei Weisen, einmal von A aus, einmal von B aus. Was wird das Resultat sein? Von A aus sehen wir das Licht in unserem, mit A ruhendem Raum mit der Geschwindigkeit c sich ausbreiten, es erreiche B_2 nach der noch unbekanntem Zeit τ_A . Bis dahin ist der Spiegel B_2 , der sich ja mit dem Körper B mit der Geschwindigkeit v bewegt, an einen andern Punkt B_3 gerückt, der von B_2 um die Strecke $v\tau_A$ entfernt ist. Das Licht muß also, um von der Lichtquelle zum Spiegel zu gelangen, nicht den Weg l zurücklegen, sondern den Weg B_1B_3 .



↖ A

Abb. 10. Zeitmessung mit Lichtstrahlen.

Nun verfolgen wir denselben Vorgang und messen dieselbe Zeit, welche das Licht von der Quelle bis zum Spiegel braucht, vom Laboratorium B selbst aus. Wir bezeichnen diese Zeit jetzt mit τ_B . Der Beobachter B fühlt nichts von seiner Bewegung. Das Licht pflanzt sich für den in B befindlichen Beobachter mit der Geschwindigkeit c fort, wie wenn der leere Raum relativ zu B in Ruhe wäre. Das Licht hat also den Weg l zurückzulegen.

Das Licht hat für A und B dieselbe Geschwindigkeit, durchläuft aber für A die Strecke B_1B_3 (Hypotenuse), für B nur die Strecke B_1B_2 (Kathete), die kleiner als B_1B_3 ist; infolgedessen braucht das Licht für B länger als für A .

Für mathematisch geübte Leser: Die Strecke B_1B_3 ist nach dem Pythagoräischen Lehrsatz $= \sqrt{l^2 + (v\tau_A)^2}$.

Das Licht pflanzt sich längs dieser Strecke mit der Geschwindigkeit c fort; die Strecke B_1B_3 ist also auch $= c\tau_A$, und wir können τ_A aus der Gleichung berechnen:

$$c\tau_A = \sqrt{l^2 + (v\tau_A)^2}.$$

Diese ergibt für die gesuchte Zeit τ_A , welche der Lichtstrahl braucht, um von der Lichtquelle zum Spiegel zu gelangen:

$$\tau_A = \frac{l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Die Zeit τ_B ist einfach $= \frac{l}{c}$.

Der Beobachter B beobachtet also für denselben Vorgang eine andere Zeitdauer, derselbe Vorgang spielt sich für ihn während einer kürzeren Zeit ab als für den Beobachter A ¹. Der Faktor

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ist ja größer als 1; denn der Nenner ist kleiner als 1; wir sprechen hier nur von Geschwindigkeiten v , die kleiner als die Lichtgeschwindigkeit c sind.

Begriff der Zeitdauer und der Gleichzeitigkeit.

In dieser Form ist der Widerspruch der Experimente am deutlichsten, an dieser Form aber kann auch die Kritik am besten einsetzen. *Wie kommen wir dazu, zu erwarten, daß die beiden Beobachter die gleiche Zeitdauer messen müssen?* Wir glauben dabei an eine absolute Zeit, an ein ganz bestimmtes, für das ganze Universum gültiges Zeitmaß, einen ganz universellen Zeitablauf. Ist dieser Glaube vollberechtigt, durch Erfahrungen oder logisch eindeutig begründet, oder ist er vielmehr nur eine Gewohnheit, die wir aus unserem beschränkten mechanischen Erfahrungskreis willkürlich auf das Universum übertragen haben? Muß notwendig ein und derselbe Vorgang für zwei Beobachter, die unter verschiedenen Bedingungen messen, die in unserem Falle sich in zwei verschiedenen Bewegungszuständen befinden, dieselbe Zeit-

¹ Hierbei ist die Annahme gemacht, daß die Strecke l für beide Beobachter dieselbe Länge hat. Dies ist durchaus nicht selbstverständlich im Hinblick auf das Folgende; doch kann es durch einfache Symmetriebetrachtung bewiesen werden.

dauer besitzen, oder ist es nur eine Lücke in unserem Denken, die wir willkürlich durch diese Annahme ausfüllen?

Betrachten wir den *Begriff der Zeitdauer* und der *Zeitmessung* etwas näher. Was heißt das: „Der Zug kam um 16 Uhr in Berlin an?“ Offenbar das: „Die Bahnhofsuhr in Berlin zeigte 16, als der Zug ankam.“ „Der Zug ging um 8 Uhr in München ab“ heißt ebenso „Die Bahnhofsuhr in München zeigte 8, als der Zug abging“. Wie aber hängt die Zeit der Bahnhofsuhr in München mit der in Berlin zusammen? Wie kann ich dafür sorgen, daß gleiche Zeigerstellungen in München und in Berlin „gleichzeitig“ eintreten?

Jede unserer Aussagen über zeitliche Zusammenhänge von Ereignissen enthält eine Aussage über Gleichzeitigkeit. Hier liegen zwei grundsätzlich verschiedene Aussagen vor: „Gleichzeitig“ stand die Münchener Uhr auf 8, und der Zug fuhr ab. „Gleichzeitig“ standen die Münchener Uhr und die Berliner Uhr auf 8.

Die erstere Aussage enthält noch nichts Problematisches. Denn im Augenblick der Abfahrt kann der Beobachter die bei ihm befindliche Uhr ablesen und konstatieren, daß sie auf 8 steht. Bei genauerem Nachdenken über die zweite Aussage jedoch stoßen wir auf eine *Unklarheit*. Es ist noch nicht definiert, was „gleichzeitig an verschiedenen Orten“ bedeutet und wie wir diese „Gleichzeitigkeit“ feststellen können. Offenbar müssen wir ein Signal von München nach Berlin senden, welches die Zeit meldet. In dem Augenblick, in welchem das Signal in Berlin ankommt, kann die dort stehende Uhr gerichtet werden; wir alle kennen solche Uhren, die das automatisch besorgen, die elektrischen Uhren. Als Signal dient ein elektrischer Strom, und alle Uhren, deren Gang dieser elektrische Strom regelt, laufen praktisch synchron. Würden sie auch für die allerfeinsten Messungen synchron laufen? Wir müßten diese Frage bejahen, wenn die Übertragung durch den elektrischen Strom eine *momentane* wäre, d. h. wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Energie eine unendlich große wäre. Nun ist diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwar ungeheuer groß, so daß in unserem Beispiel unsere Uhren keinen praktisch in Betracht

kommenden Fehler zeigen würden, aber doch endlich; und wenn wir an Stelle der Entfernung München—Berlin eine viel größere setzen würden, so würden große Fehler zutage treten.

Was heißt z. B.: „Um 8 Uhr fand auf der Sonne eine große Explosion statt?“ Das könnte heißen: „Als eine irdische Uhr 8 zeigte, hat ein Erdbewohner die Explosion auf der Sonne gesehen“; doch wäre das eine Definition der Zeit auf der Sonne, die unseren Gewohnheiten widerspräche und wissenschaftlich ungeeignet wäre; denn das Licht braucht ja, wie wir wissen, etwa 500 Sekunden, um von der Sonne zur Erde zu gelangen. Also interpretieren wir unsern Satz lieber dahin: „Als eine irdische Uhr 8 Uhr 500 Sekunden zeigte, hat ein irdischer Beobachter die Explosion auf der Sonne gesehen.“ Die Definition des *Begriffs der Gleichzeitigkeit* ist hier schon schwieriger und hängt offenbar innig zusammen mit der *Geschwindigkeit des Signals*, welches ein Ereignis von der Sonne nach der Erde meldet. Und dieselbe Schwierigkeit äußerte sich auch in unserem vorigen Beispiel, wenn es sich um Messung sehr kleiner Zeiten (etwa $\sim 1/1000$ Sekunde) handeln würde.

Wir müssen also den Begriff der Gleichzeitigkeit an voneinander entfernten Orten und seinen Zusammenhang mit der Signalübertragung schärfer ins Auge fassen. Gäbe es unendlich schnell sich fortpflanzende Signale, so fiel die ganze Schwierigkeit weg; denn die Übertragung des Zeitsignals wäre eine momentane, und die Angaben aller durch dieses Signal regulierten Uhren wären identisch und synchron (d. h. sie gingen ganz gleich). Solche Signale kennen wir aber nicht, in keinem der Erfahrung zugänglichen Gebiet haben wir je etwas dergleichen beobachtet; wir erheben diese Beobachtung zum *Grundsatz*, ohne den alles Folgende in sich zusammenbräche: *Es gibt in der Natur keine unendliche Signalgeschwindigkeit*. Und wir ergänzen diesen Grundsatz durch die Erfahrung, daß eine und nur eine Geschwindigkeit in der Natur vorhanden ist, welche von Eigenschaften der Stoffe ganz unabhängig, universell und nur eine Eigenschaft des leeren Raumes ist, diejenige Naturkonstante, welche mit dem

größten Teil der uns bekannten Naturvorgänge aufs innigste verknüpft ist, welche in den umfassendsten Gleichungen der Physik vorkommt — die Geschwindigkeit der Ausbreitung der elektromagnetischen Energie, die *Lichtgeschwindigkeit*.

Synchrone Uhren.

Mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit können wir Uhren an verschiedenen Punkten in folgender Weise synchron machen; besser gesagt: wir können den Synchronismus zweier *in Ruhe befindlicher* Uhren U_1 und U_2 in folgender Weise definieren: Die beiden Uhren gehen synchron, wenn das Licht von U_1 nach U_2 gerade solange braucht wie von U_2 nach U_1 ; das bedeutet: wenn ein Lichtsignal zu der (an U_1 abgelesenen) Zeit t_1 bei U_1 abgeht und zu der (an U_2 abgelesenen) Zeit t_2 bei U_2 ankommt, von dort reflektiert wird und zu der (an U_1 abgelesenen) Zeit t_3 bei U_1 wieder ankommt, so laufen U_1 und U_2 synchron, wenn $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. Die Zeitdefinition, die Meßvorschrift für den zeitlichen Ablauf der Naturvorgänge, ist damit eindeutig gegeben für ein System von beliebig vielen im Raum verteilten Uhren, die alle relativ zueinander in Ruhe sind. Wir würden unsere Uhren auf der Erde auch nach dieser Vorschrift regulieren müssen, wenn wir damit tausendstel Sekunden Unterschied bei entfernten Uhren messen müßten oder wenn uns zum Synchronmachen nicht der elektrische Strom (bzw. die drahtlose Telegraphie, Nauener Zeitzeichen!) zur Verfügung stünde, sondern nur ein langsames Signal, wie etwa der Schall. Bei der ungeheuren Geschwindigkeit der elektrisch-optischen Signale (die ja $7^{1/2}$ mal in der Sekunde den Äquator umkreisen können) begnügen wir uns *praktisch* damit, Uhren synchron zu nennen, wenn sie bei Eintreffen des Signals dieselbe Zeigerstellung haben. Dabei machen wir den Fehler, die Zeit zwischen Aussendung und Eintreffen bzw. die Zeitdifferenz des Eintreffens an verschiedenen Orten zu vernachlässigen. Dieser Fehler macht sich im täglichen Leben nicht geltend, bleibt aber für grundsätzliche Erwägungen und für sehr feine Messungen ein Fehler.

Unsere Vorschrift gilt aber nur für solche Uhren, welche

relativ zueinander ruhen; sie ist anwendbar auf ruhende Uhren und auf solche, welche alle in derselben gleichförmigen und geradlinigen Bewegung begriffen sind, dagegen *nicht mehr, wenn die einzelnen Uhren sich relativ zueinander bewegen*. Greifen wir auf unsere beiden Beobachter zurück, so heißt das: wir können eine Anzahl Uhren im Raum verteilen, die alle relativ zu *A* ruhen, und sie alle synchron machen durch Befolgung unserer Vorschrift. Diese Uhren sind imstande, jeden beliebigen Vorgang zeitlich eindeutig zu verfolgen. Sie geben „die Zeit des Systems *A*“ an. Ebenso können wir eine Anzahl Uhren aufeinander beziehen, welche sich in gleichem Bewegungszustand wie *B* befinden und welche bei Befolgung unserer Meßvorschrift „die Zeit des Systems *B*“ angeben. Dagegen ist es mit *keinen Mitteln der Welt möglich, zwei Uhren aufeinander zu beziehen, von denen die eine sich in A, die andere sich in B befindet*; denn unsere Definition ist nicht mehr anwendbar und ist (bei Ausschluß unendlicher Signalgeschwindigkeit) durch keine anwendbare zu ersetzen.

Daß tatsächlich die „Zeit des Systems *A*“ nicht identisch ist mit der „Zeit des Systems *B*“, zeigt uns am klarsten unser obiges Gedankenexperiment. Derselbe Vorgang dauerte in der „Zeit des Systems *B*“ $\frac{l}{c}$ Zeiteinheiten, in der „Zeit des Systems *A*“ dagegen

$$\frac{l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Zeiteinheiten. Der *Widerspruch* von vorhin ist aber *verschwunden*; denn wir mußten einsehen, daß es *unmöglich* ist, mit Hilfe der uns bekannten Naturvorgänge eine „Zeit“ *schlechthin* zu definieren, daß wir immer nur „Zeiten eines bestimmten Systems“ messen können, und daß es also so viel „Zeiten“ gibt als Bewegungszustände, d. h. unendlich viele. Der Begriff „*Zeitdauer eines Vorgangs*“ ist *etwas Relatives* und hat, absolut genommen, keinen Sinn; die Zeitdauer desselben Vorgangs ist eine andere, wenn sie von einem relativ zu dem Laboratorium, in welchem der Vorgang sich abspielt,

ruhenden (*B*) oder von einem relativ dazu bewegten (*A*) Beobachter gemessen wird, weil verschiedene Systeme von Uhren dazu verwandt werden müssen, die wohl innerhalb des einzelnen Systems, aber nicht innerhalb verschiedener Systeme zu synchronem Gang gebracht werden können.

Fünftes Kapitel.

Die paradoxen Folgerungen.

Die physikalische Schwierigkeit ist mit dieser Grundanschauung der sog. „speziellen Relativitätstheorie“ behoben; die ganze Summe der experimentellen Erfahrungen ist theoretisch einwandfrei zusammengefaßt, der Widerspruch behoben; aber dabei ergeben sich Folgerungen, die allem früheren Denken ganz ferne gelegen haben, die altgewohnte Anschauungen umstoßen und darum zunächst paradox erscheinen müssen. Durch diese Folgerungen ist die Relativitätstheorie berühmt geworden, und dieser Folgerungen wegen wurde sie auch leidenschaftlich bekämpft. Wenn wir nun diese Folgerungen näher betrachten, so müssen wir uns immer vor Augen halten, daß es keine *Erfahrungen* sind, welche sie uns als paradox erscheinen lassen, daß auch keine logischen Widersprüche in dem System enthalten sind. Die Sicherheit, mit der man vor Einstein gewisse Aussagen über Zeitdauer, Raumabmessungen usw. festhielt, rührte weder von Erfahrung noch von zwingenden logischen Erwägungen her, sondern nur von der Gewohnheit des alltäglichen Lebens.

Zeitdauer eines Vorgangs.

Gestützt auf die Richtigkeit der Versuche von Fizeau und Michelson, mußten wir den Schluß ziehen, daß die *Zeitdauer* eines und desselben Vorgangs verschiedene Werte haben kann, je nach dem Bewegungszustand des Beobachters relativ zu den Geräten, mit welchen der Vorgang aufgenommen wird. Diese verschiedenen Werte der Zeitdauer hängen

aber zwangsläufig zusammen; es lösen sich hier keineswegs die Begriffe auf, und der Begriff der zeitlichen Dauer hat immer noch einen ganz bestimmten *eindeutigen Sinn*¹. Kennt man die Zeitdauer eines Vorgangs für einen Beobachter, so kann man sie für jeden anders bewegten Beobachter berechnen.

Die Zeit, welche der Lichtstrahl von der Quelle P zum Spiegel S_2 braucht, ist gegeben durch die Entfernung, die er zu durchmessen hat, geteilt durch seine Geschwindigkeit. Nun ist die Geschwindigkeit für A und B dieselbe; die Strecke von der Quelle zum Spiegel ist jedoch für B gleich B_1B_2 in Abb. 10, für A gleich B_1B_3 , also größer. Daraus folgt unmittelbar, daß derselbe Vorgang für den Beobachter A länger dauert als für B . Dies ist im extremsten Fall, wenn die Geschwindigkeit v von B relativ zu A gleich der Lichtgeschwindigkeit wird, am einfachsten einzusehen; dann gelangt nämlich der von P ausgehende Lichtstrahl für den Beobachter A überhaupt nicht nach S_2 ; denn der Spiegel läuft ja ständig vor dem Lichtstrahl davon. Die Zeitdauer desselben Vorgangs, der, von B aus gesehen, einen bestimmten Wert hat (nämlich einfach $\frac{l}{c}$), wird für A unendlich groß.

Und nun können ja nicht zwei Naturvorgänge miteinander im Widerspruch stehen. Was für die Zeitdauer dieses einen Vorgangs gilt, muß ganz allgemein für *alle Zeitmessung* gelten; man kann ja den Hin- und Rückgang des Lichtes als Uhr zur Zeitmessung verwenden, wie wir oben in unserem Gedankenexperiment taten; man kann auch andere Uhren verwenden; aber diese müssen zweifellos alle miteinander übereinstimmen. Denn die Naturvorgänge können für B keine anderen sein als für A .

Wir können unser Relativitätsprinzip ja auch allgemein so aussprechen: Der Bewegungszustand von B gegenüber dem Äther ist durchaus derselbe wie der von A ; ein absoluter Bewegungszustand existiert überhaupt nicht, man kann mit demselben Recht sagen: „ A ruht, und B bewegt sich“, als

¹ Was in der modernen Quantentheorie nicht mehr der Fall ist!

„*B* ruht, und *A* bewegt sich“. Infolgedessen müssen alle Naturvorgänge für *A* ganz genau so verlaufen wie für *B*; *die Naturgesetze lauten für A und B gleich.*

A benutzt nun bestimmte Uhren und stellt fest, daß sie als Uhren tauglich sind, d. h. daß sie genau in gleicher Weise immer denselben Vorgang zeigen, so daß aus der Anzahl dieser Vorgänge auf die Zeit geschlossen werden kann; solche Uhren sind z. B. die Erde in ihrer Umdrehung, Pendel- und Federschwingungen, Spektrallinien mit ihrer ganz bestimmten Anzahl Lichtschwingungen in der Sekunde. Dann kann *B* nicht etwa herausfinden, daß die Erddrehung wechselndes Tempo hat, oder daß die Pendelschwingungen nicht alle gleich sind. Wenn *A* gemessen hat, daß ein Pendel zweimal hin und her gegangen ist, während die Erde 15 Bogensekunden ihrer Achsendrehung zurücklegt und während eine Welle der drahtlosen Telegraphie $7\frac{1}{2}$ mal um den Äquator läuft, so kann *B* keine andern Zahlenverhältnisse messen. Also muß für jede Uhr gelten, was für die Lichtuhr aus dem scheinbaren Widerspruch der Versuche unmittelbar hervorging. *Jede Uhr*, die *B* benutzt, mißt kürzere Zeiten als eine gleichgestaltete Uhr, die *A* benutzt; *jeder beliebige Vorgang*, der von Instrumenten angezeigt wird, die mit *B* ruhen, spielt sich für *B* in einer kürzeren Zeit ab als für *A*.

Und da man schließlich auch einen *Organismus*, etwa einen alternden Menschen, als Uhr verwenden kann, so gilt die anscheinend ganz paradoxe Konsequenz: Für *A* altert ein mit *B* bewegter Organismus langsamer als für *B* selbst. Wenn *B* sich gegen *A* mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, so stellt *A* mit Neid fest, daß *B* gar nicht älter wird, sondern ewig jung bleibt. Leider hat *B* selbst davon gar nichts; denn er selber stellt ja für sich — gerade wie *A* für sich — fest, daß er in gewöhnlicher Weise älter wird; im Gegenteil: *B* stellt natürlich, da für ihn ja alles analog wie für *A* verläuft, seinerseits mit seinen Uhren fest, daß *A* ewig jung bleibt. Dies zur Warnung für Leserinnen: Vom physikalischen Standpunkt aus erhält Bewegung nur in den Augen der Leute, die sich nicht mitbewegen, jung; man selbst merkt nichts davon (vom medizinischen Standpunkt aus mag das

anders sein; aber diese Erfahrungen beziehen sich nur auf ganz langsame Bewegungen, nicht auf Lichtgeschwindigkeit).

Man hüte sich davor, aus diesen Aussagen allzuviel Erstaunliches herauszulesen; sie sind paradox, aber nicht absurd. Der Vorgang selbst als eine physikalische Erscheinung ist natürlich vollkommen unabhängig davon, ob er von *A* oder von *B* aus gemessen wird. Die Schwingung eines Pendels, das Altern eines Menschen sind Naturerscheinungen, die für sich und im Erleben eines Menschen bestehen, und an denen durch irgendeine Theorie nichts verändert werden kann. Nur die Art, wie wir die Naturvorgänge *ausmessen und quantitativ, mit Zahlen, beschreiben*, wird durch die Relativitätstheorie vollkommen umgestürzt. Wie früher, schließen wir auch jetzt noch, daß, wenn *A* den zeitlichen Verlauf eines Vorgangs verfolgt hat, auch der zeitliche Verlauf für *B* zwangsläufig festgestellt und angegeben werden kann; nur sagen wir nicht mehr, daß er für *A* und *B* durch dieselben Zahlenangaben beschrieben sei. Und damit ist der Begriff der Zeitmessung nur klarer gefaßt wie früher und seiner absoluten Bedeutung beraubt. Wieweit der Begriff der „Zeit“ selbst davon mit betroffen wird, wollen wir als offene Frage ansehen; es gibt ja auch ein psychisches Erlebnis „Zeit“, das von der Messung ganz unabhängig ist.

Dem früheren Begriff der Zeitmessung lag folgende Fiktion zugrunde: „Man kann irgendwo in der Welt eine Uhr aufstellen, die mit unendlicher Signalgeschwindigkeit, so daß gar keine Umrechnung nötig ist und Empfangszeit und Uhrzeit absolut zusammenfallen, überallhin ihre Zeigerstellung meldet. Diese Uhr mißt die Zeit.“ Aber der liebe Gott hat keine solche Uhr aufgestellt, und wir haben an die Möglichkeit einer solchen Uhr nur deshalb geglaubt, weil es so bequem und für unser tägliches Leben durchaus praktisch war. Nun nötigen uns die physikalischen Erfahrungen zu dem Schluß: „Gott hat diese Uhr nicht aufgestellt, weil er mit seinen Naturgesetzen die Existenz einer solchen Uhr verboten hat.“ Aber die Naturvorgänge laufen natürlich von dieser Erkenntnis unabhängig ab und bleiben zeitlich erfaßbar und

meßbar; nur die Zahlwerte sind andere, je nach dem Bewegungszustand des Beobachters.

Gleichzeitigkeit.

Verfolgen wir die Paradoxe weiter, so ist leicht einzusehen, daß der Begriff der *Gleichzeitigkeit* seinen absoluten Sinn verliert; mit der Kritik dieses Begriffes begann Einsteins Gedankengang. Für den Beobachter *B* braucht der Lichtstrahl gerade so lang von *P* zum Spiegel S_1 wie von *P* zum Spiegel S_2 ; die beiden Ereignisse „Eintreffen bei S_1 “ und „Eintreffen bei S_2 “ sind gleichzeitig; die bei S_1 und S_2 stehende Uhr zeigen dieselbe Stellung bei Eintreffen des Lichtsignals. Dagegen für den Beobachter *A* kommt das Licht früher nach S_2 wie nach S_1 ; die Uhr, welche *A* in dem Raumpunkt aufgestellt hat, an welchem der Lichtstrahl S_2 trifft, zeigt bei Eintreffen des Signals eine frühere Zeit an als die synchron gehende Uhr, welche *A* an dem Raumpunkt aufgestellt hat, an welchem der Lichtstrahl S_1 erreicht. Zwei Ereignisse, die für einen Beobachter *am gleichen Ort* gleichzeitig stattfinden, sind für alle Beobachter gleichzeitig; zwei Ereignisse, die an *verschiedenen Orten* stattfinden und die ein Beobachter „gleichzeitig“ nennt, sind für den anders bewegten Beobachter *nicht* „gleichzeitig“.

Räumliche Abmessungen.

Auch die *Längen* behalten in der Relativitätstheorie nicht ihre absolute, für alle Beobachter gleiche Größe. Dies ist wohl der Fall für alle Körperdistanzen senkrecht zur Bewegungsrichtung; wir haben diese (mathematisch leicht zu beweisende) Unveränderlichkeit als Annahme schon unsern Betrachtungen auf S. 44 zugrunde gelegt; die Entfernung von *P* nach S_2 ist dieselbe für *B* und *A*. Nicht so die Entfernung von *P* nach S_1 . Dies kann man auf folgende Weise einsehen: Es werde in dem Laboratorium *B* der Michelsonsche Versuch angestellt; die obengeschilderte Drehung um 90° ändert nichts an den Interferenzstreifen. Nun kann natürlich nicht der Beobachter *A* eine Verschiebung von Interferenzstreifen feststellen, die *B* nicht feststellt; denn ob

Streifen unverändert bleiben oder sich verschieben, ist eine ganz objektiv und absolut vorhandene Tatsache, die für alle Beobachter dieselbe sein muß. Der Beobachter *A* sieht nun einen Lichtausbreitungsvorgang genau entsprechend der Rechnung von S. 39, d. h. er müßte eine solche Verschiebung sehen; denn für ihn ist ja, wie die Rechnung zeigt, die Zeit von *P* über S_2 nach *P* zurück von der Zeit über S_1 verschieden. Dies ist aber ein Trugschluß; die Zeiten wären verschieden, wenn *alle Längen gleich* wären; aber die Maßstabsverschiedenheit der Zeitdauern hat eine Verschiedenheit der Längen für verschieden bewegte Beobachter zur Folge. Die Länge von *P* nach S_1 erscheint dem Beobachter *A* gegenüber der Länge desselben Körpers, der gegen *A* ruht, *verkürzt*. Hat man zwei ganz gleichgestaltete Körper, etwa zwei Kugeln

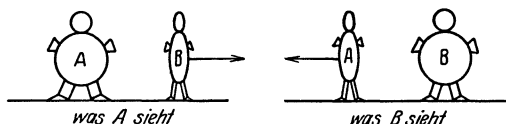


Abb. 11. Streckenverkürzung in der Relativitätstheorie.

vom gleichen Durchmesser, eine bei *A*, eine bei *B*, so hält *A* seine Kugel für eine Kugel, auch *B* seine Kugel für eine Kugel, aber *A* hält die Kugel *B* für ein Ellipsoid, und *B* hält die Kugel *A* für ein Ellipsoid (Abb. 11).

Auch hier sei eine kurze Rechnung für den Leser, der den Pythagoräischen Lehrsatz und den Begriff der Wurzel noch kennt, eingeschaltet:

Für den Beobachter *A* breitet sich das Licht mit der Geschwindigkeit *c* relativ zu *A* ohne Rücksicht auf den Bewegungszustand von *B* aus; der Lichtstrahl braucht von *P* über S_2 nach *P* zurück nach S. 39 die Zeit $\frac{2 l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}}$, von *P* über S_1 nach *P* zurück die Zeit $\frac{l_1}{c - v} + \frac{l_1}{c + v} = \frac{2 l_1 c}{c^2 - v^2}$.

Da diese beiden Zeiten gleich sein müssen, gilt

$$\frac{2 l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2 l_1 c}{c^2 - v^2} \quad \text{oder} \quad l_1 = l_2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

l_1 ist immer kleiner als l_2 ; es wird gleich Null, wenn $v = c$ wird, also wenn das Laboratorium *B* sich mit Lichtgeschwindigkeit gegen

A bewegt, und verliert allen Sinn (denn die Wurzel aus einer negativen Zahl ist imaginär, hat keinen reellen Wert), wenn v größer als c wird.

Überlichtgeschwindigkeit.

Wir erhalten so ein weiteres berühmtes Ergebnis der Relativitätstheorie: *Ein Körper kann sich nicht mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen.*

Dieses Ergebnis kann auch der unmathematische Leser einsehen. Wenn auf B irgendwelche Versuche angestellt werden,

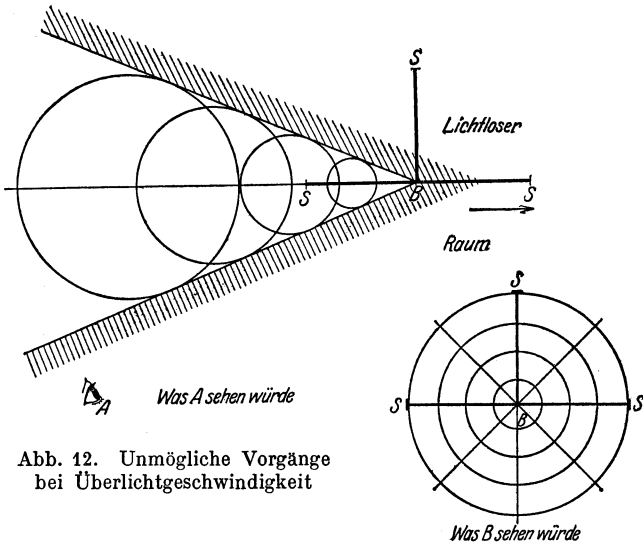


Abb. 12. Unmögliche Vorgänge bei Überlichtgeschwindigkeit

bei welchen Lichtstrahlen von P aus die drei Spiegel S erreichen oder wieder nach P zurückkehren, dort Interferenzstreifen erzeugend, so muß doch A diese Interferenzstreifen oder das Aufleuchten der Spiegel als objektive Tatsachen auch sehen. Gäbe es nun aber eine Bewegung von B gegen A mit Überlichtgeschwindigkeit, so würde A ein Bild sehen, wie es Abb. 12 zeigt und wie es hinter Geschossen, die sich in der Luft mit Überschallgeschwindigkeit bewegen, beobachtet wird, und zwei Spiegel blieben für ihn im Dunkel. A würde also, wenn es eine Überlichtgeschwindigkeit gäbe, gar nicht das-

selbe *Tatsachenbild* wie *B* haben, was offenbar *absurd* ist. *A* kann andere Zeitdauern und Längen messen wie *B*; aber es ist nicht möglich, daß *B* etwa den Spiegel S_1 erleuchtet sieht und *A* nicht, oder daß *B* Interferenzstreifen (Wiedervereinigung der Strahlen infolge der beiden Reflexionen an S_1 und S_2) sieht und *A* nicht. Aus derselben Überlegung können wir auch ohne Rechnung sehen, daß bei Annäherung der Geschwindigkeit an die Lichtgeschwindigkeit die Entfernung l_1 für *A* immer kleiner und kleiner und schließlich zu Null werden muß; denn bei Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit sieht ja *A* den Punkt *B* ständig auf der Front der Lichtwellen in der Richtung von *P* nach S_1 . Das Licht würde für *A* nie zum Spiegel S_1 gelangen, wenn dieser eine endliche Entfernung von *P* hätte.

Experimentelle Prüfung.

Diese Gedankengänge und ihre Konsequenzen erscheinen auf den ersten Blick sehr paradox; trotzdem widersprechen sie in nichts der Erfahrung; so ist noch nie Überlichtgeschwindigkeit beobachtet worden. Andererseits läßt sich auch nicht unmittelbar aus der Erfahrung die Relativität der Längen und Zeiten erweisen. Prinzipiell müßte dies wohl möglich sein; vor allem haben wir ja in den *Spektrallinien*¹ außerordentlich feine und exakte Uhren zur Verfügung; eine Spektrallinie, wie sie z. B. in den *Fraunhoferschen* Linien auf der Sonne oder in der Natriumflamme wohl jedem Leser einigermaßen bekannt sein wird, ist eine Lichtaussendung von ganz bestimmter Schwingungszeit, etwa von tausend Billionen Schwingungen in der Sekunde. Und die Anzahl dieser Schwingungen bzw. die Zeitdauer einer solchen Schwingung ist mit Hilfe der feinen optischen Instrumente (auch wieder durch die Interferenzerscheinungen) sehr genau zu bestimmen. Man braucht also nur diese Zeitdauer, d. h. den Gang dieser Spektrallinien-Uhr zu vergleichen, wenn die Linie einmal von einem ruhenden und einmal von einem rasch bewegten Körper ausgesandt wird. Wenn wir (als Beobachter *A*)

¹ Genaueres siehe unten S. 115.

eine solche Linie auf einem bewegten Körper (B) beobachten, so muß uns die Schwingungsdauer länger erscheinen als die der gleichen Linie, die ein relativ zu uns ruhender Körper aussendet; die Spektrallinie muß nach Rot verschoben erscheinen; denn die Zeitdauer eines beliebigen Vorgangs bei B scheint für A größer als für B und größer als derselbe Vorgang in einem bei A ruhenden Laboratorium. Leider hat es sich bisher als unmöglich erwiesen, diesen oder einen analogen Versuch auszuführen. Wir haben zwar in den *Kanalstrahlteilchen* schnell genug (mit etwa $\frac{1}{10}$ Lichtgeschwindigkeit) bewegte Laboratorien, die Spektrallinien aussenden; aber es überlagern sich mehrere störende Effekte, so daß ein beweiskräftiger Versuch nicht ausgeführt werden konnte. Immerhin sind alle diese Aussagen der Relativitätstheorie zwar paradox für das gewöhnliche Denken, und sie beziehen Begriffe in die Physik ein, die früher ganz außerhalb der Physik standen, aber sie sind nicht revolutionär für die Physik; sie widersprechen ja keinem der früher aufgedeckten Naturgesetze. Dies wird anders bei den nun zu besprechenden Ergebnissen für die Bewegung von Körpern, mit welchen die Relativitätstheorie in die eigentliche Domäne der Mechanik eindringt.

Sechstes Kapitel.

Die Mechanik der Relativitätstheorie.

Addition von Geschwindigkeiten.

Wir haben ja oben schon gesehen, daß kein Körper sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen kann; diese Aussage greift schon in die Gesetze der Mechanik ein; denn es ist leicht einzusehen, daß sie nicht mit dem oben ausführlich geschilderten *Additionstheorem der Geschwindigkeiten* verträglich ist. A sei ein am Ufer stehender Beobachter, B sei ein Schiff, das sich nun — was natürlich nur ein Gedankenexperiment ist — etwa mit $\frac{3}{4}$ Lichtgeschwindigkeit bewege, und auf dem Schiff B bewege sich nun in der gleichen Richtung wie das Schiff ein Körper ebenfalls mit $\frac{3}{4}$ Licht-

geschwindigkeit relativ zum Schiff. Nach dem Additionstheorem der alten Mechanik müßte sich dieser Körper gegenüber A mit anderthalbfacher Lichtgeschwindigkeit bewegen; dies ist nach der Relativitätstheorie nicht möglich; also ist das *alte Additionstheorem der Geschwindigkeiten mit der Relativitätstheorie nicht verträglich*. Soll diese konsequent durchgeführt werden, so muß an Stelle des alten ein neues Additionstheorem treten mit der Eigenschaft, daß bei Summierung zweier Geschwindigkeiten nie die Lichtgeschwindigkeit überschritten wird und daß eine zur Lichtgeschwindigkeit hinzutretende Geschwindigkeit an dieser nichts ändert. Dies klingt wieder sehr paradox; aber man erinnere sich an das Fundament der ganzen Relativitätstheorie, das man ja auch etwa folgendermaßen aussprechen kann: „Wenn B Licht mit Lichtgeschwindigkeit c aussendet, so sieht A , obwohl zu dieser Lichtgeschwindigkeit noch die Geschwindigkeit v von B gegenüber A hinzukommt, doch das Licht sich nur mit derselben Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten.“ Es ist auch gar kein sehr komplizierter Ausdruck, der sich mathematisch ergibt, und es mag auch unmathematischen Lesern ein Beispiel für die Weisheit mathematischer Formeln sein, wenn ich ihn vollkommen zitiere. Wenn zu einer Geschwindigkeit v eine gleichgerichtete V noch hinzukommt, so wie oben die Geschwindigkeit des auf dem Schiff bewegten Körpers zur Schiffsgeschwindigkeit hinzukommt, so resultiert daraus nicht, wie in der Mechanik, die Gesamtgeschwindigkeit $w = v + V$, sondern

$$w = \frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}},$$

wobei wieder c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet; setzen wir nun z. B. wie in unserem obigen Beispiel

$$v = V = \frac{3}{4}c, \text{ so wird } \frac{\frac{3}{4}c + \frac{3}{4}c}{1 + \frac{9}{16}} = \frac{24}{25}c;$$

und setzen wir z. B. $v = c$ und lassen V beliebig, so wird

$$w = \frac{c + V}{1 + \frac{V}{c}} = c \frac{1 + \frac{V}{c}}{1 + \frac{V}{c}} = c.$$

Für Liebhaber mathematischer Überlegungen mag hier auch die Ableitung dieses Additionstheorems gegeben werden; andere Leser mögen diesen Abschnitt übergehen;

Es bewege sich das Schiff *B* mit der Geschwindigkeit *v* gegen *A*, und der Beobachter *B* verfolge auf dem Schiff einen Körper (Hund), der in der Zeit t_B die Strecke *l* (Abb. 13), deren Richtung mit der von *v* übereinstimmt, zurücklegt. *B* sagt: „Dieser Körper bewegt sich mit der Geschwindigkeit $V = \frac{l}{t_B}$.“ Nun beobachtet *A* denselben Vorgang; für ihn herrschen kompliziertere Verhältnisse. Er sagt: „Ich beobachte den Stand einer bei B_1 aufgestellten Uhr

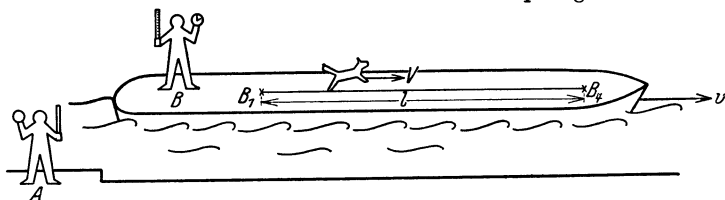


Abb. 13. Addition von Geschwindigkeiten.

des Beobachters *B*, wenn der Körper bei B_1 abgeht, den Stand einer ebensolchen Uhr bei B_4 , wenn der Körper in B_4 ankommt, und die Entfernungsmarke von B_1 aus, die Beobachter *B* in B_4 angebracht hat. Man könnte die Entfernung einfach durch die aus der Differenz der Uhrablesungen bei B_1 und B_4 ermittelten Zeit dividieren und so die Geschwindigkeit erhalten, wenn nicht dieser *B* ganz verrückte Maße hätte; aber erstens sind seine Maßstäbe falsch, zweitens gehen seine Uhren zu langsam, und drittens sind die Uhren B_1 und B_4 gar nicht synchron gestellt; B_4 geht vielmehr gegenüber B_1 nach. Ich muß also die dortige Entfernungsangabe

l mit $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ multiplizieren, die dortige Zeitangabe t_B mit $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ dividieren, um die wahre Zeit — d. h. meine, die *A*-Zeit — zu erhalten. Außerdem muß ich zu dieser Zeitdauer noch den Betrag $\frac{lv}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ¹, um den B_4 gegen B_1 nachgeht, hinzuaddieren.

¹ Dies ist folgendermaßen einzusehen: Wir konstatierten S. 39, daß die Ankunft eines von *P* ausgehenden Lichtsignals in S_1 und S_2 für *B*

Die gesamte Zeitdauer ist also

$$t_A = \frac{t_B}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{lv}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

inzwischen hat der Körper eine Strecke zurückgelegt, die sich zusammensetzt (und zwar rein additiv! Reine Geometrie!) aus dem vom Laboratorium B gegenüber A in der Zeit t_A zurückgelegten Weg $v t_A$ und dem Weg $B_1 B_4$, der für A , mit $l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ richtig gemessen ist. Dividiere ich nun diesen Weg durch diese Zeit, so erhalte ich

$$\begin{aligned} w &= \frac{v t_A + l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{t_A} = v + \frac{l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{\frac{t_B}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{lv}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}} = \\ &= v + \frac{l}{t_B} \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{1 + \frac{l}{t_B} \cdot \frac{v}{c^2}} = v + V \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{1 + \frac{Vv}{c^2}} = \frac{v + V}{1 + \frac{Vv}{c^2}}. \end{aligned}$$

Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit.

Und weiter kann angesichts dieses veränderten Additionstheorems auch das ganze Fundament der alten Mechanik nicht unverändert bestehen. Wir sahen, daß ein Körper stets

gleichzeitig erfolge, für A nicht. Für A ist die Zeit $P \rightarrow S_2$ $t_3 = \frac{l}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$,

die Zeit $P \rightarrow S_1$ $t_4 = \frac{l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c - v}$, wobei schon berücksichtigt ist, daß die

Strecke PS_1 für A nicht gleich l , sondern gleich $l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ist. Die

Zeitdifferenz $t_4 - t_3 = \frac{lv}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, die von B aufgestellten Uhren haben

aber gleiche Zeigerstellung, wenn das Licht eintrifft, also schließt A , daß die Uhr S_1 gegen P und S_2 um $t_4 - t_3$ nachgehe.

durch eine angreifende Kraft beschleunigt wird und daß zwischen Kraft und Beschleunigung Proportionalität herrscht nach dem Gesetze:

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung.}$$

In der alten Mechanik ist die Masse ein unveränderlicher, nicht von der Geschwindigkeit abhängiger Wert; zu einer bestimmten Geschwindigkeitsänderung innerhalb einer bestimmten Zeit, also etwa um 1 m/s in einer Sekunde, gehört dieselbe Kraft, ob der Körper vorher die Geschwindigkeit Null oder 300 000 km/s gehabt hat. Dies kann nun unmöglich innerhalb der Relativitätstheorie der Fall sein; denn wir wissen ja schon, daß ein mit Lichtgeschwindigkeit bewegter Körper überhaupt nicht mehr beschleunigt, d. i. auf eine höhere Geschwindigkeit gebracht werden kann; keine Kraft der Welt könnte dazu ausreichen. Daraus folgt, daß die *Masse eines Körpers mit der Geschwindigkeit wachsen und bei Lichtgeschwindigkeit unendlich groß werden muß*; denn nur in diesem Fall ruft eine Kraft offenbar keine Beschleunigung hervor. Diesmal soll auch für mathematisch geschultere Leser die Ableitung nicht gegeben werden; denn sie erfordert ein zu umständliches Eindringen und wirft Probleme auf, die wir hier umgehen können; nur das Ergebnis ist vielleicht von Interesse; die Masse wird gleich

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

wenn m_0 die Masse bei Geschwindigkeit Null bedeutet.

Wir hatten oben als einen Triumph der Elektronentheorie die von der Erfahrung bestätigte Aussage kennengelernt, wonach die Masse eines Elektrons mit der Geschwindigkeit wachsen muß; hier finden wir dieselbe Aussage für jede beliebige Masse, aber das Gesetz des Anwachsens mit der Geschwindigkeit ist ein anderes wie in der alten Elektronentheorie. Die Versuche, bei welchen das Gesetz nachgeprüft werden kann, sind nur an Elektronen angestellt, da andere Körper nicht mit den nötigen großen Geschwindigkeiten bewegt werden können; es hat sich eine bessere Überein-

stimmung mit der Relativitätstheorie als mit der alten Elektronentheorie ergeben.

Erhaltung der Masse und Erhaltung der Energie.

Mit dieser Zunahme der Masse eines Körpers hängt noch eine weitere — und wohl die bedeutungsvollste — Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie zusammen, zu deren Erklärung nun etwas weiter ausgeholt werden muß:

In der alten Mechanik war die Konstanz und die *Erhaltung der Masse* einer der Hauptgrundsätze; neben diesen Erhaltungssatz trat aber noch ein anderer, der in seiner Erweiterung im Bereich der Wärmelehre als einer der Hauptsätze der gesamten Physik erschien, der Satz von der *Erhaltung der Energie*. Es wird wohl den meisten Lesern willkommen sein, wenn hier mit einigen Worten erläutert wird, um was es sich bei diesem Satz handelt: Wenn wir einen Stein in die Höhe werfen, so wird seine Geschwindigkeit immer kleiner und kleiner, schließlich wird sie Null, der Körper kehrt um; seine Geschwindigkeit wird wieder größer und erreicht am Boden wieder die Anfangsgröße. Wenn wir eine Feder oder einen Bogen spannen, so müssen wir eine bestimmte Arbeit leisten, um so mehr, je stärker wir spannen. Lassen wir dann los, so fliegt der Pfeil oder das Geschöß mit um so größerer Geschwindigkeit fort, je mehr Arbeit wir vorher hereingesteckt haben. Der Leser mag verzeihen, wenn ihm hier der Begriff der Arbeit nicht exakt erklärt wird¹; es genügt für unsere Zwecke, daß er sich unter „Arbeit“ das denkt, was er im täglichen Leben so nennt. Nun kann man die mechanischen Gesetze so formulieren, daß man einem mit bestimmter Geschwindigkeit (v) fliegenden Körper von bestimmter Masse (m) eine Energie zuschreibt, die man *kinetische Energie* nennt ($m\frac{v^2}{2}$) und für diese Energie das Gesetz aufstellt, sie sei wesensgleich mit der Arbeit und *in Arbeit verwandelbar*. Bei unserm Beispiel des Bogens wird die Arbeit in kinetische Energie umgesetzt; beim Wurf aufwärts

¹ Genaueres unten S. 114.

wird die kinetische Energie dazu verwandt, um beim Aufsteigen des Körpers Arbeit gegen die Schwere zu leisten; beim Abwärtsfallen leistet die Schwere Arbeit und erzeugt wieder kinetische Energie. Und diese Umwandlung zweier mechanisch genau definierter Größen ineinander geht quantitativ vor sich; d. h. man kann genau berechnen, welche Arbeit ein Körper von gegebener kinetischer Energie leisten kann und welche kinetische Energie durch eine gegebene Arbeit erzeugt werden kann. Im speziellen bleibt die kinetische Energie in einem System von Körpern unverändert erhalten, wenn keine Arbeit durch Kräfte von außen an dem System geleistet wird.

In der Wärmelehre ist dieser Satz nun ungeheuer erweitert worden. Die *Wärmemenge* selbst wurde durch Robert Mayer als eine *Art Energie* erkannt; innerhalb aller physikalischen Erscheinungsgruppen fand man Größen, die als „Energie“ angesprochen werden konnten, d. h. Größen, die in quantitative Beziehung zur Wärmemenge oder zur kinetischen Energie gebracht werden konnten. Und es ließ sich für den ganzen Bereich der physikalischen und chemischen Erfahrungen der Satz aussprechen, den man seit einem Jahrhundert als einen der fundamentalsten der ganzen Naturwissenschaft ansieht: Es gibt viele Arten von Energien, die quantitativ ineinander übergehen können; es können sich ständig die *Formen der Energie ändern*, aber die *Größe der einmal vorhandenen Energie bleibt erhalten*. Der auf den Boden fallende und dort liegende Stein hat seine kinetische Energie verloren, dafür ist eine Wärmemenge entstanden, die genau gleich dieser kinetischen Energie ist. Die Wärmemenge, welche der Dampf in der Maschine abgegeben hat, ist (soweit sie nicht als Wärmemenge auf andere Maschinenteile übergegangen ist) in der kinetischen Energie der drehenden Wellen und Schwungräder vorhanden, geht in der Dynamomaschine aus mechanischer in elektrische Energie über, aus elektrischer Energie in die Wärme der Glühlampe, von dort in Strahlungsenergie usw. Energie kann umgesetzt, aber nicht vernichtet werden, und Energie kann nicht aus nichts entstehen — genau wie die Masse der alten Mechanik. *Neben dem Ge-*

setz von der Erhaltung der Masse steht das Gesetz von der Erhaltung der Energie.

Die *Relativitätstheorie* kennt nun kein Gesetz von der Erhaltung der Masse; derselbe Körper hat eine größere Masse, wenn er rasch bewegt wird, als wenn er ruht; auch das Gesetz von der Erhaltung der Energie geht nicht in dieser einfachen Gestalt in die Relativitätstheorie über. Aber es erscheint ein anderes, noch einfacheres, noch umfassenderes Gesetz: Wenn ein Körper Energie verliert, etwa durch Ausstrahlung, so verliert er auch gleichzeitig an Masse; jede Energie, gleichgültig welcher Gestalt, ist mit Masse behaftet, d. h. sie verhält sich mechanisch wie ein materieller Körper; es bedarf einer Kraft, um ihr Beschleunigung zu erteilen. Jede Masse kann als eine Energieanhäufung angesehen werden. Und was sich erhält, ist nur eine Größe, die man *als Masse oder als Energie* ansehen kann; einfacher ist das letztere. Am besten formulieren wir das Gesetz in folgender Weise: Jede Masse können wir als eine Energiekonzentration auffassen, und zwar ist die der Masse m entsprechende Energie $= mc^2$, wobei c wieder die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Diese Energie erhöht sich, wenn der Körper bewegt wird; ob wir sagen „die Masse wird größer“ oder ob wir sagen „die Energie mc^2 wird erhöht um einen Betrag, den wir kinetische Energie nennen“, ist ganz dasselbe. Bei Energieumsetzungen muß sich nur die *Summe aus der Massenenergie mc^2 und den übrigen Energiebeträgen*, die oben erwähnt wurden, erhalten, *nicht die Masse für sich und nicht die Summe dieser Energien für sich*. (Es ist nicht bei allen physikalischen Vorgängen eindeutig auseinander zu halten, was Energie der Masse und was kinetische oder elektrische Energie ist; nur die Gesamtsumme aller dieser Energien ist immer eindeutig.)

Zahlenwerte.

Diese Erkenntnis vereinfacht nicht nur unsere ganze Auffassung der physikalischen Welt; sie gibt uns auch Einblick in Erscheinungen, die vorher nur unvollständig zu verstehen waren und die auch praktisch von größter Bedeutung werden

können. Wir kennen ja Erscheinungen, bei denen Materie zerfällt und gleichzeitig ungeheure Energien auftreten: die radioaktiven Prozesse. Aus diesen hat man schon vor der Relativitätstheorie geschlossen, daß die Atome elektrische Ladungen in sich enthalten, die mit großen Energien aneinander oder an die Atome gebunden sind und bei deren Freiwerden diese Energien als Wärme in Erscheinung treten. Nun gibt die Relativitätstheorie die Möglichkeit, die Größe der vorhandenen Energien zu beurteilen.

Leider hat sich das Gesetz von dem Zusammenhang zwischen Energie und Masse noch nicht im Versuch nachweisen lassen; grundsätzlich müßte es ja möglich sein, die *Energie- und Massebilanz zerfallenden Radiums* aufzustellen; aber trotz der großen dabei auftretenden Energiebeträge ist eine solche Messung nie möglich gewesen wegen der geringen Massenbeträge. Es wird die Anschaulichkeit erhöhen, wenn hier einige Zahlen über die in der Materie aufgespeicherte Energie angegeben werden: Der allgemeine Zusammenhang „Energie gleich Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit“ ordnet einer Masse von 1 Gramm (*g*) irgendeines Stoffes einen Energiebetrag von $9 \cdot 10^{20} \frac{g \text{ cm}^2}{s^2}$ oder 25 Millionen Kilowattstunden zu. Zum Vergleich diene die Angabe, daß die tägliche Elektrizitätserzeugung von Berlin etwa 4 Millionen Kilowattstunden beträgt. Die in 1 Gramm konzentrierte Energie würde, als Wärme verwendet, genügen, um 215000 cbm Wasser von 0^0 auf 100^0 zu erwärmen oder 40000 cbm Wasser in Dampf zu verwandeln. Solch ungeheure Energien enthält 1 Gramm Materie; aber wir können einstweilen nicht die Hoffnung hegen, daß diese Energien gewinnbar und nutzbar gemacht werden könnten. Auch bei den radioaktiven Vorgängen werden diese Energien nicht frei, sondern nur sehr erheblich kleinere. Zwar zerfällt bei den radioaktiven Prozessen die Materie; das Atom wandelt sich um, aber es verwandelt sich nur zum kleinsten Teil in Energie von greifbarer Form (Wärme, Strahlung oder dgl.). Wir stellen uns heute das Atom oder, besser gesagt, den *Atomkern*, der beim radioaktiven Prozeß zerfällt, als zusammen-

gesetzt aus positiven und negativen elektrischen Ladungen vor; wir nennen die positiven Ladungen Protonen, die negativen Elektronen. Beide sind mit einer Masse, d. h. einer Energieanhäufung, verbunden, welche für das Proton rund 1800mal so groß ist wie für das Elektron. Im Radiumkern ist also Energie verschiedener Art vorhanden: der größte Teil ist die Masse der Protonen, viel kleiner, aber auch noch bedeutend ist die Masse der Elektronen, und noch viel kleiner — wohl erfaßbar unsern Energiemessungen, aber nicht erfaßbar unsern Massenmessungen — ist die Energie, mit welcher diese Ladungen in einer uns noch unbekanntem Weise im Radiumkern zusammengebunden sind. Nur der letztgenannte Teil tritt bei den Erscheinungen der Radioaktivität direkt als Energie (etwa als Wärme in einem um das Radiumpräparat gelegten Bleimantel) auf; außerdem bleiben als Energiekonzentrationen nach dem Zerfall zurück: die ausgeschleuderten Protonen (genannt α -Teilchen), die ausgeschleuderten Elektronen (β -Teilchen) und der Atomkernrest, ein Bleiatomkern, in welchem wieder Protonen und Elektronen irgendwie aneinander gebunden sind. Die beim geschilderten Zerfall von 1 Gramm Radium freiwerdende Energie ist zwar außerordentlich klein gegen die vorhin berechnete, welche der ganzen Masse eines Gramms Radium entspricht; sie ist aber immer noch sehr groß gegen die aus anderen bekannten Quellen entspringende Energie. Daß es in der Welt auch die Möglichkeit eines restlosen Umsatzes von Massenenergie in eine andere Energieform, nämlich in Strahlung gibt, dafür sprechen die Beobachtungen an der sog. „Höhenstrahlung“, die aus den Tiefen des Weltalls zu uns kommt und eine Durchschlagskraft zeigt, die bei keiner sonst bekannten Strahlung vorkommt. Überlegungen, die aus der Quantentheorie folgen, sowie auch astrophysikalische Gedanken führen einzelne Forscher zu der Annahme, daß diese Strahlung durch vollen Zerfall der Materie, auch der Protonen, bei Temperaturen von Billionen Grad im Innern der Fixsterne entsteht.

Das Masse-Energie-Gesetz der Relativitätstheorie kann uns als Führer dienen, wenn wir nach *Energiequellen* suchen, die

aus dem Zerfall der Materie herrühren und wenigstens noch im Bereich phantasievoller Hoffnung liegen können. Wenn wir nämlich unser Bild des Atomkernaufbaus aus Protonen und Elektronen aufrechterhalten — und die Entwicklung der modernen Atomforschung gibt uns dazu durchaus das Recht —, so müssen wir den *Wasserstoffkern* als ein Proton, den *Heliumkern* als bestehend aus vier Protonen und zwei Elektronen ansehen. Aber die Masse des Heliumkerns ist um 3,2% kleiner als die Masse von vier Protonen und zwei Elektronen. Gelingt es also, vier Wasserstoffkerne und zwei Elektronen zu einem Heliumkern zusammenzuzwingen, so würden 3,2% der Massenenergie frei und müßten bei diesem hypothetischen Prozeß in irgendeiner greifbaren Energieform auftreten. Dies ergäbe bei Fabrikation von 4 Gramm Helium aus ungefähr 4,03 Gramm Wasserstoff zwar nicht die phantastische Energiemenge, welche oben für den Zerfall von 1 Gramm Materie berechnet wurde, aber doch 3% davon, und das geht schon weit über alles bisher Bekannte, auch weit über die bei radioaktiven Prozessen auftretenden Energiewerte hinaus. Wir sehen ja noch nicht den Weg zu einer solchen Fabrikation; aber man kann auch nicht sagen, daß sie als eine glatte Unmöglichkeit angesehen werden muß.

Vielleicht werden die Menschen in 100 Jahren im Überfluß der so gewonnenen Energie mächtig und glücklich, vielleicht lächeln sie aber auch schon über unsere Atomvorstellungen. Unwahrscheinlich ist aber, daß sie über das Gesetz von der Masse der Energie lächeln werden.

Siebentes Kapitel.

Allgemeine Betrachtungen zur speziellen Relativitätstheorie.

Nachdem nun der wichtigste sachliche Inhalt der speziellen Relativitätstheorie — d. i. der Übertragung des alten Galileischen Relativitätsprinzips der Mechanik auf die Elektromagnetik — auseinandergesetzt ist, tauchen dem Leser wohl

manche grundsätzliche Fragen auf, mit denen wir uns hier noch auseinandersetzen müssen. Zwar ist hoffentlich aus obiger Darstellung hervorgegangen, daß der paradoxe Charakter der Folgerungen nur durch unbegründete Denkgewohnheiten entsteht; aber trotzdem wird es jedem Menschen schwerfallen, sich von seinen Denkgewohnheiten zu trennen, auch wenn sein Verstand ihre Unhaltbarkeit aufzeigt; denn er wünscht Übereinstimmung zwischen Naturgesetz und Menscheng Geist. Also werden wir uns zunächst fragen müssen, ob es wirklich keine andere Möglichkeit gibt, die Widerspruchslosigkeit zwischen den Versuchen einzusehen, als die zu solchen Paradoxen führende.

Emissionstheorie des Lichtes.

Die nächstliegende Idee ist die, auf die alte *Emissions-theorie* des Lichtes zurückzugreifen, die kein Geringerer als Newton dereinst geschaffen hat; danach bestände das Licht aus kleinsten Teilchen, die vom aussendenden Körper mit Lichtgeschwindigkeit fortgeschleudert werden. Wenn man auf diese Teilchen die Newtonsche Mechanik anwendete, so erhielte man verschiedene Geschwindigkeiten in verschiedenen Richtungen, wenn der aussendende Körper selbst bewegt wird, aber relativ zum aussendenden Körper gleiche Geschwindigkeit nach allen Richtungen. Die letztgenannte Aussage ergibt sofort *Übereinstimmung mit dem Michelsonschen Versuch*, und auch gegenüber dem Fizeauschen Versuch ergibt sich kein Widerspruch; denn dort bewegt sich ja nur das Medium, in welchem die Lichtausbreitung vor sich geht, nicht die Lichtquelle; wenn wir uns also nur vorstellen, daß Zusammenstöße zwischen den Teilchen der strömenden Flüssigkeit und den Lichtteilchen sehr selten sind, so kommt auch beim Fizeauschen Versuch ein befriedigendes Ergebnis heraus. *Aber die ganze Optik sinkt in sich zusammen*; alle Erscheinungen der Interferenz, der Beugung u. dgl. könnten wir ja nur auf dem Boden der Erkenntnis deuten, daß die Lichtausbreitung nur vom Ort und von dem Medium, in welchem sie vor sich geht, abhängt und daß irgendeine Verschiedenheit zwischen den einzelnen Teilen des Licht-

feldes an einem bestimmten Ort nicht besteht. Eine solche Emissionstheorie ist in der Tat von dem Physiker Ritz (1908) durchgeführt worden, hat aber keine Grundlage für die optischen Erscheinungen abgeben können. Zudem hat schon Arago die Geschwindigkeit des vom selben Stern herkommenden Lichtes von der Erde aus zweimal gemessen, einmal wenn die Erde auf den Stern zu, einmal wenn sie von dem Stern weg läuft, und beim Vergleich keinen Unterschied gefunden. Und de Sitter hat nachgerechnet, daß die Beobachtungen über Bewegung von *Doppelsternen* nicht verträglich sind mit der Annahme, daß die Geschwindigkeit des Lichtes für uns kleiner bei Fortbewegung wie bei Heranbewegung des aussendenden Sternes sei. Wir können also keine Hoffnung hegen, daß die Emissionstheorie des Lichtes in dem hier besprochenen Sinn neu belebt werden könne, obwohl ja in der Quantentheorie verwandte Anschauungen, aber mit anderem Sinn und in engem Zusammenhang mit der Relativitätstheorie auftauchen.

Warum gerade die Lichtausbreitung?

Am häufigsten begegnet man dem Einwand, *warum* man denn zur Regelung von Uhren *gerade das Licht* verwenden müsse. Man komme doch zu einer ganz einwandfreien und konsequenten Meßvorschrift, wenn man ein anderes Signal zur Synchronisierung verschiedener Uhren verwende, etwa den Schall oder, noch einfacher, gleichförmig bewegte Materieteilchen. Man könne ja in der Tat zwei Uhren dadurch aufeinander beziehen, daß man zwischen ihnen an Stelle des Lichtstrahls ein *Materieteilchen*, dessen Bewegungsgesetze aus der Mechanik bekannt seien, *hin und her gehen lasse*. Die Uhren gehen dann ganz entsprechend der oben verwendeten Vorschrift synchron, wenn die Zeigerstellung an der zweiten Uhr bei Ankunft des Teilchens gerade inmitten der beiden Zeigerstellungen der ersten Uhr bei Abgang und Rückkehr des Teilchens zur ersten Uhr liege. Diese Vorschrift habe den großen Vorteil, daß dann die nämlichen beiden Uhren auch noch synchron bleiben, wenn sie sich gemeinsam geradlinig und gleichförmig bewegen, also ihre Stellung wohl zum

Beobachter, aber nicht zueinander verändern. Denn nach dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten, das wir der Mechanik entnehmen, addiere sich dann einfach die gemeinsame Geschwindigkeit zu allen Geschwindigkeiten der Uhren und des Teilchens hinzu und falle somit ganz aus der Meßvorschrift heraus.

Dieser Einwand trifft in der Tat einen sehr wesentlichen Punkt der ganzen Gedankengänge; er zeigt, daß das System der Relativitätstheorie sich nicht durchführen läßt, ohne daß die alte Mechanik reformiert und das alte Additionstheorem der Geschwindigkeiten geopfert wird. Denn es dürfen nicht zwei in sich einwandfreie und logische Meßvorschriften für die Zeitmessung nebeneinander bestehen und einander widersprechen; sonst zerflattert der Zeitbegriff vollständig. Die Meßvorschrift, welche Materieteilchen an Stelle von Lichtsignalen verwendet, muß in der Relativitätstheorie zum gleichen Ergebnis führen wie die ursprüngliche; und dasselbe muß für Schallsignale und andere erdenkbare Signale der Fall sein. Aber natürlich müssen wir bei der Auswertung unsrer Meßvorschrift Bewegungsgesetze zugrunde legen, die keinen Widerspruch in sich enthalten; also entweder solche, die aus unabweisbaren unmittelbaren Erfahrungen, oder solche, die mittelbar, durch einwandfreie Schlüsse aus sicheren Erfahrungen folgen.

Wenn in der Relativitätstheorie das alte Additionstheorem der Geschwindigkeiten bestehen bliebe, d. h. wenn die Erfahrungen, die zur Relativitätstheorie geführt haben, mit diesem Theorem verträglich wären, dann könnten wir in der Tat zwei einander widersprechende Begriffe der Zeitmessung bilden. Oder wenn neben den Erfahrungen an der Lichtausbreitung noch unabweisbare Erfahrungen an bewegter Materie bestünden, welche bis zu beliebig großen Geschwindigkeiten die einfache Addition gleichgerichteter Geschwindigkeiten sicherstellten, dann müßte der Bau der Relativitätstheorie zusammenbrechen. Aber beides ist nicht der Fall. Die Relativitätstheorie führt von den Erfahrungen über Lichtausbreitung durch logische Schlüsse zu einem Additionstheorem der Geschwindigkeiten, das von dem der

alten Mechanik abweicht. Auf das Gedankenexperiment der vorigen Seite angewandt, zeigt dieses Theorem wieder, daß dieselben Uhren, die ruhend synchron waren, bei Bewegung nicht mehr synchron sein können, und zwar findet man genau dieselbe Abweichung wie vorher mit Lichtsignalen.

Andererseits gibt es aber auch keine Erfahrungen, welche das alte Theorem der Mechanik bei großen Geschwindigkeiten stützen; denn die mechanischen Versuche können nicht über Geschwindigkeiten hinausgelangen, die außerordentlich klein gegen die Lichtgeschwindigkeit sind und bei denen eine Entscheidung zwischen dem alten und dem neuen Theorem unmöglich ist. Also hat das *Gedankenexperiment der S. 70* nur bei ganz *kleinen Geschwindigkeiten Sinn*, und für solche kommt nichts Interessantes heraus, da dann ja die Relativitätstheorie nichts anderes aussagt als die alte Mechanik, bzw. die Elektrodynamik ruhender Körper.

Die Antwort auf die Frage: „Warum gerade das Licht?“ muß also lauten: „*Weil die Lichtausbreitung der einzige Vorgang ist, den wir auf Grund einwandfreier Versuche genügend genau kennen.* Jede andere Methode wäre gradeso gut und würde auch zum gleichen Ergebnis führen, wenn wir ihre Gesetze richtig kennen und anwenden würden.“

Spezielle Relativitätstheorie und Weltbild.

Mit der Relativitätstheorie haben wir uns also auf den grundsätzlichen Standpunkt gestellt, unsre elektromagnetischen Erfahrungen höher zu werten wie unsre mechanischen. Wir haben die mechanischen Gesetze so abgeändert, daß sie sich den elektromagnetischen angleichen und fügen. In den mechanischen Gesetzen tritt somit eine Größe auf, die der Elektrodynamik entstammt, nämlich die Lichtgeschwindigkeit. Damit ist die *Mechanik* im Rang *hinter die Elektrodynamik* gerückt und der im zweiten Kapitel geschilderte Kampf entschieden. Insofern bedeutet die *spezielle Relativitätstheorie die Krönung und Vollendung des elektrodynamischen Weltbildes.*

Aber andererseits löst dieses Weltbild sich hier schon in ein übergeordnetes auf. Wenn die Lichtgeschwindigkeit nicht

nur in elektrischen und optischen Erscheinungen ihre Rolle spielt, sondern auch in den mechanischen bestimmend ist, wenn sie die Grenzgeschwindigkeit darstellt, über die keine Körperbewegung und kein Signal hinaus kann, dann *kann* man dies als Beweis dafür auffassen, daß die ganzen physikalischen Vorgänge rein elektromagnetischer Natur seien, man *muß* das aber nicht tun. Man kann vielmehr in der Lichtgeschwindigkeit eine universelle Größe sehen, die tiefer im Naturgeschehen verankert liegt als die Gesetze der Mechanik *und* der Elektrodynamik, die also auch in beiden Bereichen ihre Rolle spielen muß. Hat man dereinst die experimentell gefundene Abhängigkeit der Elektronenmasse von der Geschwindigkeit (s. S. 28) als großen Triumph der Elektrodynamik angesehen und daraus geschlossen, daß die Materie (oder wenigstens die Elektronenmasse) rein elektromagnetischen Ursprungs sei, so sehen wir dagegen in der Relativitätstheorie, daß *jede Masse* in gleicher Weise von der Geschwindigkeit abhängen muß, ganz *gleichgültig, ob sie elektromagnetischen oder anderen Ursprungs* ist. Auch die Massenveränderlichkeit ist eine unmittelbare Folge der beiden Grundprinzipien der Relativitätstheorie, nämlich des Relativitätsprinzips (s. S. 30) und der aus den Versuchen von Fizeau und Michelson (s. S. 34 ff.) folgenden Gesetze der Lichtausbreitung, die man meist als das „*Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*“ bezeichnet. Diese Prinzipien sind keineswegs spezifisch elektrodynamisch, sondern ganz allgemein.

Man kann also vom Überwiegen des elektrodynamischen über das mechanische Weltbild insofern sprechen, als die alte Maxwellsche Elektrodynamik von Anfang an in voller Übereinstimmung mit den Prinzipien der Relativitätstheorie war, die Mechanik aber durch eine praktisch belanglose, theoretisch sehr tiefgreifende Änderung erst zur Übereinstimmung gebracht werden mußte. Aber andererseits wächst die Relativitätstheorie hier schon in ein neues übergeordnetes Weltbild hinein, das in der allgemeinen Relativitätstheorie einen ungeheuren Ausbau erfährt, und um dessen Vollendung Einstein heute noch mit restloser Hingabe ringt.

Die vierdimensionale Welt.

Diese Überordnung der Lichtgeschwindigkeit über ihren ursprünglichen elektromagnetisch-optischen Charakter fand ihren ersten Ausdruck in der seltsamen Idee von der *vierdimensionalen Welt mit einer Zeit- und drei Raumdimensionen*. Diese Idee ist eine der wenigen, die nicht von Einstein herrühren; sie wurde ausgesprochen und mathematisch verfolgt von dem Göttinger Mathematiker Minkowski (1907). Freilich haben früher schon Dichter und Philosophen einen solchen Gedanken ausgesprochen; am bekanntesten ist die schöne Erzählung von der „Zeitmaschine“ von H. G. Wells. Aber wissenschaftlich haben solche Gedanken erst Sinn, wenn sie sich mathematisch durchführen lassen. Um die Grundidee dieser Durchführung zu verstehen, dazu bedarf es keiner mathematischen Kenntnisse. Gehen wir vom Raum aus, so brauchen wir nur einen Maßstab zu wählen, um alle drei Dimensionen eindeutig messen zu können. Haben wir einmal festgesetzt, daß unsre Längeneinheit ein Meter sein soll (konventionell bestimmt durch die Länge des Platinstabs in Paris), so können wir dieses Metermaß der Höhe, der Breite und der Tiefe nach an alle im Raum befindlichen Gegenstände anlegen; wir können die verschiedenen Längen miteinander vergleichen und eine ganze Wissenschaft, die Geometrie, auf diese Vergleichung aufbauen.

Die *Zeit* messen wir ganz anders; wir bedienen uns einer ganz andern Konvention, um die Einheit festzusetzen; wir wählen nämlich als Einheit die Zeit einer Drehung der Erde um ihre Achse, einen Tag. Und die Frage: „Wieviel Meter sind gleich einem Tag?“ hat keinen Sinn. Nun aber in der Relativitätstheorie ist *eine* Größe vor allen andern erhöht, welche unmittelbar Längen und Zeiten vergleichen läßt, nämlich die *Lichtgeschwindigkeit*; denn damit meinen wir ja das Verhältnis einer vom Lichtstrahl zurückgelegten Strecke zu der dazu erforderlichen Zeit. „Geschwindigkeit“ heißt immer Verhältnis Länge zu Zeit, z. B. wird die Geschwindigkeit eines Zugs auf der Strecke Aachen — Köln dadurch berechnet, daß man die Entfernung Aachen — Köln (70 km) durch die

Fahrtzeit (1 Stunde) teilt; man spricht von einer Geschwindigkeit von 70 km in der Stunde oder 70 km/st. Indem wir nun die Lichtgeschwindigkeit als etwas Besonderes behandeln, können wir festsetzen: wir sehen als Zeiteinheit diejenige Zeitdauer an, in welcher der Lichtstrahl den Weg von 1 Meter zurücklegt, und nennen diese Zeitdauer „1 Meter“. Wir können nun ohne weiteres auch die Zeitdauern in Meter ausdrücken, und obige Frage bekommt einen Sinn. Diese natürliche Zeiteinheit ist nur ein 300 millionstel Sekunde, also unvorstellbar klein; aber dies ist ja gerade der Grund, warum diese Zusammenhänge sich so wenig bemerkbar machen und so lange dunkel geblieben sind.

Wissenschaftlich richtiger sagen wir vielleicht so: Wir wählen die *Lichtgeschwindigkeit*, weil sie die universellste aller uns bekannten Größen darstellt, als *Einheit jeder Geschwindigkeit*; haben wir dann noch eine *Längeneinheit* festgesetzt, etwa das Meter, so folgt die obige *Zeiteinheit* zwangsläufig. Natürlich können wir auch umgekehrt sagen: Aus einer willkürlich festgesetzten Zeiteinheit (etwa 1 Sekunde) folgt, wenn wir die Lichtgeschwindigkeit gleich Eins setzen, eine bestimmte Raumeinheit (nämlich eine Länge von 300 000 km). Die gleiche Einheit erscheint uns als *Zeitstrecke* klein, als *Raumstrecke* groß. Dies liegt an der Konstitution unsres Geistes.

Nehmen wir einmal — jenseits aller philosophischen Erwägungen — an, Raum und Zeit seien reale Wirklichkeiten, nicht apriorische Formen unserer Vernunft, so gibt es eine vierdimensionale Welt, in welcher wir in der einen Dimension, die wir „Zeit“ nennen, Abmessungen wegen ihrer Kleinheit nicht erkennen, die uns in den andern Dimensionen schon groß erscheinen. Das Verhältnis der andern Dimension zu jener einen ist eine allen andern Naturgrößen übergeordnete Größe, die in allen Naturgesetzen auftreten muß, soweit sie mit räumlicher oder zeitlicher Messung zusammenhängen. Wir nennen diese Größe nach der Erscheinung, in der wir sie am deutlichsten erkennen, die „Lichtgeschwindigkeit“.

Nun wären diese Gedanken ein Spiel, wenn sie nicht mathematisch eine große Vereinfachung in unsere Naturgesetze

hineinbrächten; so aber gilt der Satz, daß die *grundlegenden Naturgesetze eine einfachere Gestalt bekommen, wenn wir sie in dieser vierdimensionalen „Welt“ beschreiben*. Und darum hat diese Vorstellung eine große Bedeutung für die Weiterentwicklung der Physik, obwohl sie von einem ganz formalen Grundgedanken ausgeht.

Zur Verdeutlichung kann vielleicht auch dem unmathematischen Leser folgende Aussage der Relativitätstheorie dienen: Wir betrachten zwei Ereignisse, die sich an zwei verschiedenen Punkten zu zwei verschiedenen Zeiten abspielen, z. B. das Ereignis „Zugabfahrt in Aachen um 8 Uhr“ und das Ereignis „Zugankunft in Köln um 9 Uhr“, wobei die Zeitangaben natürlich von den Bahnhofsuhren, die relativ zur Erde ruhen, genommen sind. Werden diese Ereignisse von allen möglichen Beobachtern wahrgenommen, die sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten relativ zur Erde bewegen, so wird nach der Relativitätstheorie *jeder eine andere Raumdistanz Aachen — Köln und jeder eine andere Fahrzeit des Zugs messen. Aber die Entfernung der beiden Ereignisse in der vierdimensionalen Welt, die sich aus räumlicher und zeitlicher Entfernung ähnlich ergibt, wie die Länge der Hypotenuse aus den Kathetenlängen nach dem Pythagoräischen Lehrsatz, ist für alle diese Beobachter dieselbe*.

III. Die allgemeine Relativitätstheorie.

Achtes Kapitel.

Das Problem der allgemeinen Relativität.

Die in den letzten Abschnitten behandelten Gedankengänge bilden den Inhalt der sogenannten „speziellen Relativitätstheorie“; diese gibt Antwort auf die Frage, wie der Fizeausche und der Michelsonsche Versuch vereinbar sind, oder anders ausgedrückt, wie das Relativitätsprinzip der Mechanik in Übereinstimmung gebracht werden kann mit der Ausbreitung des Lichtes im leeren Raum, wieso ein Bewegungs-

zustand eines Körpers relativ zum leeren Raum keinen Sinn hat, sondern nur der Bewegungszustand eines Körpers gegen einen andern Körper, obwohl doch der leere Raum Träger der elektromagnetischen Erscheinungen, insbesondere der Lichtausbreitung ist. Die spezielle Relativitätstheorie ist aus einer *Notlage* entstanden; die scheinbaren Widersprüche in den Erfahrungen und Versuchen *zwingen* zu einer neuen Begriffsbildung, ohne welche an dieser Stelle ein unüberwindbares Hindernis in unsrer Naturerkenntnis, d. i. in der eindeutigen Beschreibung der Naturerscheinungen, entstehen müßte.

Mit dem Grundgedanken von der Relativität der Zeit- und Raummessung und seinen Konsequenzen ist diese *Notlage* der Physik behoben und ein System von wunderbarer Einfachheit und umfassender Anwendungsmöglichkeit entstanden, das zunächst einen Weiterbau nicht unbedingt erforderte. Wohl klafften noch große Lücken im ganzen Gebäude der physikalischen Erkenntnis; doch war nicht ohne weiteres zu erwarten, daß sie auf dem hier beschrittenen Wege ausgefüllt werden könnten.

Aber Einstein selbst war noch unbefriedigt, und so finden wir ihn schon 1907, d. i. zwei Jahre nach Schaffung der speziellen Relativitätstheorie, bei dem Versuch, den Gedanken gang zu erweitern. Der Antrieb ging hierbei zunächst wohl nicht von einer experimentellen *Notlage* aus, sondern von erkenntnistheoretischen Erwägungen. Um diese zu verstehen, müssen wir einige Begriffe, die wir bisher schon verwendet haben, schärfer ins Auge fassen:

Naturgesetze in der speziellen Relativitätstheorie.

Wir können den Inhalt der speziellen Relativitätstheorie in den einen Satz zusammenfassen: *Die Naturgesetze sind für alle Beobachter, die sich gegeneinander in geradlinig-gleichförmiger Bewegung befinden, dieselben*; einen absoluten Bewegungszustand, d. h. eine geradlinig-gleichförmige Bewegung gegen den leeren Raum, gibt es nicht. Um nicht zu abstrakt zu bleiben, wollen wir ganz bestimmte Naturgesetze als Beispiele hervorheben:

1. „Das *Licht* breitet sich von der Aussendungsstelle im leeren Raum nach allen Richtungen gleich schnell aus, unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle.“ Daß dieses Gesetz wirklich dasselbe ist für zwei Beobachter, die sich relativ zueinander geradlinig-gleichförmig bewegen, bildet ja den Ausgangspunkt der Relativitätstheorie.
2. „Um eine ruhende elektrische Ladung existiert im leeren Raum ein *elektrisches Feld* (das man durch geladene Probekörper ausmessen kann), bei Bewegung von elektrischen Ladungen entsteht ein *magnetisches Feld*. Die Größe der Feldstärken folgt aus den Maxwell'schen Gleichungen.“ Auch dieses Naturgesetz gilt für die beiden relativ zueinander bewegten Beobachter *nur* nach der Relativitätstheorie; die Schwierigkeit, die hier von der Relativitätstheorie erst behoben wird, liegt darin, daß dieselbe Ladung für den einen Beobachter bewegt ist, also ein magnetisches Feld erzeugt, für den andern nicht.
3. „Ein sich selbst überlassener materieller Körper bewegt sich geradlinig und gleichförmig oder ruht. Eine äußere Kraft erteilt ihm eine Beschleunigung, die der Kraft proportional ist, und zwar um so kleiner, je größer die sogenannte Masse, der Inhalt des Körpers an Materie, ist. Die Beziehung lautet: *Kraft gleich Masse mal Beschleunigung*.“ In diesem Gesetze kommt die Geschwindigkeit nicht vor, nur die Geschwindigkeitsänderung; es gilt also selbstverständlich für beide Beobachter.
4. „Jeder materielle Körper zieht jeden andern an, und zwar umgekehrt proportional dem Quadrat der gegenseitigen Entfernung.“ Dieses *Newtonsche Gravitationsgesetz* lautet natürlich auch für die beiden Beobachter gleich.

Nun gibt es viele Naturgesetze, viele Beziehungen, in welchen die physikalischen Erfahrungen zusammengefaßt sind; wir können sie *entweder als exakte Gesetze oder als provisorische Näherungsgesetze* ansehen; weitere Erfahrungen oder theoretische Überlegungen müssen das entscheiden.

Diese Naturgesetze können zunächst mit dem speziellen Relativitätsprinzip in Übereinstimmung sein, d. h. für die zwei Beobachter gleich lauten, oder nicht. Im letzteren Fall gibt es zwei Möglichkeiten: entweder das Prinzip ist falsch oder das „Naturgesetz“ ist noch kein wirkliches Naturgesetz, sondern nur ein Näherungsgesetz. Wir fanden einen derartigen Konflikt z. B. oben bei dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten, wie es aus den mechanischen Erfahrungen folgte; dieses widersprach der Form des Relativitätsprinzips, so wie sie im Hinblick auf das hier an erster Stelle genannte, unabweisbar richtige Naturgesetz von der Ausbreitung des Lichtes angenommen werden mußte. Wir entschieden uns damals für das Relativitätsprinzip und setzten an Stelle des nur als Näherung anerkannten alten Additionstheorems ein neues mit dem Prinzip verträgliches.

Übertragung auf allgemeine Bewegungen.

Wir sehen nun in dem Relativitätsprinzip eines der höchsten und allgemeinsten Naturgesetze; wir kennen nur Bewegungen von Materie gegen Materie, nur Wirkung von Materie auf Materie, keine Wirkung vom leeren Raum her, keine Bewegung gegen den leeren Raum.

Aber dieses Prinzip ist bisher nur in einer recht eingeschränkten Form verwendet worden; wir haben nur von *geradlinigen* und *gleichförmigen Bewegungen* gesprochen und alle andern von unsern Betrachtungen ausgeschlossen. So erhebt sich nun die tief sinnige Frage: *Gilt das Relativitätsprinzip nur für geradlinig-gleichförmige Bewegungen oder gilt es ganz allgemein?* Sind die Naturgesetze nur für die beiden bisher betrachteten Beobachter dieselben oder auch für Beobachter, die sich mit veränderlicher Geschwindigkeit oder in veränderlicher Richtung, etwa im Kreise, bewegen? Oder gibt es doch *beschleunigte Bewegungen relativ zum leeren Raum* und Wirkungen des leeren Raumes auf ungleichmäßig bewegte, z. B. sich drehende Körper?

Stellen wir zunächst die Grundfrage ganz allgemein: Können wir die Bewegung eines Körpers gegen den leeren Raum feststellen, wenn diese Bewegung nicht gerade gleich-

förmig und geradlinig ist? *Hat der Begriff einer beschleunigten Bewegung eines Körpers gegen den leeren Raum einen Sinn?* Oder muß auch dieser Begriff bei richtiger, allgemein gültiger Formulierung der Naturgesetze wegfallen?

Wir haben ja gesehen, daß es keinen Sinn hat, von einem Bewegungszustand des leeren Raumes oder gegenüber dem leeren Raum zu reden, wenn unser empfindender Körper oder der Körper, mit dem er verbunden ist (etwa die Erde), keine Beschleunigungen erfährt. Wie verhält es sich nun mit beschleunigten Bewegungen? Wollen wir zunächst noch nicht die Erfahrung befragen, sondern rein erkenntnistheoretisch vorgehen. Was werden wir erwarten? Wir wissen, daß der leere Raum kein Körper im Sinne der Mechanik ist, wir wissen, daß er zwar elektromagnetisch-optische Eigenschaften hat, daß diese aber keine Feststellung einer Bewegung relativ zum leeren Raum erlauben, solange wir nur gleichförmig-geradlinige Bewegungen in Betracht ziehen. Wir werden also zunächst zweifellos erwarten, daß der leere Raum als solcher keine Wirkungen auf Körper ausüben kann, daß es nur Wirkung von Materie auf Materie gibt, und daß auch bei beschleunigten Bewegungen nur von Bewegungen von Körpern gegenüber Körpern, nicht von Bewegungen gegen den leeren Raum die Rede sein kann. *Wir erwarten, daß alle Naturgesetze nur die gegenseitige Wirkung von Körpern aussprechen und daß der leere Raum nicht darin vorkommt.*

Dies können wir vielleicht noch klarer in folgender Weise aussprechen: Wie wir oben sahen, ist es ganz gleichgültig, welcher von zwei relativ zueinander bewegten Beobachtern als ruhend, welcher als bewegt angesehen wird; jeder kann mit gleichem Recht von sich sagen: „Ich ruhe, die übrigen Körper in der Welt bewegen sich relativ zu mir.“ Wenn nun aber zwei Beobachter in zwei Laboratorien sitzen, die sich nicht geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegen, wie ist es dann? Kann man dann auch nicht sagen, welches ruht und welches sich bewegt? Wir haben oben erkannt, daß man nicht wirklich unterscheiden kann, ob sich der Zug gegen die Landschaft bewegt oder ob umgekehrt die Landschaft dem Zug entgegenkommt, solange die Bewegung gleichförmig

und geradlinig ist. Gilt das auch noch beim Anfahren oder Halten eines Zuges? Oder wenn ein Stein zur Erde fällt und dabei bekanntlich immer größere und größere Geschwindigkeit annimmt, können wir dann auch nicht unterscheiden, ob der Stein auf die Erde oder ob die Erde samt dem übrigen Weltall auf den Stein beschleunigt zuläuft?

Noch deutlicher wird die Frage wohl, wenn die Beschleunigung nicht in einer Änderung der Geschwindigkeit, sondern in einer Richtungsänderung besteht, wenn wir also einen mit gleichförmiger Geschwindigkeit *auf einem Kreis bewegten* Körper betrachten, etwa uns selbst auf der rotierenden Erde. Können wir entscheiden, ob der Fixsternhimmel still liegt und die Erde sich dreht oder ob die Erde ruht und der Fixsternhimmel sich dreht? Oder hat es nur einen Sinn, zu sagen: Die Erde und der Fixsternhimmel rotieren relativ zueinander? Zwischen der Erde und dem Fixsternhimmel ist nur leerer Raum. Hat es einen Sinn, zu sagen, die Erde rotiert gegen den leeren Raum? Wenn nicht, so bleibt nur die Formulierung der relativen Rotation und der Unmöglichkeit, zwischen den zwei praktisch möglichen Formulierungen, die Erde drehe sich oder der Fixsternhimmel drehe sich, zu entscheiden.

Erster Einwand.

Hier werden nun die meisten Leser wohl Einspruch erheben und erklären, daß diese Frage entschieden sei; es sei ganz klar, daß die Erde sich drehe, und es sei absurd, zu denken, daß der ganze über 100 Millionen Lichtjahre ausgedehnte Fixsternhimmel sich drehe und die lumpige kleine Erde ruhe. Früher habe man freilich das Gegenteil angenommen; aber man habe eben keine Ahnung von der *Größe und von der Natur des Fixsternhimmels* gehabt und sei durch die Erfahrungen der astronomischen Forschung zu der Erkenntnis, daß die Erde rotiere, gezwungen worden. Darauf ist zu erwidern, daß es unbestritten *praktischer* ist, die Vorgänge so zu beschreiben, daß man von einer Rotation der Erde spricht, daß aber damit nur eine Rotation *relativ* zum Fixsternhimmel gemeint sein kann und daß hier gar keine

Entscheidung möglich ist? Warum soll nicht das ganze Weltall eine Drehbewegung vollführen, deren Achse gerade mit der Erdachse zusammenfällt? Gewiß ist dies eine Annahme, die sich nicht mit der Erkenntnis von der Belanglosigkeit der Erde im Weltall verträgt; aber wir haben physikalisch keine Möglichkeit, sie auszuschließen.

Neuntes Kapitel.

Mechanik und allgemeines Relativitätsprinzip.

Widerspruch von der Mechanik her.

Unserer Forderung, daß es keine Wirkungen zwischen Materie und leerem Raum geben soll, stellt sich von vornherein eine sehr große Schwierigkeit entgegen: *Die ganze Summe der Erfahrungen, welche zum Aufbau der Mechanik geführt haben, widerspricht dieser Forderung.* In der Mechanik nimmt die gleichförmig-geradlinige Bewegung eine Sonderstellung ein; sie allein tritt bei vollem Ausgleich der auf einen Körper wirkenden Kräfte ein. Jede andere Bewegung ist mit einer *Kraft* verbunden.

Wir wollen hier noch ein wenig bei den mechanischen Grundbegriffen verweilen, da ohne Klarheit über diese kein richtiges Verständnis des Einsteinschen Grundgedankens möglich ist. Schon die Aussage, daß ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, in seinem Zustand der Ruhe oder *gleichförmig-geradlinigen* Bewegung bleibt, enthält eine starke Abstraktion; denn eine solche Aussage kann ja nicht leicht aus der Erfahrung folgen. Was heißt: „Es wirkt keine Kraft“; ist das dasselbe wie etwa: „Der Körper wird sich selbst überlassen“? Dies macht nichts deutlicher, denn wir wissen ja, daß ein sich selbst überlassener Körper, z. B. ein aufgehobener und dann losgelassener Stein, keineswegs in Ruhe oder gleichförmiger Bewegung bleibt, sondern mit ständig anwachsender Geschwindigkeit nach unten fällt, daß selbst die Erde im Weltall zwar näherungsweise, während kurzer Zeit betrachtet, sich geradlinig bewegt, aber wenn wir die Beob-

achtungen über ein Jahr oder längere Zeit erstrecken, weder geradlinig noch mit gleichförmiger Geschwindigkeit den Raum durchfliegt. Wir sagen: „*In beiden Fällen wirken Kräfte, nämlich Gravitationskräfte.*“

Andererseits beobachten wir geradlinig-gleichförmige Bewegungen, etwa an einem Schiff oder Flugzeug; aber wir wissen doch, daß auf diese Fahrzeuge eine Kraft wirkt, sie müssen ja durch die Schraube vorwärtsgetrieben werden; also Kraftwirkung und doch geradlinig-gleichförmige Bewegung! Wir sagen: „*In diesen Fällen wird die Antriebskraft von der Widerstandskraft des Wassers bzw. der Luft aufgehoben.*“ Vielleicht kommt dem Idealbild einer kräftefreien, gleichförmigen, geradlinigen Bewegung am nächsten der Freiballon, der vom Winde relativ zur Erde mitgenommen wird.

Diese Überlegungen sollen hier nur zeigen, daß die Begriffe der Mechanik, solange sie nicht sehr scharf gefaßt sind, von der Kritik leicht angegriffen werden können; in der Tat haben die größten Geister sich einer scharfsinnigen Kritik und den Versuchen eines einwandfreien Aufbaus der Mechanik hingegeben. Wir brauchen aber nicht auf alle diese Dinge einzugehen, wenn wir nur irgendeinen einwandfreien Weg gehen, der die Newtonsche Auffassung von den mechanischen Vorgängen zeigt.

Mechanische Versuche.

Wir betrachten einen ganz einfachen Vorgang: Wir greifen einen materiellen Körper, sagen wir eine Kugel, mit der Hand an und suchen sie an uns heranzuziehen. Dabei haben wir ein ganz bestimmtes Gefühl in unsern Muskeln, und dieses beschreiben wir durch den Ausdruck: „*Wir üben eine Kraft auf die Kugel aus*“; sooft wir dasselbe Gefühl haben, sagen wir, daß diese Kraft dieselbe sei. Da unser Gefühl nicht zuverlässig genug ist, fassen wir die Kugel nicht direkt mit der Hand an, sondern schalten eine Federwaage dazwischen; wir wissen ja, daß diese Feder um so länger wird, je intensiver das Anstrengungsgefühl in unserm Arm empfunden wird; und wir beschreiben jetzt den Vorgang durch die Aussage:

„Wir üben immer dann dieselbe Kraft auf die Kugel aus, wenn die Feder dieselbe Länge hat.“

Beim *ersten* Versuch werde nun die Kugel durch eine *Stütze* oder durch eine andere angreifende Hand festgehalten; sie bewegt sich nicht. Wir sagen: „Die Kraft wird durch eine andere Kraft aufgehoben, die wir *Stützkraft* (*Auflagerkraft*, *Haltekraft*) nennen.“ Daß diese Auffassung ver-



Abb. 14. Erster Versuch über die Wirkung einer Kraft.

nünftig ist, folgt daraus, daß wir der andern Hand eine ebensolche Federwaage geben können wie der unsern; die *Empfindung* in dem andern Arm und die *Länge* der andern Feder sind dieselben wie bei uns. Wir sagen: „Hier sind *zwei*

gleiche, einander entgegengesetzt gerichtete Kräfte, die sich aufheben.“

Bei einem *zweiten* Versuch ziehen wir bei derselben Federlänge die Kugel durch Wasser oder, noch besser, durch eine stark reibende Flüssigkeit, wie Glycerin oder Öl. Sehr schnell wird die Kugel eine *Geschwindigkeit* erhalten, die sie *unverändert* beibehält; wir beobachten also, daß die von unserm Arm ausgeübte Kraft den Körper in geradlinig-gleichförmiger Bewegung erhält. Wir sehen aber auch, daß unsre

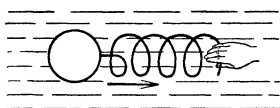


Abb. 15. Zweiter Versuch über die Wirkung einer Kraft.

Muskelkraft nicht die einzige Wirkung ist, welche von anderer Materie her auf die Kugel ausgeübt wird; denn die Flüssigkeit kommt in Bewegung, wir nehmen *Wirbel*, *Wellen* usw. wahr und sagen: „Von der Flüssigkeit her wirkt eine

Kraft auf die Kugel, die *geradeso* groß ist, aber *entgegengesetzt* gerichtet wie unsre Muskelkraft; diese beiden Kräfte heben sich auf, und infolgedessen bleibt die einmal erzeugte geradlinige, gleichförmige Geschwindigkeit *unverändert*.“ Die ersten Augenblicke dieses Versuches lassen sich natürlich so nicht erfassen; wir lassen sie einstweilen beiseite.

Nun stellen wir einen *dritten* Versuch so an, daß *alle andern* Wirkungen außer der von unserm Arm ausgehenden *ausgeschaltet* sind; wir greifen die Kugel bei derselben Feder-

länge an und entfernen alle andere Materie, d. h. wir stellen das Experiment im leeren Raum an (praktisch ist dies in Luft näherungsweise verwirklicht). Jetzt ergibt sich, daß die Geschwindigkeit der Kugel immer größer und größer wird, und die Nachmessung der in den verschiedenen aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten zurückgelegten Wege zeigt, daß die Geschwindigkeit proportional der Zeit seit Bewegungsbeginn wächst, d. h. nach vier Sekunden doppelt so groß ist wie nach zwei Sekunden, nach sechs Sekunden dreimal so groß wie nach zwei Sekunden usw. Die Änderung der Geschwindigkeit in einer Sekunde bleibt immer gleich, wir nennen diese Änderung „*Beschleunigung*“ und sprechen das Ergebnis dieses Versuches so aus: „*Eine Kraft ruft eine Beschleunigung hervor, welche um so größer ist, je größer die Kraft ist, und dieselbe Richtung hat wie die Kraft.*“



Abb. 16. Dritter Versuch über die Wirkung einer Kraft.

Eine weitere Durchführung solcher Experimente, etwa in der Weise, daß man dieselbe Kraft auf zwei solche ganz gleich geartete Kugeln, dann auf drei, vier usw. wirken läßt, zeigt eine um so kleinere Beschleunigung, je mehr Kugeln man an die (immer gleich gespannte, also immer gleich lange) Feder bindet. Man bezeichnet diese Eigenschaft der Materie als *Masse* und faßt diese Erfahrungen zusammen in dem oben schon erwähnten Newtonschen Gesetz: „*Kraft gleich Masse mal Beschleunigung*“. Dieselbe Kraft beschleunigt die doppelte Masse nur halb soviel wie die einfache usw. So erhalten wir das oben als drittes Beispiel erwähnte Naturgesetz.

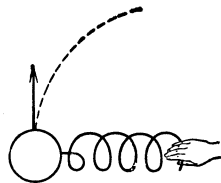


Abb. 17. Vierter Versuch über die Wirkung einer Kraft.

Nun stellen wir einen *vierten* Versuch an, wieder unter Ausschaltung aller materiellen Wirkungen; wieder greifen wir die Kugel mit derselben Kraft an; aber diesmal habe die Kugel schon eine gleichförmige Bewegung, und unsre Kraft wirke immer *senkrecht zur Bewegungsrichtung*. Die Folge wird eine *Krümmung*

der Bewegungsrichtung sein, und es wird sich, wenn wir wieder von den ersten Augenblicken absehen, eine Kreisbahn ergeben; die Geschwindigkeit bleibt dabei immer dieselbe, die Beschleunigung wirkt senkrecht zur Bahn, also in radialer Richtung; die Kraft ruft die Abweichung von der *Geradlinigkeit* hervor. Wir fühlen: „Wir müssen eine Kraft ausüben, um einen Körper auf einer Kreisbahn zu halten.“ Wenn wir keine Kraft mehr ausüben, also die Feder loslassen, verläßt der Körper sofort die Kreisbahn und fliegt geradlinig fort.

Schließlich noch einen viel einfacheren *fünften* Versuch: wir halten die Kugel an der Feder *nach unten*. Wir fühlen wieder die Kraftwirkung der Muskeln, die Feder hat wieder ihre Länge; aber nichts bewegt sich, alles ist wie beim ersten Versuch. aber wir sehen nichts von einer uns entgegenwirkenden Stützkraft. Wir müssen also annehmen, daß von der Erde eine Kraft ausgeht, die den Körper auf sich zu zieht und die unsrer Muskelkraft das Gleichgewicht hält, wie beim ersten Versuch die Stützkraft. Wir sagen: „Die Erde zieht alle Körper an“, und nennen diese anziehende Kraft „*Schwerkraft*“ oder „*Gravitation*“.

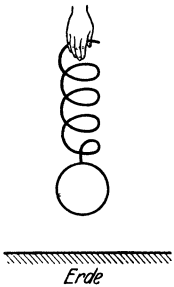


Abb. 18. Fünfter Versuch über die Wirkung einer Kraft.

Das Ergebnis aller Versuche ist *dasselbe*, wenn sie auf einem mit *gleichförmiger Geschwindigkeit geradlinig* bewegten Fahrzeug angestellt werden; das wissen wir schon; die gleichförmig-geradlinige Bewegung geht ja hier in die Beziehungen gar nicht ein. Wir haben bei all diesen Versuchen ja auch nichts von der Bewegung der Erde, auf der wir experimentieren, gegen den Weltraum wahrgenommen.

Trägheitskraft.

Wir können die Ergebnisse aller unsrer Versuche nun noch übersichtlicher zusammenfassen durch eine Begriffsbildung, welche den Kraftbegriff noch etwas erweitert. Wir deuteten den ersten, zweiten und fünften Versuch als Gleichgewichte von gleichen und entgegengesetzt gerichteten Kräf-

ten; dieser Formulierung können wir nun auch die beiden andern Versuche unterordnen, wenn wir sagen: „*Jeder materielle Körper widersteht einer Beschleunigung*, sie sei eine Geschwindigkeits- oder eine Richtungsänderung mit einer um so größeren Kraft, je größer seine Masse und je größer die ihm erteilte Beschleunigung ist. Jeder materielle Körper will seine geradlinig-gleichförmige Bewegung festhalten, und wirkt eine Kraft auf ihn, so wirkt von ihm eine Kraft zurück, die gleich seiner Masse mal seiner Beschleunigung, aber dieser entgegengerichtet ist; diese Kraft nennen wir die *Trägheitskraft* und sagen: „*Die äußere Kraft* (des Armes) wird *aufgehoben* durch die ihr gleiche, aber entgegengerichtete *Trägheitskraft*“ (d'Alambert 1743).

Diese Begriffsbildung kommt unserm Gefühl, aus dem wir den Kraftbegriff gewonnen haben, durchaus entgegen; denn wir fühlen beim dritten Versuch dasselbe wie beim ersten, wenn wir an der Feder ziehen; daher ist es für uns dasselbe, ob ein anderer Mensch entgegenzieht oder ob wir den auf der andern Seite befindlichen Körper in Bewegung setzen, beschleunigen. Und im Falle des vierten Versuches ist dieser Begriff ja auch ins allgemeine Bewußtsein übergegangen; niemand sagt: „Ich muß an der Feder ziehen, um der Kugel die Beschleunigung zu erteilen, die sie zum Durchlaufen der Kreisbahn nötig hat“, sondern jeder sagt: „Ich muß an der Feder ziehen, um der *Fliehkraft*, die den Körper nach außen zu treiben sucht, das Gleichgewicht zu halten.“ Die „*Fliehkraft*“ ist nichts anderes als ein spezieller Fall einer *Trägheitskraft*. Der Körper *will* gewissermaßen geradlinig fliegen; er widersetzt sich der Kraft, welche ihn zur Kreisbahn zwingt; er will aus dem Kreis fliehen; wir sagen: er übt eine Kraft nach außen aus, die wir „*Fliehkraft*“ oder „*Zentrifugalkraft*“ nennen.

Mechanik gegen Relativitätsprinzip.

Und nun kehren wir zu unserer Frage zurück, ob die Naturgesetze für jeden in beliebigem Bewegungszustand begriffenen Beobachter dieselben sind oder nicht. Wir setzen zu diesem Zweck in Gedanken unseren eignen empfindenden

Körper an die Stelle der Kugel und fragen dann: „Können wir unterscheiden, ob wir durch den Arm mit der Feder (der dann natürlich einem andern gehören muß) beschleunigt werden oder die übrige Welt in der entgegengesetzten Richtung beschleunigt wird, während wir ruhen?“ Die Antwort kann nicht zweifelhaft sein; denn wir fühlen ja im Fall der Versuche drei und vier die angreifende Kraft; *wir fühlen, daß unser Körper träge ist, sich gegen eine Bewegung wehrt.* Wir können unmöglich behaupten, daß die übrige Welt im Fall des vierten Versuches sich gegen uns dreht; denn wir *fühlen ja die Fliehkraft.*

Eine Unmenge von Erfahrungen steht uns zur Verfügung, um diese Behauptung zu bekräftigen. Wir fühlen nichts im Freiballon und auch nichts als die unregelmäßigen Stöße im geradlinig-gleichförmig fahrenden Schiff oder Eisenbahnzug; aber wir fühlen sehr wohl den Beginn oder das Ende der Bewegung. Wenn der Zug anfährt, will unser Körper zunächst infolge seiner Trägheit nicht mit; er erfährt durch die Bank, auf der wir sitzen, eine Druckkraft, welche der Trägheitskraft das Gleichgewicht hält; wir fühlen diese Kraft, wir bemerken also einen Unterschied gegen die Vorgänge, wenn wir ruhen und die anderen Körper beschleunigt werden; also sind die Naturgesetze nicht dieselben.

Die Forscher der älteren Zeiten haben nichts von einer Erddrehung gemerkt, während wir die Erde als rotierend ansehen. Spricht das nicht wenigstens dafür, daß die Naturgesetze dieselben sind für einen ruhenden und einen sich drehenden bzw. auf einer Kreisbahn bewegten Körper, wie z. B. einen auf der Erdoberfläche lebenden Menschen? Wäre uns durch Wolken die Sternenwelt verdeckt, könnten wir dann *unterscheiden, ob die Erde sich dreht oder ruht?* Die Antwort muß „ja“ lauten; die Beobachtung des Drehungseffektes erfordert nur feinere Apparate, als sie den Forschern des Altertums oder des Mittelalters zur Verfügung standen. Aber jeder auf der Erdoberfläche befindliche Körper muß eine Fliehkraft erfahren, welche ihn von der Erdachse zu entfernen sucht; wir bemerken diese Kraft gewöhnlich nicht, weil sie sehr klein ist im Verhältnis zu der Schwerkraft,

welche z. B. am Äquator der Fliehkraft gerade entgegenwirkt und ungefähr 300mal so groß ist. Aber schon Newton konnte diesen Effekt mit Instrumenten feststellen und somit seine Ansicht, daß Drehung etwas Absolutes, nicht wie gleichförmig-geradlinige Bewegung etwas Relatives sei, experimentell stützen.

Denken wir uns, um eine recht einfache Anschauung zu gewinnen, eine Zirkusbude, welche das sog. *Teufelsrad* und die sog. *Hexenschaukel* vereinigt, eine Drehscheibe, auf der die genußsüchtigen Besucher sitzen, und ringsherum Wände, die gedreht werden können; denken wir uns diese Wände einmal recht dick und materiehaltig. Nun werde *einmal* die Drehscheibe in Rotation versetzt, während die Wände ruhen; *dann* werde die Drehscheibe ruhig gehalten, aber die Wände gedreht. Beide Male sieht der Beschauer dasselbe; solange er nur optisch wahrnimmt, findet er keinen Unterschied zwischen den beiden Fällen, beide Male nur eine relative Drehung zwischen Wänden und Scheibe. Aber *mechanisch* treten *ganz verschiedene Erscheinungen* ein; im ersten Fall werden die auf der Drehscheibe befindlichen Körper nach außen geschleudert, erfahren Fliehkräfte; im zweiten Fall bleiben sie ruhig liegen, und die Drehung der Wände kümmert sie gar nicht.

Somit kommen wir aus den einfachsten Versuchen her zu dem klaren Ergebnis, daß hier ein *Relativitätsprinzip nicht mehr gilt*, daß Drehung und beschleunigte Bewegung absolute Begriffe sind, daß die Naturgesetze nicht gleich lauten für beschleunigte und unbeschleunigte Bewegung. Also müssen wir wohl schließen, daß Beschleunigung schlechthin, *Beschleunigung gegenüber dem leeren Raum und Drehung relativ zu einem leeren Raum Sinn haben* und in den Naturgesetzen eine Rolle spielen, nicht nur Beschleunigung bzw. Drehung von Materie gegen Materie.

„Und dennoch!“

sagte Einstein; und er war in diesem Falle nicht einmal der erste, der dies sagte; ein Menschenalter vor Einstein hatte schon Mach „und dennoch!“ gesagt.

Kann man sich denn vorstellen, daß der leere Raum mechanische Wirkungen hat? Nehmen wir an, es existiere nichts in der Welt als eine materielle Kugel; soll es da einen Sinn haben, zu sagen, die Kugel rotiere? Die Newtonsche Mechanik sagt wirklich, daß dies einen Sinn habe und daß es leicht feststellbar sei, ob die Kugel rotiere oder nicht; denn eine rotierende Kugel aus elastischem Material plattet sich ab, wie es an der Erde und an anderen Planeten festgestellt ist. Der Kritiker aber bleibt zunächst dabei, daß dies absurd ist. Rotation gegen den leeren Raum soll Abplattung hervorrufen? Der leere Raum soll auf die Materie wirken?

Muß man wirklich aus den mechanischen Erfahrungen, aus den Feststellungen an beschleunigten und rotierenden Körpern auf der Erde und aus den Verhältnissen an der

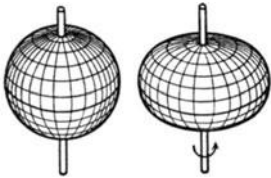


Abb. 19. Abplattung einer Kugel durch Rotation.

Erde selbst solche Konsequenzen ziehen? Newton glaubte, die allgemeingültigen Gesetze der Mechanik aufgestellt zu haben; er mußte das Relativitätsprinzip für beschleunigte Bewegungen, den Gedanken von der Wirkungslosigkeit des leeren Raumes, der ihm sicher von vornherein nahe-

lag, opfern. Mach und nach ihm Einstein konnten sich dazu nicht entschließen; ihnen blieb also nichts übrig, als die *Newtonschen Gesetze der Mechanik nicht als allgemeingültig formulierte Naturgesetze*, sondern nur als provisorische Näherungen anzusehen. Man kann sich vorstellen, welch ungeheure Kühnheit in einer solchen Konsequenz des allgemeinen Relativitätsprinzips liegt.

Aber gibt es denn eine Möglichkeit, die Newtonschen Folgerungen aus den allgemeinsten und mit Leichtigkeit immer wieder nachprüfbaren mechanischen Erfahrungen zu umgehen? Die Antwort können wir am besten an Hand unseres Beispiels von der Drehscheibe-Hexenschaukel geben: „Daß die beiden obengeschilderten Drehbewegungen nicht dieselben Wirkungen haben, ist nicht verwunderlich; niemand wird etwa erwarten, daß an der Scheibe Fliehkräfte auftreten, wenn ein dünner Vorhang, auf den Wände gemalt sind, um

die Scheibe gedreht wird; und sind selbst die dicksten Wände viel mehr als ein solcher Vorhang im Vergleich zu der *übrigen materiellen Welt, die bei unserem Versuch relativ zu der Drehscheibe in Ruhe blieb?* Den Versuch, die Drehscheibe ruhen zu lassen und relativ zu ihr nicht nur die Wände, sondern mit den Wänden die ganze Erde und den ganzen Fixsternhimmel rotieren zu lassen, können wir nicht anstellen; wie kommen wir dazu, zu meinen, dieser Versuch müßte dasselbe Ergebnis zeigen wie die Drehung der Wände allein? Nein, das Relativitätsprinzip ist richtig, und wenn *wir die ganze Welt relativ zu der Scheibe drehen würden, so würden sich dieselben Fliehkräfte ergeben, wie wenn die Welt in Ruhe bleibt und die Scheibe allein rotiert.*“

Dies ist kein Beweis; denn das *experimentum crucis* konnte Mach sowenig anstellen wie ein anderer Mensch. Aber der Gedankengang ist logisch. Man muß aus dem Vorhandensein der Trägheitskräfte nicht mit Newton auf die absolute Bedeutung der Beschleunigung und auf Wirkungen des leeren Raumes auf die Materie schließen. Man kann die Trägheitswirkungen als Wirkungen der ganzen in der Welt vorhandenen Massen, also als Wirkungen vom Fixsternhimmel her auffassen. Man kann annehmen, daß die Erscheinungen in unseren Laboratorien *ganz anders verlaufen würden, wenn dieses Laboratorium allein auf der Welt wäre*, daß unsre fünf Versuche ganz anders ausfallen würden, wenn nur unser Arm, die Feder und die Kugel auf der Welt wären, daß eine Kugel aus elastischem Material sich nur abplattet, wenn sie sich relativ zum Fixsternhimmel dreht, und daß die Erde kugelförmig wäre, wenn die ganze ferne, im Weltraum verteilte Materie nicht vorhanden wäre. Unsere Erde und gar unsere physikalischen Laboratorien sind Tropfen in dem ungeheuren Meer der Materie; was in diesem Tropfen vorgeht, wird vom Meer bestimmt, und es ist sinnlos, die Vorgänge so aufzufassen, wie wenn sie von dem ganzen Materiemeer nicht beeinflußt wären.

Ist diese Kritik mehr wie ein Gedankenspiel? Gewiß ist es befriedigend, zu sehen, daß die Erfahrungen uns nicht unbedingt zu einer so unbefriedigenden Annahme, wie Wir-

kungen vom leeren Raum her, zwingen; aber es fehlen ja noch die Gesetze, durch welche die einfachen Newtonschen zu ersetzen wären. Wie soll man sich ein Bild von diesen Wirkungen der fernen Welten auf die irdischen Vorgänge machen? Wie verursacht die ferne Materie Trägheitswirkungen der von uns beobachteten Materie? Hier endet Machs Mitwirkung; in seinem Ideenkreis lag noch keine Möglichkeit, dieses Problem anzufassen. Aber Einstein sah eine solche Möglichkeit in der Weiterverfolgung des Weges, der zur speziellen *Relativitätstheorie* geführt hatte, und in einer tiefergehenden Betrachtung des obenerwähnten *fünften Versuches*.

Zehntes Kapitel.

Trägheit und Gravitation.

Die Erde übt eine anziehende Kraft auf alle materiellen Körper aus; und wir wissen durch Newton, daß eine solche Kraft von jeder Materie ausgeht und auf jede Materie wirkt. Newton sprach noch von einer Fernkraft, ohne eine weitere Erklärung über deren Wesen und Ursprung zu geben. Wir sind jetzt im Anschluß an die elektromagnetischen Theorien eher geneigt, von einer Feldwirkung zu reden und die Erfahrungen so zu beschreiben: „*Jede Materie erzeugt im leeren Raum ein Gravitationsfeld, in welchem auf einen irgendwo befindlichen Körper eine (immer anziehende) Kraft ausgeübt wird; die Größe dieser Kraft ist von Ort und Zeit abhängig.*“

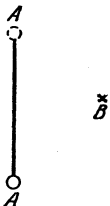


Abb. 20. Fortpflanzung der Gravitationswirkung.

Über eine *Fortpflanzungsgeschwindigkeit* der Wirkungen im Gravitationsfeld wissen wir nichts; es gibt keine Versuche, die darüber etwas aussagen könnten. Natürlich müssen wir nach der speziellen Relativitätstheorie annehmen, daß auch die Gravitationsfelder sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten; aber das heißt nur etwa das Folgende: Wenn der Körper *A* auf der Linie *AA* hin und her schwingt, so zieht er *B* bald nach oben, bald nach unten; diese Wirkungen können von *A* nach *B* nicht mit Überlicht-

geschwindigkeit gehen, wenn die spezielle Relativitätstheorie richtig sein soll. Aber man kann solche Wirkungen nicht beobachten.

Träge und schwere Masse.

Diese Kraft hat nun eine ganz besondere Eigenschaft: sie ist um so größer, je größer die träge Masse eines Körpers ist. Wir können das mit Hilfe des obigen dritten und fünften Versuches in folgender Weise klarmachen: Wir geben im dritten Versuch der Feder dieselbe Länge wie im fünften Versuch, d. h. wir üben, um die Kugel zu beschleunigen, dieselbe Kraft aus, mit welcher wir der Schwerkraft dieser Kugel, d. i. der Kraft, die wir das „Gewicht“ der Kugel nennen, das Gleichgewicht hielten. Nun nehmen wir zwei Kugeln, drei Kugeln, eine halbe Kugel usw.; dann wird die Feder zweimal, dreimal, einhalbmals so stark angespannt wie durch die eine Kugel, *aber immer ist beim dritten Versuch, wenn die Feder so stark wie beim fünften Versuch angespannt wird, die Beschleunigung dieselbe.* Nun nehmen wir eine Kugel aus anderem Material, deren „Gewicht“, also Spannung der Feder im fünften Versuch, doppelt so groß ist wie das der ersten Kugel; im dritten Versuch wird diese Kugel zu derselben Beschleunigung eine doppelt so große Kraft erfordern wie die erste, oder bei Anwendung der gleichen Kraft, wie bei der ersten Kugel, wird die Beschleunigung nur halb so groß.

„Ist das seltsam und merkwürdig?“ wird vielleicht mancher Leser zu fragen geneigt sein. Ist es nicht naheliegend und gar nicht erstaunlich, daß die Schwere eben um so stärker wirkt, je mehr Materie ein Körper enthält? Wir kaufen ja z. B. unsere Nahrungsmittel nach dem Gewicht; wir wollen aber eine bestimmte Menge Materie (die genügend Kalorien zur Ernährung hergeben kann). Wir haben uns schon so daran gewöhnt, daß auch die Trägheitswirkungen dieser Materie etwa beim Transport dem Gewicht proportional sind, daß wir uns gar nicht mehr darüber wundern. Vielleicht war Einstein der erste seit Jahrhunderten, der sich genügend über diese Tatsache gewundert hat.

In der Tat ist das Ergebnis unserer Versuche keineswegs

naheliegend, sondern sehr bedeutungsvoll. Wir haben zwei verschiedene Naturgrößen kennengelernt, erstens die „*Masse*“, welche sich einer Beschleunigung widersetzt und *Trägheitswirkungen* hervorruft (dritter Versuch), zweitens das „*Gewicht*“, die *Kraft*, welche *von der Erde* auf einen an ihrer Oberfläche befindlichen Körper ausgeübt wird (fünfter Versuch). Und nun ergeben die Versuche, daß diese beiden Größen zwangsläufig zusammenhängen, daß sie einander proportional sind.

Um dies recht sinnfällig zu machen, kombinieren wir nun die beiden Versuche zu dem einen, der in der Geschichte der Mechanik der erste war (Galilei 1638). Wir nehmen Körper verschiedener Masse und lassen auf diese an Stelle der von unserm Arm ausgehenden Kraft die uns aus dem fünften Versuch bekannte Schwerkraft wirken; wir lassen also die Körper „frei fallen“, und zwar, um alle andern Wirkungen auszuschalten im luftleeren Raum. Nach unsern obigen Versuchen müssen sowohl die angreifende Schwerkraft als auch die widerstehende Trägheitskraft der Masse proportional sein; infolgedessen muß die Beschleunigung aller Körper dieselbe sein. „*Alle Körper fallen gleich schnell.*“ Daß dem wirklich so ist, wird im Physikunterricht an jeder Schule gezeigt.

Wir nennen die Beschleunigung, welche die Schwerkraft jedem Körper an der Erdoberfläche erteilt, die „*Erdbeschleunigung*“ und sprechen unser Ergebnis so aus: „*Das Gewicht eines Körpers ist gleich seiner Masse mal der Erdbeschleunigung.*“ Wir können also die Masse eines Körpers so bestimmen, daß wir sein Gewicht messen und durch die Erdbeschleunigung, eine ein für allemal bestimmte Größe (an einer bestimmten Stelle der Erdoberfläche), dividieren. Man nennt den aus unserm dritten Versuch gewonnenen Massenbegriff, der auch unsern vierten Versuch beherrscht, die „*träge Masse*“, den aus dem fünften Versuch, also aus dem Gewicht definierten Begriff die „*schwere Masse*“. Und die Erfahrung gibt uns nun das Recht, diese beiden Begriffe, die zunächst nichts miteinander zu tun haben, einander gleichzusetzen; *die träge und die schwere Masse sind gleich.*

In der alten Mechanik stand das Gravitationsgesetz unbegriffen und unabhängig neben den anderen grundlegenden Begriffen, und der Satz von der Gleichheit der schweren und der trägen Masse stand ebenso unbegriffen als ein Teil des Gravitationsgesetzes da. Erst Einstein hat erkannt, daß diese Erfahrungstatsache einen Weg zeigt, um das Gravitationsgesetz in das grundlegende System der Physik einzuordnen, und zwar war sein leitender Gedanke der folgende:

Äquivalenz von Gravitationsfeld und beschleunigter Bewegung.

Man kann zweifellos nicht einfach den Satz aussprechen, daß die Naturgesetze für jeden Beobachter in beliebigem Bewegungszustand die gleichen sind; denn es zeigen sich Trägheitskräfte bei beschleunigten Bewegungen. Aber wenn grundsätzlich immer die Gravitationskräfte mit berücksichtigt werden und nicht, wie bei unsern Ausführungen über die spezielle Relativitätstheorie, die Gravitationsfelder als etwas von den übrigen Erscheinungen Abtrennbares angesehen werden, dann bekommt die Behauptung der Relativität wieder ihren Sinn. Wir können z. B. zunächst für den einfachsten Fall die Behauptung aussprechen: „Die *Naturgesetze sind dieselben* für einen Beobachter (oder für ein Laboratorium), der sich *geradlinig mit gleichmäßiger Beschleunigung* bewegt, und für einen Beobachter, der in einem *konstanten Gravitationsfeld* (so wie es z. B. an der Erdoberfläche verwirklicht ist) *ruht*. Wir können mit keinem Mittel physikalischer Forschung zwischen diesen beiden Möglichkeiten unterscheiden.“

Um sich nun genau klarzumachen, was mit dieser Aussage gemeint ist, muß der Leser einmal von vielen Dingen, die er weiß, abstrahieren und sich auf den Gesichtskreis des Altertums zurückziehen, also nicht an die Kugelgestalt und Drehung des Erdkörpers denken, auch nicht an die Abnahme des Gravitationsfeldes, d. i. das Schwächerwerden der Erdanziehung mit wachsender Höhe über dem Erdboden.

Denken wir uns vielmehr winzig klein und in einem Kasten, der die Kugel unserer Versuche ersetze, unter-

gebracht; dazu seien Körper in unserm Kasten vorhanden, die wie wir ruhen, und solche, die, nachdem sie hochgehoben oder abgeworfen wurden, sich selbst überlassen werden. Wir bemerken, wenn nun der obige *fünfte Versuch* mit unserm Kasten angestellt wird, daß wir sitzend auf den Stuhl drücken; wir fühlen an unserm Körper den Druck der Berührungsstellen; auch die andern ruhenden Körper üben einen solchen Druck auf die Unterlage aus; ein Gewicht biegt einen Träger durch; ein Pendel hängt vertikal nach unten und spannt seine Schnur. Die losgelassenen Körper bewegen

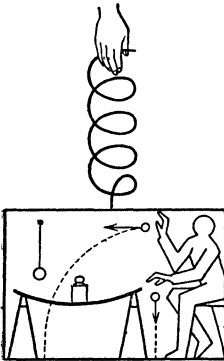


Abb. 21. Gravitation und Beschleunigung.

sich relativ zu uns gleichmäßig beschleunigt, die geworfenen in den bekannten Wurfparabeln, die auch eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung vorstellen. *Genau dasselbe* würden wir aber auch beim *dritten Versuch* empfinden, und zwar *quantitativ* dasselbe, wenn die dem Kasten erteilte Beschleunigung gerade gleich der Erdbeschleunigung gemacht wird. Dann übt unserer Meinung nach die Kastenwand auf uns und die andern festliegenden Gegenstände einen Druck aus, um sie zur Teilnahme an der beschleunigten Bewegung zu zwingen, während die sich selbst überlassenen

Körper keine Veranlassung haben, die beschleunigte Bewegung mitzumachen; sie bleiben in ihrer Ruhe oder gleichförmigen Bewegung. Relativ zu uns, die wir beschleunigt bewegt sind, scheint natürlich eine beschleunigte Bewegung vorhanden.

Daß die Bewegungen relativ sind, ist geometrisch klar. Daß auch die Kräfte, nämlich die Druckempfindungen, dieselben sind, macht man sich am besten klar, wenn man die Empfindung beim *Anfahren des Zuges*, während man sich mit dem Körper ganz anlehnt, mit der Empfindung beim Liegen auf einer Bank vergleicht; der Unterschied ist nur ein quantitativer und würde ganz verschwinden, wenn der Zug gerade mit Erdbeschleunigung anfahren würde. Wenn der

Lift nach oben anzieht, so empfinden wir Wirkungen, die uns genau wie ein Schererwerden, ein stärkerer Druck auf unsere Fußsohlen erscheinen, bei Beschleunigung nach unten fühlen wir eine entsprechende Erleichterung. Auch in diesem Fall können wir nicht unterscheiden, ob auf unsern Körper eine Schwerkraft oder eine Trägheitskraft infolge Beschleunigung wirkt.

Wir haben überhaupt keine Möglichkeit, *Schwerkraft* und *Trägheitskraft* zu trennen, wenn sie gemeinsam auftreten. Dafür dient als sehr eindrucksvolles Beispiel der Flug im Nebel. Fliegt ein Flugzeug geradeaus, so empfindet der Pilot nur die Schwerkraft, welche ihn auf den Sitz preßt; bei gleichförmigem Flug auf einer Kurve kommt die Fliehkraft, d. h. eine Trägheitskraft hinzu. Diese setzt sich mit der Schwerkraft zu einer Gesamtkraft („Resultierende“) zusammen; das Flugzeug muß sich schief legen (Abb. 22), damit die Flügelkraft das Gleichgewicht herstellen kann. Der Pilot wird wieder nur durch die Gesamtkraft auf den Sitz gepreßt; diese Gesamtkraft ist freilich etwas größer als die Schwerkraft

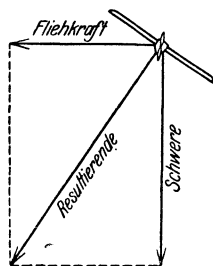


Abb. 22. Flugzeug in einer Kurve.

allein; aber dies ist bei weiten Kurven nicht leicht zu fühlen. Fliehkraft und Schwerkraft setzen sich so sehr zu einer Kraft zusammen, daß keine Unterscheidung möglich ist, sobald die Sicht nach dem Erdboden aufgehoben ist; in der Tat kommen Flugzeuge oft in ganz schiefer und gefährlicher Lage aus dem Nebel heraus.

Es ist ein weitverbreiteter Irrtum, daß man etwa mit einem *Pendel*, das immer nach unten hänge, die Schwerkraftrichtung feststellen könne; auch das Pendel und jedes mechanische System unterscheidet nicht zwischen Fliehkraft und Schwerkraft, sondern erfährt nur die Resultierende aus beiden. (Auch der Kreisel, den man in Flugzeugen zu diesem Zweck verwenden kann, unterscheidet nicht etwa Trägheitskraft und Schwerkraft; er hält nur die ursprüngliche Lage fest.)

Überwindung des Widerspruchs der Mechanik.

Wenn es also kein physikalisches Mittel gibt, *Gravitationskräfte und Trägheitskräfte* zu unterscheiden, sind sie vielleicht in Wirklichkeit *gar nicht verschieden*? Ist es vielleicht in Wahrheit nur derselbe Tatbestand, den wir einmal als Trägheit, ein andermal als Gravitation beschreiben, je nachdem in welchem Bewegungszustand wir uns selbst denken? In unserem Beispiel gab es keine Möglichkeit, zu entscheiden, ob der dritte oder der fünfte Versuch ausgeführt wurde: Einmal sagen wir: „Wir befinden uns ruhend in dem Kasten; es herrscht ein konstantes Gravitationsfeld, das allen Körpern die gleiche Beschleunigung in einer bestimmten Richtung erteilt und die ruhenden Körper in der gleichen Richtung gegen ihre Unterlage preßt.“ Das andre Mal sagen wir: „Der Kasten, in dem wir uns befinden, wird gleichförmig beschleunigt; die Unterlagen beschleunigen die darauf ruhenden Körper, die mit ihrer Trägheitskraft zu widerstehen scheinen. Gegen die an der Bewegung nicht beteiligten Körper bewegen wir uns gleichmäßig beschleunigt.“ Diese beiden Aussagen sind so identisch wie die beiden oben-erwähnten: „unser Zug fährt“ und „die Landschaft kommt uns entgegen“. Es gibt keine Möglichkeit, zwischen beiden zu entscheiden; sie sind gleich richtig oder falsch; sie sind vollkommen gleichwertig. Somit haben wir ein *allgemeineres Relativitätsprinzip* gewonnen; *das Relativitätsprinzip kann auf beschleunigte Bewegungen ausgedehnt werden, wenn man die Gravitation grundsätzlich mit heranzieht.*

So stellte Einstein 1907 das Problem; vor ihm lag die große Aufgabe, diesen Standpunkt nun allgemein durchzuführen, seine Folgerungen zu ziehen und an der Erfahrung zu prüfen. Das bisher Gesagte zeigt ja nur eine *Möglichkeit*, um trotz der entgegenstehenden einfachen mechanischen Erfahrungen das allgemeine Relativitätsprinzip, die Aussage von der Wirkungslosigkeit des leeren Raumes, zu retten. Ob diese Möglichkeit wirklich der *Wahrheit* entspricht, kann nur die Durchführung der Gedanken bis zur schließlichen Prüfung an der Erfahrung entscheiden. Bis hierher kann als

bestechender Vorzug der Einsteinschen Anschauung die (zum erstenmal in der Geschichte der Physik gelungene) Einordnung der Gravitationskräfte in das Natursystem gelten.

Elftes Kapitel.

Die Naturgesetze und das allgemeine Relativitätsprinzip.

Zunächst müssen die bekannten Naturgesetze darauf untersucht werden, ob sie der Einsteinschen Formulierung des allgemeinen Relativitätsprinzips entsprechen, bzw. ob sie ohne Verletzung der Erfahrungstatsachen entsprechend umgedacht und umformuliert werden können. Wir gehen etwa von den bekannten Gesetzen für einen beschleunigten Beobachter aus und übertragen diese auf das Gravitationsfeld. Bisher hat man andere Wirkungen des Gravitationsfeldes als die in dem Newtonschen Gravitationsgesetz (S. 78) enthaltenen überhaupt nicht gekannt; nun müssen sich solche ergeben, wodurch gerade die Gravitation eng in das physikalische Weltbild eingefügt wird.

Lichtausbreitung im beschleunigten Laboratorium.

Wir beginnen mit der *Lichtausbreitung*. Die Abhängigkeit der *Lichtgeschwindigkeit* vom *Beschleunigungszustand* und die daraus folgende Abhängigkeit vom *Gravitationsfeld* sind nicht ganz einfach einzusehen. Wir denken uns zunächst wieder zwei Laboratorien mit Beobachtern *A* und *B*; die beiden haben eine Beschleunigung in der Richtung von *A* nach *B* und werden von einem dritten Beobachter *C* betrachtet, der an der beschleunigten Bewegung nicht teilnimmt. Der Vorgang, der beobachtet werden soll, sei der Hin- und Rückgang eines Lichtstrahls auf einer Strecke senkrecht zur Beschleunigungsrichtung, und zwar in *A* und *B*; da die beiden Laboratorien *A* und *B* sich in nichts unterscheiden, müssen die beiden Vorgänge ganz gleich verlaufen.

Aber wir fragen nun: „Wie erscheinen sie bei A?“ C beobachte erstens die Zeitdifferenz zwischen dem Aufblitzen beim Abgang von A und beim Zurückkommen nach A; diese ist vollkommen identisch mit derselben Zeitdifferenz bei B. Aber nun beobachte C weiter die Zeitdifferenz zwischen den beiden Signalen des Beginns und des Endes, die von B ausgehen, beim Eintreffen in A. Das Endsignal geht später von B ab als das Anfangssignal; in der Differenzzeit wächst die Geschwindigkeit, mit der A dem Signal entgegenläuft. Die Laufdauer des Endsignals ist also kürzer als die des Anfangssignals; die Zeitdifferenz zwischen dem Auftreffen der beiden Signale bei A ist kleiner als die Zeitdifferenz bei B, bzw. als die

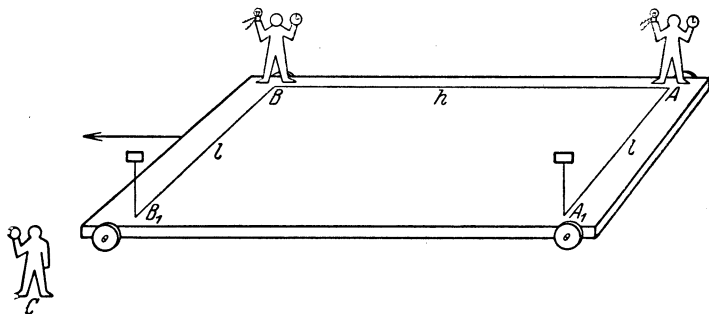


Abb. 23. Messung der Lichtausbreitung im beschleunigten System und im Gravitationsfeld.

Zeitdifferenz, die bei dem von A ausgesandten Signal gemessen wird. Da die Längen der Bahnen AA_1A und BB_1B ganz gleich sind, folgt unmittelbar, daß A für die Lichtgeschwindigkeit bei B einen größeren Wert erhält wie bei sich selbst.

In Formeln: Das Lichtsignal brauche — immer von C aus beurteilt — die Zeit τ zum Durchlaufen des Wegs BB_1B oder AA_1A ($= 2l$). Das Anfangssignal gehe zur Zeit 0 in B ab und treffe zur Zeit t_0 in A ein; dann muß die Summe der in der Zeit t_0 vom Lichtsignal und vom beschleunigten Beobachter A (Beschleunigung g) zurückgelegten Wege gleich dem Abstand $AB = h$ sein; in Formel $ct_0 + \frac{gt_0^2}{2} = h$. Das Endsignal geht zur Zeit τ von B ab und treffe

zur Zeit t_1 in A ein; dann gilt ebenso $c(t_1 - \tau) + \frac{gt_1^2}{2} = h$. Wir suchen die Zeitdifferenz $t_1 - t_0$, welche die Zeit des Hin- und Herweges BB_1B , die A beobachtet, angibt; wir ziehen die beiden Gleichungen voneinander ab und erhalten $c(t_1 - t_0 - \tau) + \frac{g}{2}(t_1^2 - t_0^2) = 0$.

Nun beachten wir weiter, daß $\frac{t_1^2 - t_0^2}{2} = \frac{t_1 + t_0}{2}(t_1 - t_0)$ und daß $\frac{t_1 + t_0}{2}$ den Mittelwert der Übertragungszeiten von B nach A darstellt, der näherungsweise, aber genau genug durch $\frac{h}{c}$ ausgedrückt wird. Setzen wir dies in unsere Gleichung ein, so ergibt sich

$$t_1 - t_0 = \frac{c\tau}{c + \frac{gh}{c}} = \frac{\tau}{1 + \frac{gh}{c^2}}.$$

Die Lichtgeschwindigkeit, von A aus beurteilt, hat bei A den Wert $c_0 = \frac{2l}{\tau}$, bei B hingegen den größeren Wert $c = \frac{2l}{t_1 - t_0} = c_0 \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right)$.

Wenn wir diesen Gedankengang umkehren und auf die gleiche Weise untersuchen, was B sieht, so ergibt sich, da ja B den von A kommenden Lichtsignalen nicht entgegenläuft, sondern im Gegenteil davor wegläuft, dasselbe Resultat. Auch B konstatiert, daß die *Lichtgeschwindigkeit bei A kleiner als bei B ist*. Die Messungen von A und B , die ja relativ zueinander in Ruhe sind, *stimmen ganz miteinander überein*; sonst ließe sich die Theorie gar nicht durchführen. Es liegt also hier ein anderer, wesentlich einfacherer Fall vor, wie früher bei den einander widersprechenden Aussagen von zwei relativ zueinander bewegten Beobachtern. Wir haben auch *bisher gar keine problematischen Elemente* eingeführt; nicht einmal die Ergebnisse der speziellen Relativitätstheorie haben wir benutzt, sondern Zeitdifferenzen auf Grund altbekannter und keineswegs strittiger Gesetze der Lichtausbreitung und der beschleunigten Bewegung bestimmt. Erst dann kommen wir zu einer neuen und außerhalb des Rahmens der alten Physik liegenden Aussage, wenn wir nun *unser Prinzip von der Äquivalenz* der Vorgänge im gleichmäßigen Gravitationsfeld mit den Vorgängen in einem gleichförmig beschleunigten System anwenden.

Lichtgeschwindigkeit und Lichtstrahlen- krümmung im Gravitationsfeld.

Nun ziehen wir den *ersten Schluß* aus unserem allgemeinen Relativitätsprinzip: „Da die Vorgänge, die wir soeben betrachtet haben, ganz in der gleichen Weise verlaufen sollen, wenn *A* und *B* ruhen, aber in dem betrachteten Raum ein gleichförmiges *Gravitationsfeld* herrscht, das allen Körpern die gleiche Beschleunigung in der Richtung von *B* nach *A* hin erteilt, so muß auch in einem solchen die *Lichtgeschwindigkeit nicht konstant, sondern von Punkt zu Punkt veränderlich sein.*“ Denken wir uns z. B. *A* an der Erdoberfläche, *B* in großer Höhe, so muß die Lichtgeschwindigkeit

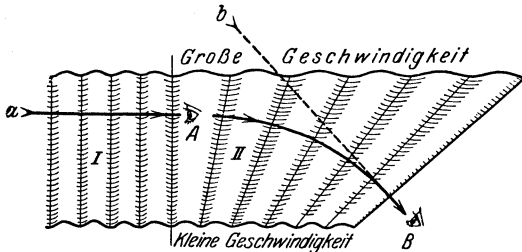


Abb. 24. Krümmung der Lichtstrahlen infolge verschiedener
Geschwindigkeit der Lichtwellen.

in *B* größer als in *A* sein. Die Lichtgeschwindigkeit nimmt mit wachsender Höhe zu.

Diese Folgerung an der Erfahrung zu prüfen, ist indes nicht möglich, da der Effekt viel zu klein selbst für die feinsten Meßinstrumente ist; denn nach der Theorie unterscheidet sich die Lichtgeschwindigkeit in 10 km Höhe von der Lichtgeschwindigkeit am Erdboden nur um ein Billionstel ihres Wertes. Aber diese Veränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit mit der Höhe hat eine andere interessante Konsequenz, die dem Experiment zugänglicher ist. Um diese zu begreifen, erinnern wir uns an die Wellenlehre des Lichtes und betrachten eine ebene, d. h. von einer sehr weit entfernten Quelle (*a* in Abb. 24) herkommende Welle; die Wellen schreiten in dem Raume (I), in welchem die Lichtgeschwindigkeit überall gleich groß ist, so fort, daß alle Wellenkämme

einander parallel bleiben; ein Beobachter, der am Punkte *A* steht, sieht das Licht von dem fernen Punkte *a* herkommen. Nun treten die Wellen in einen Raum mit Gravitationsfeld (II) ein, in welchem die Lichtgeschwindigkeit oben größer als unten ist; dann bleiben die Wellenkämme unten einander näher wie oben, und die Folge ist ein Wellenbild, dessen Front gegen die ursprüngliche verdreht erscheint. Ein Beobachter am Orte *B* meint, das Licht komme von einer Quelle bei *b* her; *durch die Ungleichmäßigkeit der Lichtgeschwindigkeit erscheint das Licht abgelenkt.* Man kennt diese einfache Betrachtung als Grundlage der Lichtbrechung; man kann einen ähnlichen Vorgang auch an Wellen auf Wasser von ungleichmäßiger Tiefe beobachten; denn in flachem Wasser ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen kleiner als in tiefem.

Diese Ablenkung des Lichtes muß nun nach unserer Theorie im Gravitationsfeld überall auftreten; ein *an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl* wird in jedem Punkt seiner Bahn weiter abgelenkt und durchläuft so eine *gekrümmte Bahn.* Da sich die Ablenkung vergrößert, wenn der Lichtstrahl recht lange durch ein Gravitationsfeld gewandert ist, so kann die Kleinheit des Effektes durch die Summierung über einen langen Weg aufgewogen werden, so daß die Aussicht auf Beobachtbarkeit wächst. In der Tat hat Einstein schon 1911, als die Theorie noch mehr ein Problem als ein Gedankensystem war, erkannt, daß ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl eine Ablenkung erfahren muß, die gerade noch innerhalb der Beobachtungsmöglichkeiten liegt. Einstein konnte damals noch nicht den exakten Wert dieser Ablenkung berechnen; denn er mußte sich dazu noch des gewöhnlichen Newtonschen Gravitationsgesetzes bedienen; er konnte damals noch nicht wissen, daß die Konsequenzen seiner Theorie dies Gesetz selbst merklich verändern mußten. Immerhin sagte er damals schon voraus, daß die *Lagen der Fixsterne, die bei einer totalen Sonnenfinsternis in der Nähe des Sonnenrandes stehen, verschoben erscheinen müssen gegenüber ihrer Lage am Nachthimmel.* Mehrere Expeditionen zogen seitdem aus, um in tropischen Gebieten totale

Sonnenfinsternisse zu beobachten und die Fixsterne in der Nähe des abgeblendeten Sonnenrandes zu photographieren. Oft waren alle Mühen und alle Kosten umsonst, da der Himmel gerade im Augenblick der Finsternis bewölkt war. Die besten Erfolge ergaben sich bei den englischen Expeditionen 1919 nach Sobral und nach Principe, sowie bei der deutschen Expedition 1930 nach Java. Ungeheure Arbeit erforderte die Auswertung der photographischen Platten. Heute wissen wir mit Sicherheit: *der Effekt ist vorhanden, und er ist ungefähr so groß*, wie ihn die Einsteinsche Theorie voraussieht. (Von dieser wurde bisher nur der erste Teil auseinandergesetzt, nämlich die Einwirkung der Gravitation auf die Ausbreitung des Lichtes, nicht der ungleich tiefere und schwierigere zweite Teil, die Abänderung des alten Gravitationsgesetzes.)

Mancher Leser wird erstaunt sein, daß ein solcher Riesenapparat in Gang gesetzt wurde, um diesen kleinen und für alle „praktischen“ Zwecke ganz belanglosen Effekt zu finden, und macht sich vielleicht nicht klar, welch ein Triumph menschlicher Erkenntniskraft hier gelungen ist. Wollte man früher einem Schüler klarmachen, wie wunderbar die Naturgesetze wirken und wie uns ihre Erkenntnis auf verborgene Dinge führen kann, so nahm man gerne als Beispiel die große Leistung von Leverrier und Adams, die aus merkwürdigen Bewegungen des Uranus unter Zuhilfenahme des Newtonschen Gravitationsgesetzes auf das Vorhandensein und den Ort des Neptun schlossen und so dessen Entdeckung möglich machten. Dies war aber ein Kinderspiel im Vergleich zu der Leistung Einsteins. Dort Störungen und konsequente Anwendung eines bekannten Gesetzes. Hier keine Erfahrungen, auch keine Notlage wie bei der speziellen Relativitätstheorie; zwei Erscheinungsgruppen, Licht und Gravitation, die bisher gar nichts miteinander zu tun hatten; als Leitstern nur ein Prinzip, dem alle Erfahrungen zu widersprechen scheinen, und nur die eine längst bekannte und allzu unbeachtete Tatsache von der Gleichheit der schweren und der trägen Masse. Die Entdeckung des Neptun hat uns um die *Kenntnis* eines Planeten bereichert, aber die Naturgesetze blieben für uns dieselben; die Voraussage der Licht-

ablenkung durch ein Gravitationsfeld geschah auf Grund ganz neuer *Erkenntnisse*, lieferte ungeahnte Zusammenhänge zwischen verschiedenen Naturerscheinungen und führte zu einem neuen physikalischen Weltbild.

Relativitätsprinzip und Newtonsches Gravitationsgesetz.

Besonderes Interesse beansprucht nun unser obenerwähntes Naturgesetz (4) über die *Gravitation*. Dieses muß natürlich eine ganz grundlegende Veränderung erfahren. Denn wäre es ein allgemeines und endgültig formuliertes Gesetz, daß jeder Körper ein Gravitationsfeld entsprechend dem Newtonschen in seiner Umgebung erzeugt, so würde doch das Vorhandensein eines großen Körpers, also etwa der Erde unter uns, zu der eindeutigen Vorstellung zwingen, daß wir uns im Gravitationsfeld befinden. Nehmen wir einmal an, daß wir unter uns eine Materie wüßten, die gerade die Schwerkraft der Erde ausübt, aber sehen wir dabei noch ganz von der Kugelgestalt ab, so erkennen wir, daß wir in diesem Gravitationsfeld ruhen. Aber nach dem Relativitätsprinzip sollen wir doch auch sagen können: „Wir befinden uns in einer gleichmäßig-beschleunigten Bewegung nach oben.“ Dann aber bleiben alle Erscheinungen, wie aus allen oben angestellten Erwägungen hervorgeht, nur dann richtig, wenn wir nicht gleichzeitig auch noch eine Erdanziehung haben; denn sonst müßte uns ja jede Bewegung eines Körpers von oben nach unten doppelt so stark beschleunigt erscheinen, nämlich erstens infolge unsrer eignen Beschleunigung nach oben, zweitens infolge der Erdanziehung. Daraus folgt: Das *Gravitationsgesetz* kann für Beobachter, die sich in beschleunigter Bewegung befinden, sicher *nicht dasselbe* sein wie für solche, die relativ zum anziehenden Körper in Ruhe sind. Vielmehr muß etwa ein Beobachter, der die Vorgänge auf der relativ zu ihm unbewegten Erde als Wirkung gleichmäßig-beschleunigter Bewegung deuten will, gleichzeitig feststellen, daß von der Erde keine Gravitationswirkung ausgeht, oder daß diese Gravitationswirkung durch eine andere, vielleicht vom Fixsternhimmel ausgehende gerade kom-

pensiert wird. Die Gravitationswirkung, die wir der Erde zuschreiben müssen, wird um so kleiner, je größer wir die Beschleunigung beurteilen, welche die Erde selbst von uns aus gesehen nach oben hat. (Es ist hier wesentlich zum Verständnis, daß wir ganz von unserer Kenntnis der Kugelgestalt abstrahieren; sonst wird das Problem gleich zu kompliziert.)

Relativität der Masse.

Das Gravitationsgesetz ist also ganz neu zu formulieren, und zwar so, daß es vom Beschleunigungszustand des Beobachters ganz unabhängig wird. Dies ist das *Kernproblem* der allgemeinen Relativitätstheorie, für dessen Lösung wir bisher noch keinen Anhaltspunkt gewonnen haben, das Einstein 1911 aufgeworfen, aber erst 1915 befriedigend gelöst hat. Ein einziger Grundgedanke hat ihm von Anfang an Hoffnung geben können, daß das Problem durch Weiterbildung der speziellen Relativitätstheorie lösbar sein werde: Nach der gesuchten Theorie müssen allgemein Trägheits- und Gravitationswirkungen nicht unterscheidbar sein; die *Trägheitswirkungen müssen ebenso wie die Gravitationswirkungen von einer gegenseitigen Beeinflussung der Körper herühren*; andererseits müssen noch ganz andere Gravitationswirkungen vorhanden sein als die Newtonschen; denn sonst könnten sie den vielgestaltigen Trägheitswirkungen (man denke etwa an die Fliehkraft!) nicht äquivalent sein. Wir müssen erwarten, daß ein Körper, der allen andern Körpern entrückt wird, bei dem also alle Wirkungen von andern Körpern her ausgeschaltet sind, auch keine Trägheitskräfte mehr erfährt, daß also seine *Masse* zu Null wird.

Nun kennen wir einerseits in der Newtonschen Mechanik die kinetische Energie, d. i. die Energie der Bewegung; entfernt sich ein Körper von einem anziehenden Zentrum, so wird diese kinetische Energie immer kleiner und kleiner. (Um ein Energiegesetz aussprechen zu können, sagen wir, die kinetische setze sich in potentielle Energie, d. i. Energie des Gravitationsfeldes, um; von dieser Begriffsbildung können wir hier absehen¹. Andererseits wird in der speziellen Relativi-

¹ Darüber siehe unten S. 114.

tätstheorie der Begriff der *kinetischen Energie* seiner selbständigen Bedeutung beraubt und zu einem *Teil der Massenergie* gemacht, von welcher er sich nur für bestimmte Beobachter, *nicht* absolut genommen, *abtrennen* läßt. In der Newtonschen Mechanik und Gravitationslehre kann sich der Körper nur so weit vom anziehenden Zentrum entfernen, bis seine kinetische Energie Null geworden ist. Wie auch die neue Mechanik und Gravitationslehre beschaffen sein mögen, diese Einschränkung wird fallen, da sie vom Standpunkt der speziellen Relativitätstheorie schon sinnlos geworden ist. Das Gesetz wird also, wenn wir seine wahre Gestalt auch noch nicht ahnen können, jedenfalls die Aussage enthalten, daß ein Körper, der sich von einem anziehenden Zentrum entfernt, immer mehr an Energie verliert, und das bedeutet nach den Ausführungen S. 65 einen Verlust an Masse. Extrapolieren wir ins Unendliche, so können wir sagen: „Wenn ein Körper immer weiter von allen anderen Körpern entfernt wird, so verliert er seine Masse, und mit ihr entfallen alle Trägheitskräfte.“ In weiter Entfernung von allen andern Körpern erfährt der Körper auch keine Newtonschen Gravitationskräfte; die Analogie zwischen Trägheit und Schwere wird also durch diese Betrachtung noch vollkommener; die *Masse* wird selbst *relativiert*, als *Wirkung von Materie auf Materie*, nicht der Materie an sich erkannt.

Somit zeigt eine der speziellen Relativitätstheorie entnommene Idee ihre Fruchtbarkeit in den neuen Gedankengängen; aber dies kann nur die *Hoffnung* erwecken, daß man beide Gedankenkreise, den der *speziellen Relativitätstheorie* und den der *alten Mechanik und Gravitationslehre*, zu einem in sich *geschlossenen System* vereinigen könne, welches dem *allgemeinen* Relativitätsprinzip gehorcht. Noch ist der Weg dahin nicht zu sehen.

Rotierende Körper.

Es lohnt sich vielleicht, wenn wir uns das Problem der rotierenden Körper, speziell der rotierenden Erde, kurz vor Augen halten, obwohl auch diese Betrachtung uns zunächst nur ein Problem zeigen kann; wenigstens können wir er-

kennen, daß hier kein Widerspruch vorzuliegen braucht. Unser allgemeines Relativitätsprinzip verlangt den Aufbau einer Mechanik, die auch für die rotierende Erde dieselbe Form hat wie für ein ruhendes System. Das heißt, man muß aus dieser Mechanik heraus die Erscheinungen auch deuten können, wenn man trotz aller Ergebnisse von Versuchen dabei bleiben will, die Erde liege in der Welt still, und der Fixsternhimmel drehe sich um die Nordsüdachse der Erde. Dann muß die *Flihkraft*, deren Existenz natürlich nicht fortgezaubert werden kann, als *Wirkung einer Gravitation* erscheinen, die vom Fixsternhimmel infolge seiner Drehung ausgeht. Das Gravitationsgesetz muß dann eine solche Form annehmen, daß die auf jeden Körper proportional seiner Masse wirkende Gravitationskraft (wenigstens in der Nähe der Drehachse) um so größer wird, je weiter man sich von der Drehachse entfernt; sie wächst auch mit dem Quadrat der Drehgeschwindigkeit, d. h. sie wird viermal so groß, wenn die Drehgeschwindigkeit des Fixsternhimmels doppelt so groß wird.

Es ist auch klar, daß infolge dieses Gravitationsfeldes die *Lichtgeschwindigkeit nach außen hin stark wachsen* muß. Die Grundfolgerungen der speziellen Relativitätstheorie müssen nämlich in unserer jetzigen Theorie erhalten bleiben; daher kann nicht jetzt ein gleichförmig-geradlinig bewegter Körper — und das ist ein Fixstern während einer kurzen Strecke auch auf seiner Kreisbahn um die Erdachse — mit Überlichtgeschwindigkeit laufen. Wir können aber leicht berechnen, in welcher Entfernung von der Erdachse ein dergestalt einmal im Tag umlaufender Körper die Lichtgeschwindigkeit erreichen müßte, wenn wir diese als Konstante für das ganze Weltall ansehen würden. Diese Entfernung ist etwa 1700 mal so groß als die Entfernung der Erde von der Sonne und mehr als 20 mal so groß als die doppelte Entfernung des Pluto von der Sonne, d. i. die Ausdehnung des uns bekannten Planetensystems, aber verschwindend klein gegen die Entfernungen der Fixsterne, von deren nächstem her das Licht $3\frac{1}{2}$ Jahre zu uns braucht. Also eine Weltauffassung, nach welcher das Himmelsgewölbe sich um die ruhende Erde

dreht, erfordert ein Ansteigen der Lichtgeschwindigkeit nach außen hin, um mit der speziellen Relativitätstheorie im Einklang zu bleiben.

Mancher Leser wird hier vielleicht ein Bedenken haben: „War denn nicht die *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* ein Hauptfundament für die ganze spezielle Relativitätstheorie? Wird hier nicht diese *Grundlage* aufgegeben?“ Dem ist zu entgegnen, daß alles richtig bleibt einschließlich der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, solange wir nur Räume betrachten, in welchen die Gravitationswirkungen unmerklich klein sind; in der Wirkung auf die Lichtgeschwindigkeit und die elektrisch-optischen Erscheinungen überhaupt ist die ganze Erde ein solcher Raum, ja bis auf einige nur der feinsten Meßtechnik zugängliche Vorgänge das ganze Sonnensystem. Über Räume mit merklichen Gravitationswirkungen sagte die spezielle Theorie nichts aus, für solche muß die ursprüngliche Basis erweitert werden, und zwar in der Weise, daß nun die Lichtgeschwindigkeit zwar immer noch an jeder Stelle des Raumes einen bestimmten Wert hat (und immer noch für jeden in geradlinig-gleichförmiger Bewegung befindlichen Beobachter denselben Wert), aber daß dieser Wert von der Stelle des Raumes, nämlich von dem dort herrschenden Gravitationsfeld, abhängig ist.

Zwölftes Kapitel.

Zeitmessung.

Das Naturgesetz, das uns nun noch fehlt, soll die auf einen materiellen Körper wirkende, als Gravitation oder als Trägheit deutbare Kraft und die daraus resultierende Bewegung des Körpers in Abhängigkeit von Zeit und Raum beschreiben und in Zusammenhang mit der Massenverteilung und Massenbewegung in Raum und Zeit bringen. Es muß also zunächst — gerade im Hinblick auf die Folgerungen der speziellen Relativitätstheorie — klargelegt werden, wie wir zeitliche und räumliche Entfernungen messen.

Aussagen der speziellen Relativitätstheorie.

Rufen wir uns kurz ins Bewußtsein, was die *spezielle* Relativitätstheorie darüber ans Licht gebracht hat: Eindeutig klar kann man nur vom Zusammenfallen zweier Ereignisse an einem bestimmten Punkt sprechen. Die räumliche Lage des Punktes ist gegeben durch eine bestimmte Marke an einem Maßstab, die zeitliche Lage des Ereignisses durch eine bestimmte Zeigerstellung einer Uhr. Die Wissenschaft vor 1905 konnte annehmen, daß man die absolut gültige *Entfernung* zweier Punkte durch Anlegen eines Maßstabs bestimmen könne, die absolute *Zeitdauer* eines Ereignisses durch die Zeigerwanderung auf einer Uhr. Die spezielle Relativitätstheorie zeigte, daß man auf diese Weise nur dann räumliche und zeitliche Entfernung eindeutig bestimmen kann, wenn alle verwendeten Uhren und Maßstäbe relativ zueinander in der Ruhe sind, daß aber Zeitdauern und Entfernungen verschieden werden für zwei Beobachter, die sich relativ zueinander geradlinig und gleichförmig bewegen. In der Deutung der Vorgänge innerhalb der vierdimensionalen, aus Raum *und* Zeit bestehenden „Welt“ kann man dies so ausdrücken: Die raumzeitliche Entfernung zweier Ereignisse ist eine ganz bestimmte, absolut eindeutige und für jeden Beobachter gleiche Größe, eine „Invariante“, wie der Fachausdruck lautet¹, aber die räumliche und zeitliche Entfernung für sich sind je nach dem Bewegungszustand des Beobachters verschiedene Teilgrößen (Fachausdruck „Komponenten“) dieser eindeutigen Größe.

Die allgemeine Theorie bringt Kraftfelder und beschleunigte Bewegungen miteinander in Beziehung; die Frage des Zusammenhangs der räumlichen und zeitlichen Messung muß also gestellt werden, und es ist von vornherein klar, daß sie auch hier nicht in der alten naiven Weise beantwortet werden wird, daß Raum- und Zeitgrößen für alle Beobachter eindeutig festlegbar seien, daß z. B. Uhren, die für einen relativ dazu ruhenden Beobachter synchron gehen, dies auch für einen relativ dazu bewegten tun. Und da ein Gravitationsfeld

¹ Siehe unten, S. 132.

äquivalent einem beschleunigten Körpersystem sein soll, müssen wir von vornherein nicht als selbstverständlich ansehen, daß Uhren an verschiedenen Stellen dieses Feldes (d. h. in verschiedenen Höhen) synchron gehen, wenn sie dies ohne Gravitationsfeld tun, und daß Maßstablängen unabhängig vom Gravitationsfeld seien.

Uhren im Gravitationsfeld.

Wir betrachten zunächst wieder unsere beiden Laboratorien *A* und *B* vom Laboratorium *C* aus, relativ zu welchen sie in gleichförmig beschleunigter Bewegung sind. Beim Beginn dieser Bewegung sei noch keine Relativbewegung zwischen

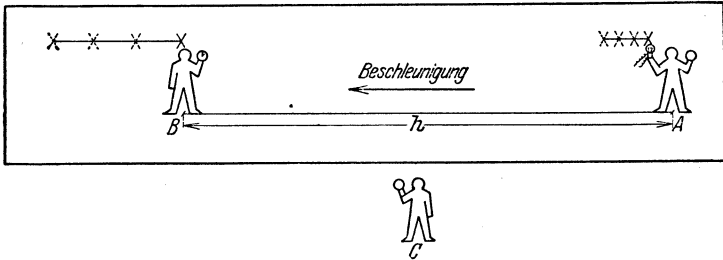


Abb. 25. Zeitmessung im Gravitationsfeld.

A, *B* und *C* vorhanden. In *A* und in *B* seien ganz gleich beschaffene Uhren; *A* sende in immer gleichen zeitlichen Abständen Lichtsignale. *C* sieht diese Lichtsignale relativ zu sich mit der Lichtgeschwindigkeit vorwärtsschreiten und urteilt, daß sie relativ zu *A* und *B* mit der Geschwindigkeit fortschreiten, die sich als Differenz bzw. Summe der Lichtgeschwindigkeit und der infolge der Beschleunigung gewonnenen Geschwindigkeit der Laboratorien *A* und *B* ergibt; denn für *C* läuft ja *A* dem Lichtsignal nach, *B* vor dem Lichtsignal weg. Diese Nachlauf- und Weglaufgeschwindigkeit ist aber größer, wenn das Signal bei *B* ankommt, als wenn es bei *A* abgeht (dann soll sie ja nach unserer Annahme Null sein); es kommen also — immer von *C* aus beurteilt — in derselben Zeitspanne weniger Lichtsignale in *B* an, als in *A* abgegangen sind. Abb. 25 wird das genauer illustrieren;

darauf sollen vier Punkte in gleichem Abstand die einzelnen Lichtsignale darstellen, wie sie abgesandt bzw. aufgenommen werden. Die letzteren liegen weiter auseinander wie die ersteren.

Wenn wir als aufeinanderfolgende Signale die Ankunft eines zwischen A und A_1 hin und her gespiegelten Lichtstrahls in A benutzen, so folgt unsere Aussage unmittelbar aus den Überlegungen von S. 100.

Für Mathematiker: Die Zeit zwischen dem Abgang zweier aufeinanderfolgender Signale sei — von C aus beurteilt — gleich τ_0 ; dann wird ihr räumlicher Abstand $b = \tau_0 v$ und die Zeit zwischen ihrem Eintreffen in B gleich $\tau_1 = \frac{b}{c-v}$. Dabei bedeutet v die Geschwindigkeit von B im Augenblick der Signalankunft und c die Lichtgeschwindigkeit für C (die nicht etwa in A und B verschiedene Werte hat!) Die Anzahl der in der Sekunde von A abgehenden Signalpunkte ist $\nu_0 = \frac{1}{\tau_0}$, die Anzahl der in der Sekunde bei B ankommenden $\nu_1 = \frac{1}{\tau_1}$. Es folgt nun $\nu_1 = \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$, und da nach S. 102 $v = \frac{gh}{c}$, ergibt sich $\nu_1 = \nu_0 \left(1 - \frac{gh}{c^2}\right)$.

Sendet auch die bei B befindliche Uhr ihre Lichtsignale aus, so ist deren Rhythmus natürlich derselbe wie bei A . Der in B sitzende Beobachter konstatiert also — in voller Übereinstimmung mit C —, daß der *Rhythmus der von A aus eintreffenden Lichtsignale langsamer geht als der Rhythmus der eigenen Uhr B*. Ganz analog wird der im Laboratorium A sitzende Beobachter feststellen, daß die von B eintreffenden Lichtsignale schneller aufeinanderfolgen als die von der eigenen Uhr ausgehenden Signale. Was wir hier schließen, ist in einer Hinsicht einfacher als die früheren Schlußfolgerungen im Gebiet der speziellen Relativitätstheorie; die Beobachtungen von A , B und C widersprechen sich hier nämlich nicht; alle drei sind sich darüber einig, daß die Lichtsignale von A aus in B langsamer, die von B aus in A schneller aufeinanderfolgen als die Signale der eigenen Uhren. An unseren bisherigen Feststellungen haftet auch gar *nichts Problematisches*; denn sie sind nur eine einfache Folgerung aus der Annahme kon-

stanter Beschleunigung von A und B gegenüber C . Auch die ganzen Schwierigkeiten der speziellen Relativitätstheorie kommen hier gar nicht in Betracht.

Nun erst tun wir den entscheidenden Schritt in die Problematik hinein: wir sagen nun nach unserem Grundprinzip aus, daß sich alle Vorgänge genau so abspielen müssen, wenn A und B nicht beschleunigt sind, aber ein gleichmäßiges Gravitationsfeld im Raum von A und B herrscht, durch welches alle Körper eine konstante Beschleunigung (g) von B nach A hin erhalten. Wir schließen also mit Hilfe unseres Grundprinzips aus bekannten optischen Vorgängen auf Eigenschaften des Gravitationsfeldes und kommen nun zu einer höchst seltsamen und paradoxen Folgerung: Wenn die beiden Laboratorien A und B im Gravitationsfeld ruhen und mit zwei völlig gleich beschaffenen Uhren ausgerüstet sind, so beobachtet B einen langsameren Rhythmus der Uhr A gegenüber seiner eigenen und A einen schnelleren Rhythmus der Uhr B gegenüber seiner eigenen; das heißt: A und B sind sich völlig einig darüber, daß *dieselbe Uhr bei B schneller geht als bei A* ; das Gravitationsfeld hat also einen bestimmten Einfluß auf den Gang von Uhren, und zwar muß dieser Einfluß ein ganz allgemeiner sein; wir würden zu Widersprüchen kommen, wenn es bei dieser Folgerung auf die Beschaffenheit der Uhren ankäme. In der Tat kann man auch für rein mechanische Uhren (Sanduhren, fallende Wassertropfen oder dgl.) zu genau denselben Ergebnissen kommen, wenn man den Vorgang von C unter Berücksichtigung der speziellen Relativitätstheorie beurteilt und dann nach dem Grundprinzip auf das Gravitationsfeld überträgt; der Gedankengang ist dann nur etwas schwieriger.

Begriff des Gravitationspotentials.

Das eben erhaltene Resultat über den Gang von Uhren im Gravitationsfeld ist so wichtig, daß wir etwas dabei verweilen und die Gelegenheit zur Einführung einiger einfacher Begriffe benutzen wollen. Zunächst wollen wir den unbestimmten Ausdruck „Gravitationsfeld“ durch den bestimmteren des „Gravitationspotentials“ ersetzen; wir führen diesen durch

folgende Betrachtung ein: Wenn wir einen materiellen Körper von A nach B heben, etwa Wasser durch eine Pumpe hinaufschaffen, so müssen wir dazu Arbeit leisten, d. h. unsere Pumpe muß durch eine Maschine angetrieben werden. Andererseits können wir das nach B gepumpte Wasser Arbeit leisten lassen, wenn wir es etwa durch Turbinen nach A zurückfallen lassen. Wer sich je mit Physik beschäftigt hat, weiß, daß es einen Energiesatz gibt, der diese Arbeitsbilanzen regelt. Für unsern Idealfall, bei dem wir von aller Reibung, Wärme usw. absehen wollen, sagt dieser Energiesatz aus, daß die ganze hineingesteckte Arbeit wiedergewonnen werden kann; dabei müssen wir unter der „Arbeit“ das Produkt aus dem Gewicht des Wassers und der Höhe von B über A verstehen. Wir drücken diese *Möglichkeit* der Wiedergewinnung so aus, daß wir sagen: „Die hineingesteckte Arbeit steckt als sogenannte *potentielle Energie* in dem emporgehobenen Wasser (oder besser in dem Gravitationsfelde) und kann wieder daraus entnommen werden.“ Für die Größe der potentiellen Energie sind die Größe der gehobenen Masse und die Höhe maßgebend; die *potentielle Energie*, welche die *Masseneinheit* zwischen zwei Stellen (in unserem Beispiel A und B) gewinnt, nennen wir das „*Gravitationspotential*“. Der Nullpunkt dieses Potentials ist willkürlich; wir legen ihn nach A und sagen dann, das Gravitationspotential sei in A Null, in jedem andern Punkt der Welt gleich der Arbeit, die geleistet werden muß, um die Masseneinheit von A nach dem betr. Punkte zu bringen. Das Gravitationspotential wird also offenbar immer größer, je weiter man B von A entfernt; es ist in 10000 m Höhe größer als am Erdboden, es ist aber z. B. an der Erde größer wie an der Sonnenoberfläche; denn es gehört sehr viel mehr Arbeit dazu, um einen Körper von der Sonnenoberfläche bis zu irgendeinem Punkt (sagen wir zum Mond) zu heben, als von der Erdoberfläche aus.

Für Mathematiker: Im nicht gleichmäßigen Gravitationsfeld tritt an Stelle des Produktes aus Gewicht und Höhe das Integral des von Punkt zu Punkt veränderlichen Gewichtes über die Wegkomponente in Richtung der Gravitationskraft.

Das Gravitationspotential hat also an jeder Stelle des Raumes

einen bestimmten Wert, wenn irgendein Punkt (etwa unser Laboratorium A) als Nullpunkt der Zählung gewählt worden ist. Unsre Aussage lautet nun: „*Dieselbe Uhr geht um so langsamer, je kleiner das Gravitationspotential an ihrem Standort ist.*“ Dieselbe Uhr muß also um so schneller gehen, je höher wir sie von der Erdoberfläche heben, und muß an der Sonnenoberfläche langsamer gehen als an der Erdoberfläche; die Unterschiede sind aus den bekannten Potentialunterschieden leicht berechenbar, aber außerordentlich klein, da im Nenner des Ausdruckes S. 112 das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit auftritt.

Spektrallinien als Uhren.

Trotz der Kleinheit dieses Effektes ist seine Beobachtung nicht ganz ausgeschlossen, wenn auch schwierig. Die Natur hat uns nämlich mit Uhren versorgt, deren Gang wir sehr genau messen können, den *Spektrallinien*. Bekanntlich sendet jeder Stoff, jede besondere Atomart Strahlung ganz charakteristischer Art aus, an der dieser Stoff mit Sicherheit auch auf den fernsten Spiralnebeln festgestellt werden kann. Und was diese Strahlung so scharf charakterisiert, ist ihre „Frequenz“, d. h. die Anzahl der Schwingungen in der Sekunde. Im groben erkennen wir diese Frequenz, diesen Rhythmus der Schwingungen, aus der Farbe des Lichtes; rotes Licht bedeutet z. B. etwa 500 Billionen Schwingungen in der Sekunde, violette Licht etwa 1000 Billionen Schwingungen in der Sekunde, ultraviolette (unsichtbares, aber durch die photographische Platte wahrnehmbares) Licht noch raschere Schwingungen. Ein Spektrum, wie es von einem Prisma entworfen wird, ist an einem Ende rot, am anderen Ende violett; die Lichtschwingungen an jeder Stelle des Spektrums haben eine bestimmte Frequenz, und zwar um so langsamer, je näher sie dem roten Ende sind, um so schneller, je näher dem violetten Ende.

Wir haben nun in den Spektren, besonders den mit feinen optischen Apparaten (Beugungsgittern) erzeugten Spektren, Mittel, um die charakteristische Anzahl der Schwingungen mit der größten Genauigkeit, welche die Physik kennt, zu

messen. Wir brauchen dazu nur die Lage zwischen dem roten und violetten Ende genau festzustellen. Feste strahlende Körper, wie etwa weißglühendes Metall, senden Strahlung von allen möglichen Schwingungszahlen aus, leuchtende Gase aber senden Strahlung von ganz bestimmter Frequenz aus; diese Frequenz ist sehr genau meßbar und wird auch zur Identifizierung des aussendenden Stoffes benutzt. Wir nennen das Licht von einer solchen einzigen, bestimmten Frequenz eine „*Spektrallinie*“. Eine solche Spektrallinie zeigt also einen ganz bestimmten, sehr genau meßbaren Rhythmus von Schwingungen an; sie ist für uns geradezu eine *sehr genau gehende Uhr*. Messen wir die Frequenz einer Spektrallinie, so messen wir die Ganggeschwindigkeit dieser Uhr. Beobachten wir nun dieselbe Spektrallinie (etwa die bekannte gelbe Linie, die vom Natriumdampf ausgeht, oder die blaue Quecksilberlinie, welche jedermann von den Reklamebeleuchtungen unsrer Städte her kennt) an verschiedenen Stellen mit verschiedenem Gravitationspotential, so müssen wir eine Änderung wahrnehmen.

Rotverschiebung.

Wir sind etwa der Beobachter *B* auf der Erde und vergleichen unsre Spektrallinienuhr mit der gleichbeschaffenen bei *A* auf der Sonnenoberfläche; da dort das Gravitationspotential niedriger ist wie bei uns, muß uns die Uhr bei *A* langsamer erscheinen; das bedeutet, wir müssen die Spektrallinie gegenüber unsrer eigenen nach dem Rot verschoben sehen.

Die Berechnungen von Einstein zeigten schon 1907, daß dieser Effekt mit den feinen Mitteln der heutigen Physik feststellbar sein müsse; leider werden aber die Spektrallinien auch durch andere Ursachen als die Gravitation, nämlich durch Druck, Bewegung der Lichtquelle u. a., verschoben, und da wir nicht imstande sind, diese Ursachen auf der Sonne auszuschalten, bleibt die Messung etwas problematisch. In der Tat sind sich die Forscher nicht ganz darüber einig, ob die gesuchte „*Rotverschiebung*“ auf der Sonne vorhanden ist oder nicht; immerhin scheint man mehr zu der positiven Ansicht zu neigen.

Eine sehr merkwürdige Erscheinung scheint allerdings die Theorie stark zu stützen: Es gibt eine besondere Art von Sternen, die man „Liliputsterne“ oder „weiße Zwerge“ nennt, auf denen die Materie in unvorstellbarer Weise zusammengeballt sein muß; ein Kubikzentimeter der dortigen Materie wiegt einen Zentner (50 kg), während bekanntlich ein Kubikzentimeter Wasser ein Gramm wiegt; die Dichte ist dort also die 50 000fache des Wassers. Diese Sterne haben große Masse, aber kleine Durchmesser; ein Körper auf ihrer Oberfläche liegt ihrem Mittelpunkt sehr viel näher als bei einem Stern von gleicher Masse, aber normalem Durchmesser, wie etwa bei der Sonne. Das bedeutet aber, daß das *Gravitationspotential*, von welchem uns die dortigen Spektrallinien ihren Licht zusenden, *besonders niedrig* und der Effekt der Rotverschiebung besonders groß sein muß. In der Tat kann auf den Liliputsternen die Rotverschiebung beobachtet werden, und zwar zeigt sie gerade die erwartete Größe. Diese Beobachtung ist sicher eine Stütze unsrer Theorie; da aber eine so seltsame Aussage, wie die von einer überdichten Materie, die natürlich niemand in der Hand gehabt hat, und auf deren Dasein nur auf Grund von vielleicht problematischen Beobachtungen und Annahmen geschlossen wurde, den Ausgangspunkt der Überlegung bildet, darf man die Sicherheit dieser Bestätigung der Theorie nicht allzu hoch werten.

Zwei Methoden der Zeitmessung.

Es ist nicht paradox, sich vorzustellen, daß jeder Mechanismus in seinem Ablauf durch das Gravitationsfeld gestört und beeinflusst wird; darum macht es kaum Schwierigkeit, sich den verschiedenen Gang derselben Uhr bei verschiedenem Gravitationspotential und die Rotverschiebung der Spektrallinien auf den Sternen klarzumachen. Aber die Konsequenzen erschüttern doch wieder eingewurzelte Vorstellungen und zwingen uns zu einer weiteren Relativierung der Begriffe Zeit und Raum. Wir wollen uns zunächst nur die Frage stellen: „Wie sollen wir die *Zeiteinheit definieren*, wie sollen wir die *Zeit messen*?“

Offenbar gibt es zwei Möglichkeiten des Vorgehens:

1. In *A* sitze ein Diktator, der verfüge, daß „*die Zeit*“ nach seiner Uhr gemessen werden solle; da eine gleichbeschaffene Uhr in *B* schneller geht als in *A*, darf *B* eben nicht mit einer gleichbeschaffenen Uhr wie *A* messen; er bekommt eine etwas andere Uhr, die bei *A* etwas langsamer geht wie die Uhr des Diktators. Wird diese andere Uhr in *B* angebracht und an allen andern Stellen der betrachteten Welt andre Uhren — die in ganz gesetzmäßiger Weise von der Uhr des Diktators abweichen, wenn sie alle in *A* sind —, so können nach Verteilung dieser Uhren alle Beobachter behaupten, daß ihre Uhren alle synchron und gleichmäßig gehen; sie haben eine für ihr ganzes Gebiet gültige Zeitmessung definiert. Natürlich werden sie mit ihren Uhren und mit Maßstäben (über welche unten noch sehr ausführlich zu sprechen sein wird) die Naturvorgänge ausmessen und die Wirkungen des Gravitationsfeldes feststellen; sie werden z. B. die obenerwähnte *Verschiedenheit der Lichtgeschwindigkeit* in verschiedenen Punkten des Gravitationsfeldes finden.

2. Die *Zeit* werde nur durch den Gang einer *Uhr von bestimmter Beschaffenheit* definiert; die Zeiteinheit sei etwa die Schwingungsdauer der gelben Natriumlinie, und zwar an jedem Punkt des Gravitationsfeldes; dann haben wir überhaupt kein absolutes Zeitmaß mehr; die Zeiteinheit hängt selbst vom Gravitationsfeld ab. Die *Zeitmessung wird durch die Uhr erst definiert* und bleibt durchaus erhalten, wenn wir eine andere Uhr, etwa eine andere Spektrallinie, als die für die Einheit maßgebende ansehen. Denn an jeder Stelle des Gravitationsfeldes ist das Verhältnis der Gangeinheiten von zwei verschiedenen Uhren dasselbe. Geht eine Uhr (1) bei *A* doppelt so schnell wie eine Uhr (2), so geht sie auch bei *B* doppelt so schnell. Messen wir mit solchen Uhren die Welt aus, so werden die Naturgesetze einfacher; denn es ist ja z. B. die „*Frequenz*“ einer Spektrallinie überall dieselbe. Die *Lichtgeschwindigkeit* ist bei dieser Zeitmessung auch *überall dieselbe*; wir fanden oben, daß die Lichtgeschwindigkeit bei *B* kleiner ist wie bei *A*, wenn wir alles von einem Punkt (*A*, *B* oder *C*) aus beurteilen. Aber bei der jetzigen

Zeitmessung wird dafür die Zeiteinheit bei B kleiner, denn die Einheitsuhr geht ja dort schneller wie bei A . Die beiden Effekte heben sich gerade auf — wenn wir hier einmal ganz allgemein voraussetzen, daß die Längenmaßstäbe bei A und B dieselben bleiben.

Wenn A die Vorgänge bei B betrachtet, so sagt er: „Das Licht durchläuft die Meßstrecke dort schneller wie bei mir, die dortige Uhr geht aber auch schneller wie die meine, so daß sie dieselbe Anzahl Schwingungen während des Vorgangs vollführt (bzw. dieselbe Veränderung der Zeigerstellung zeigt) wie meine Uhr, wenn der Vorgang sich bei mir abspielt.“ Der mathematisch geübtere Leser kann leicht durch Vergleich der oben angegebenen Formeln feststellen, daß die beiden Effekte sich wirklich gerade kompensieren. Im übrigen ist ja dieses Messen derselben Lichtgeschwindigkeit durch zwei mit denselben Uhren ausgestattete Beobachter ein Fundament der ganzen Relativitätstheorie.

Einstein hat in seinen ersten Veröffentlichungen aus dem Jahre 1911 noch die erstgenannte Meßvorschrift für die bessere gehalten; für die ausgebildete allgemeine Relativitätstheorie kam nur noch die zweite in Betracht. Dies wird klar, wenn wir nun auch die *Raummessung* betrachten und dabei mit dem schwierigsten Problem zu tun bekommen, das durch die Grundhypothese von Einstein aufgeworfen wird, und das in Einsteins ersten Arbeiten noch nicht ans Licht gekommen war.

Dreizehntes Kapitel.

Geometrie und Gravitationsfeld.

Raummessung im rotierenden Laboratorium.

Unser einfaches Beispiel des gleichförmigen Gravitationsfeldes führt noch nicht notwendig zu Schwierigkeiten bei der Raummessung, wenigstens nicht, solange wir uns auf so einfache Betrachtungen wie bisher beschränken. Dagegen finden wir sogleich ein höchst paradoxes Ergebnis, wenn wir unser

früheres Beispiel des *gleichförmig rotierenden* Systemes betrachten. Stellen wir uns wieder in die Mitte unseres Teufelsrades, das uns ja auch die rotierende Erde vorstellen kann! Wir können jetzt dieses Rad und die Vorgänge auf ihm, sowie in der umgebenden Welt ausmessen und auf Grund solcher Messungen zu Naturgesetzen gelangen.

Zur Zeitmessung brauchen wir Uhren, etwa Spektrallinien oder darauf geeichte periodische Mechanismen, zur *Raummessung* müssen wir uns *starrer, gerader Stäbe* bedienen, wobei wir eine Einheit ein für allemal willkürlich festsetzen; wir stellen die Länge einer Strecke dadurch fest, daß wir unsern Einheitsmaßstab so oft hintereinander an sie anlegen, bis wir sie ganz durchmessen haben; die Anzahl der aneinanderliegenden Einheitsmaßstäbe gibt uns die Länge der Strecke, so wie die Anzahl der Schwingungen unsrer Uhr die Zeitdauer angibt. Hier ist nur noch der Begriff der *Geradlinigkeit* genauer zu fassen; wie wollen wir kontrollieren, ob unser Maßstab wirklich geradlinig ist? Dazu bieten sich uns die *Lichtstrahlen*, die ja zwischen zwei Punkten, hier Anfangs- und Endpunkt unseres Maßstabs, geradlinig laufen; diesen optischen Grundsatz haben wir bei all unsern Gedankenexperimenten benutzt. Bohren wir nun ein ganz dünnes Loch durch unsern Maßstab und sehen wir vom Endpunkt des Loches aus eine am Anfangspunkt aufgestellte Lichtquelle, so ist der Maßstab geradlinig. Nun können wir solche Maßstäbe aneinanderlegen, wir können sie zu Figuren, z. B. Dreiecken, zusammensetzen, wir können zum Kurvenausmessen krumme Maßstäbe, die nach unsern geraden geeicht sind, konstruieren. All das geht ja nach den ganz bestimmten Gesetzen der *Geometrie*, einer höchst exakten und schon im Altertum von Euklid (300 v. Chr.) zu einem wundervoll konsequenten System ausgebauten Wissenschaft.

Wir können nun zur Ausmessung unsres Rades zwei verschiedene Methoden anwenden:

1. Wir legen unsre Meßinstrumente so hin, daß sie *an der Bewegung des Rades nicht teilnehmen*, messen etwa die Entfernungen an Pfosten, die am Umfang des Rades stehen, ohne sich mit zu drehen, bringen auch unsre Uhren an den

Pfosten an. Dann ergibt sich keine Schwierigkeit; alle Messungen sind leicht ausführbar und stimmen miteinander überein; all unsre Naturgesetze sind auf diese Weise gewonnen und beschrieben. Wir können z. B. auch die Entfernung vom Mittelpunkt zu den Pfosten hin (Radius) und den Umfang des Kreises, der die Pfosten verbindet, messen, und finden mit Befriedigung, daß der Umfang sich zum Radius verhält wie 6,2832 zu 1, daß hier das Doppelte der berühmten Zahl $\pi = 3,1416$ auftritt, die schon dem Altertum bekannt und eine Quelle von Problemen war. Übrigens war es unnötig, Umfang *und* Radius zu messen; denn daß ihr Verhältnis gerade 2π ist, wußten wir ja schon aus der ganz exakten und unwiderleglichen Geometrie.

2. Wir stellen nun unsre Instrumente, Uhren und Maßstäbe so auf, daß sie *am Rand befestigt sind und sich mit dem Rade drehen*. Wir gingen ja bei all unseren Überlegungen von der Ansicht aus, daß von jedem beliebigen bewegten System aus die Welt ausgemessen werden könnte; Einstein behauptet sogar — und wir wollen das gerade verstehen —, daß die richtig ausgesprochenen Naturgesetze für alle Systeme gleich lauten. Wir müssen also auch durch Messungen mit den am Rad befestigten Maßstäben und Uhren Beziehungen erhalten, die in keiner Weise gegenüber den an den Pfosten gewonnenen zurückstehen; ja, es soll schließlich das Endergebnis dasselbe sein. Bei Messung des Radius ist alles in schönster Ordnung; denn Maßstäbe, die senkrecht zur Bewegungsrichtung stehen, haben nach der speziellen Relativitätstheorie dieselbe Länge wie die gleichen ruhenden Maßstäbe. Aber bei Messung des Umfangs liegen die Maßstäbe *in der Bewegungsrichtung*; sie müssen also nach der speziellen Relativitätstheorie verkürzt erscheinen, und wir müssen also mehr Einheitsmaßstäbe wie früher aneinanderlegen, bis wir den ganzen Umfang gemessen haben. *Bei dieser Messung finden wir also, daß der Umfang des Kreises nicht das 2π -fache des Radius ist, sondern größer*. Dies widerspricht aber der höchst exakten und unerschütterlichen Euklidischen Geometrie, ist also *absurd*. Hier scheinen unsre ganzen Überlegungen ans Ende gekommen zu sein; hier

gelangen wir zu einem Widerspruch, der unmögliche Konsequenzen unsres Gedankenganges aufzeigt und somit die Grundlage unsrer Theorie als falsch erscheinen läßt.

Euklidische Geometrie und Wirklichkeit.

Können wir angesichts dieser Absurdität, angesichts des *Widerspruches zur Euklidischen Geometrie* noch daran festhalten, daß wir von jedem beliebig bewegten System aus zu einwandfreien Beziehungen und zu allgemeinen Naturgesetzen gelangen können? Oder war es sinnlos, starre Maßstäbe, Uhren und Lichtstrahlen zur Ausmessung der Vorgänge zu verwenden? Hier stoßen wir auf die *größte Schwierigkeit*, die sich Einsteins Gedankengängen entgegengesetzt; selbst ein Einstein hätte wohl verzweifeln müssen, wenn er als Erster und Einziger auf diese Schwierigkeit gestoßen wäre. Aber zum Glück war ein Jahrhundert vorher schon einer — auch ein solcher Einziger, Gauß — bei einem andern Problem auf die analoge Schwierigkeit gestoßen, und zwanzig Jahre nach ihm waren mehrere Mathematiker — Bolyai (1832), Lobatschewski (1829) — an denselben Punkt gekommen. Und so lag über achtzig Jahre vor Einsteins Arbeiten bereits die fertige Erkenntnis vor: *Die Euklidische Geometrie ist nicht exakt und unwiderleglich; sie ist eine unter unendlich vielen möglichen, in sich gleich konsequenten und gleich exakten Geometrien*. Als Kuriosum sei erwähnt, daß Gauß diese Erkenntnis der mathematischen Öffentlichkeit etwa zwanzig Jahre verschwiegen und nur in Briefen an vertraute Freunde gelegentlich davon gesprochen hat; er glaubte nicht, daß er verstanden würde, und hätte die Erkenntnis vielleicht ins Grab mitgenommen, wenn nicht doch schließlich andere, jüngere Mathematiker selbst den Weg dahin gefunden hätten.

Ich kann wohl voraussetzen, daß alle Leser, die bis hierher gelesen haben, einen Begriff von Geometrie von der Schule her haben. Damals haben sie ein Blatt Papier auf dem Tisch liegen gehabt und darauf mit dem Lineal Striche gezogen und gelernt: „Dies ist *eine Ebene*, und die Striche in dieser Ebene sind *gerade Linien*, und aus diesen geraden Linien

bildet man Figuren, die sehr interessante Gesetze befolgen, so z. B. haben alle Dreiecke die gleiche Winkelsumme, nämlich gleich zwei rechten Winkeln usw.“ Zwar war das Papier nicht ganz glatt, und das Lineal hatte Scharten oder Krümmungen, so daß vom pedantischen Standpunkt aus alles nicht so genau stimmte; aber darüber konnte man leicht hinwegsehen. Freilich war der Strich keine „wirkliche Gerade“, das Papier keine „wirkliche Ebene“; aber durch ein Hinwegdenken dieser Unvollkommenheiten hatte man doch eine ganz klare und exakte Vorstellung von dem, was eine Ebene und eine Gerade *wirklich sind*. Und es bestand auch kein Zweifel darüber, daß die Geraden und die Ebene beliebig verlängert werden konnten „bis ins Unendliche“.

Nun wollen wir einmal die Stichhaltigkeit dieser Vorstellungen an dem Lehrsatz prüfen, der schon für Gauß den Ausgangspunkt bildete und dessen Unbeweisbarkeit schon Euklid selbst erkannt hatte: Wir greifen zwei Punkte auf unserm Papier heraus und ziehen durch jeden Punkt eine Gerade; diese beiden Geraden werden sich schneiden, entweder oberhalb oder unter-

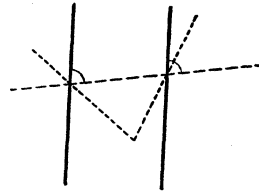


Abb. 26.
Parallele Linien.

halb der Geraden, welche unsere beiden Punkte verbindet (gestrichelte Linien der Abb. 26). Ziehen wir aber die beiden Geraden so (ausgezogene Linien), daß sie mit der Verbindungsgeraden denselben Winkel einschließen, so kommt ein Schnittpunkt auf unserem Papier nicht zustande, weder oben noch unten, und wir sehen, daß ein solcher Schnittpunkt auch nicht zustande käme, wenn wir unser Papier beliebig vergrößern würden. Wir nennen diese beiden Geraden „*Parallele*“ und sagen, daß sie sich *nicht schneiden*; wir sagen auch manchmal, „sie schneiden sich im Unendlichen“; darunter denken wir uns aber auch nichts anderes.

Nun verlängern wir unser Papier wirklich; wir überziehen die *ganze Erde* damit und ziehen unsere beiden Parallelen senkrecht zum Äquator; bei ihrer Verlängerung folgen wir also den Längengraden und finden einen *Schnittpunkt am*

Pol. Der Leser wird hier sofort Halt rufen und sagen, daß die Erde bekanntlich eine Kugel sei und daß kein Mensch je behauptet habe, daß zwei Längengrade sich nicht schnitten, obwohl sie bei einem kleinen Stück ihres Beginnes am Äquator parallelen Linien zum Verwecheln ähnlich sähen.

Also schließen wir weiter, daß die Zeichnungen, von denen wir ausgegangen waren, auch nicht wirklich, sondern nur näherungsweise das darstellten, was wir unter einer Ebene und unter einer Geraden verstehen wollen. Denn daß unser Papier eben blieb, dafür garantierte uns nur der Zeichentisch, und dessen ebene Gestalt wird nur durch Verwendung der Wasserwaage garantiert; unser Tisch steht also überall senkrecht zur Richtung der Schwerkraft; er ist also ein Teil der Kugeloberfläche der Erde und keineswegs eben. Nur sind freilich die Abweichungen so gering, daß wir praktisch davon absehen können; bei unseren theoretischen Betrachtungen müssen wir es aber mit all diesen Umständen sehr genau nehmen.

Wie sollen wir uns also die „Ebene“ und die „Gerade“ realisieren? Es bleibt uns der Lichtstrahl, und wie er uns vorhin dazu diente, die Geradheit unsres Maßstabs zu verbürgen, so kann er uns auch zur Geradheit unsres Lineals verhelfen. Ja, wir können den Lichtstrahl selbst zum Messen verwenden; wir können uns mit Hilfe von Lichtstrahlen eine Ebene verschaffen, die keineswegs bei Erstreckung über größere Entfernungen zu einem Teil der Kugeloberfläche wird. Gauß selbst hat eine solche *Ebene mit Hilfe von Lichtstrahlen* hergestellt, indem er Lichtsignale zwischen drei erhöhten Punkten (Brocken, Hoher Hagen, Inselberg) hin- und hergehen ließ. Er konnte dann ja nicht gerade parallele, sich nicht schneidende Gerade realisieren, wohl aber ein Dreieck, welches alle Eigenschaften der Dreiecke, wie sie aus der Euklidischen Geometrie folgen, haben mußte. Man beachte wohl, was man aus der — natürlich sehr übertrieben gezeichneten — Abb. 27 erkennt; die Verbindungslinien zwischen den Fußpunkten der drei Türme auf der Erde sind keine Geraden, sondern Kreisbogen auf der Kugeloberfläche der Erde; die durch Lichtstrahlen realisierten Verbindungslinien

zwischen den Turmspitzen sind Gerade. Wir werden bei den Längenverhältnissen, den Winkeln usw., die wir auf der Erde messen, keineswegs die Lehrsätze der Euklidischen Geometrie über Dreiecke usw. verwenden können; denn diese gelten für Gerade, nicht für Kreisbogen. Wohl aber müssen diese Lehrsätze für das Lichtstrahlendreieck gelten — *so wahr die Lichtstrahlen gerade Linien sind.*

Aber wir haben ja oben gesehen, daß die Lichtstrahlen im Gravitationsfeld nach unsrer Theorie keine geraden Linien sein können und daß die Erfahrung gerade in diesem Punkte die Theorie wunderschön zu bestätigen scheint. Wie sollen wir nun in der Welt eine „Ebene“, eine „Gerade“, kurz, ein Gerüst finden, in dem die Euklidische Geometrie sicher gilt und mit dessen Hilfe wir die Naturvorgänge ausmessen können? Die Euklidische Geometrie bleibt natürlich ein sinnvolles, in sich geschlossenes Gedankenspiel; wir können ja einen Raum für die Euklidische

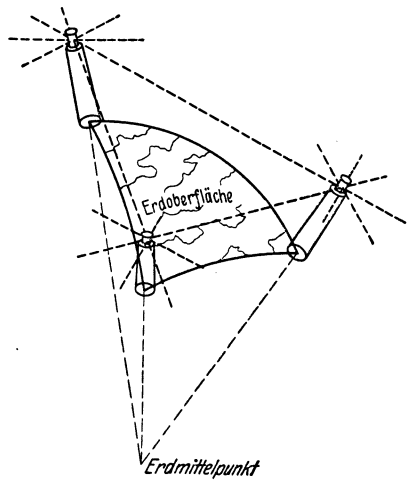


Abb. 27. Gaußscher Versuch; Kreisbogen- und Lichtstrahlendreieck.

Geometrie geradezu dadurch definieren, daß in ihm die parallelen Linien sich nicht schneiden; aber wie sollen wir die Naturvorgänge auf einen solchen Raum beziehen, wenn weder Maßstäbe noch Lichtstrahlen — bei vierdimensionaler Betrachtung können wir hinzusetzen: noch Uhren — Realitäten sind, auf welche sich die Euklidische Geometrie anwenden läßt?

Die beiden Wege der Naturbeschreibung.

Es gibt grundsätzlich *zwei Wege*, um Naturvorgänge quantitativ zu erfassen:

1. Weg: Wir halten an der *Euklidischen Geometrie* fest und finden ein Mittel, um Längen, Gerade usw. zu realisieren, etwa dadurch, daß wir die Gesetze der Lichtausbreitung studieren und dann weiter mit Lichtstrahlen, starren Stäben (und Uhren) messen, aber die Abweichung unsrer Maßstäbe von ihrer idealen Länge sowie die Abweichung der Lichtstrahlen von der idealen Geradheit, die zur Anwendung der Euklidischen Geometrie nötig ist, ständig im Auge haben und aus unseren Messungen herauskorrigieren. Dieser Weg ist logisch und möglich, aber so schwierig und unübersichtlich, daß an ein Vorwärtskommen kaum zu denken ist. Man versuche nur sich vorzustellen, durch welche Mittel man starre Maßstäbe und Lichtstrahlen ersetzen könnte.

2. Weg: Wir halten daran fest, daß das *Gesetz der Lichtausbreitung* die bekannte einfache Form hat, die wir im Euklidischen Raum als geradlinige Ausbreitung kennen, und daß ebenso das einfache Bewegungsgesetz des sich selbst überlassenen materiellen Körpers gilt. Wir geben diesen Gesetzen eine allgemeinere Fassung, die nicht nur für Euklidische Geometrie geeignet ist. Wir messen weiter mit Lichtstrahlen und starren Maßstäben (und Uhren) und *entnehmen dem angenommenen Gesetz der Lichtausbreitung erst die geometrischen Lehrsätze.*

Nichteuklidische Geometrie.

Das muß für den nicht mathematisch geschulten Leser allzu mystisch klingen. Tatsächlich haben aber die Mathematiker des vorigen Jahrhunderts, insbesondere Riemann, eine Geometrie ausgebaut, die sich von der Aussage über den Schnitt paralleler Linien, dem sog. „Parallelenaxiom“, ganz unabhängig gemacht hat und die man daher „*Nichteuklidische Geometrie*“ nennt. Diese Geometrie ist so allgemein, daß sie z. B. in *einem* Lehrsatz den Verlauf paralleler Linien in der Euklidischen Ebene und den Verlauf der Meridianlinien (Längengrade) auf der Erde umfaßt. Man kann den Sinn dieser allgemeinen Geometrie sich am besten deutlich machen, wenn man sie als Zusammenfassung der auf verschiedenen Flächen geltenden Gesetze in eines auffaßt.

Auch der mathematisch ungeschulte Leser kann sich wohl in folgenden Gedankengang hineinfinden: Wir vergleichen einmal nur die geometrischen Beziehungen auf den beiden Flächen, die durch das Fußpunktdreieck und das Lichtstrahlendreieck bei dem Gaußschen Versuch gegeben sind. Wir nennen, solange wir euklidisch denken, die erstere eine Kugelfläche, die letztere eine Ebene. Wir stellen fest, daß die geometrischen Beziehungen in den beiden Flächen ganz verschieden sind, daß z. B. die Winkelsumme in dem Lichtstrahlendreieck zwei Rechte beträgt, in dem Kugelflächendreieck größer ist. Letzteres können wir leicht einsehen, wenn wir uns das Experiment so vergrößert denken, daß zwei Eckpunkte auf dem Äquator in der gegenseitigen Entfernung von einem Quadranten liegen, der dritte am Pol; dann stehen alle drei Seiten des Dreiecks aufeinander senkrecht, die Winkelsumme beträgt also drei Rechte.

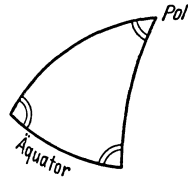


Abb. 28. Winkelsumme im Kreisbogendreieck.

Die Anschauung, daß die Lichtstrahlen eine Ebene definieren, daß für diese die Euklidische Geometrie gilt und daß wir die Aussagen dieser Geometrie über die Kreise auf einer Kugelfläche auf unser Fußpunktdreieck anwenden müssen, das ist der Weg 1. Dieser läßt sich nicht mehr beschreiten, wenn wir nicht mehr wissen, daß die Lichtstrahlen „gerade Linien“ sind. Der Weg 2, *der Weg der Nichteuklidischen Geometrie*, ist nun der, daß man die *Geometrie*, die auf einer bestimmten Fläche herrscht, nicht durch Vergleich mit einer ebenen Fläche erhält wie bei 1, sondern *aus der Fläche selbst heraus* entwickelt. Stellen wir uns vor, daß uns das Mittel der Lichtstrahlen nicht zur Verfügung stünde, daß wir auf *einer Kugelfläche lebten* und diese nicht verlassen könnten; wir können dabei annehmen, daß wir blind seien, also keine Lichtstrahlen zur Verfügung haben, oder auch, daß die Lichtstrahlen selbst nur auf der Kugelfläche laufen können. Dann wissen wir nichts von einer „Ebene“; nichts von einer „Geraden“, aber auch nichts von einer „Kugelfläche“. Aber wir werden bald erkennen, daß es zwischen

zwei Punkten eine kürzeste Verbindungslinie gibt; diese werden wir „Gerade“ nennen. (Die Feststellung der kürzesten Verbindungslinie durch Ausmessen ist eindeutig und einwandfrei, wenn nur die verwendeten Maßstäbe klein gegen die ausgemessenen Längen sind.) Wir werden auch Zeichenblätter haben und diese verlängern, wie bei unserem Gedankenexperiment S. 123; wir werden die so überdeckte Fläche eine „Ebene“ nennen. Wir werden wie oben „Parallele“ finden; wir werden Strecken zu Figuren, z. B. Dreiecken, zusammensetzen; aber nun werden wir nicht mehr finden, daß Parallele sich nicht schneiden; wir werden die Winkelsumme im Dreieck größer als zwei Rechte und abhängig von der Dreiecksfläche finden; kurz, wir werden eine andere Geometrie haben als die Euklidische, aber eine ebenso konsequente, unangreifbare und exakte. Vielleicht kommt, wenn jahrhundertlang unter uns Wesen auf der Kugelfläche diese Geometrie bestanden hat, ein genialer Mathematiker auf die Idee, daß man auch eine andere Geometrie aufbauen kann, in welcher Parallele sich nicht schneiden und die Winkelsumme im Dreieck immer zwei Rechte beträgt; die meisten Wesen auf der Kugelfläche werden dann wohl diese Gedanken für müßige Spielerei halten.

Ganz allgemein baut sich nun die Nichteuklidische Geometrie so auf, daß sie immer als „Gerade“ oder als „geradeste Linie“ oder als „geodätische Linie“ die *kürzeste Strecke zwischen zwei Punkten* auf einer Fläche bezeichnet und die geometrischen Gesetze dann so formuliert, daß sie den Verhältnissen dieser Fläche, also etwa den dort herrschenden Schnittpunktentfernungen paralleler Linien, entsprechen.

Ich glaube, auch der mathematisch ungeschulte Leser kann einen Schritt weiter mitgehen: Woher kommen denn die Abweichungen zwischen unserm Lichtstrahlendreieck und unserm Fußpunktdreieck? Von der verschiedenen „*Krümmung*“ der beiden Flächen. Die Euklidische Ebene, die durch die Lichtstrahlen realisiert ist, ist nicht gekrümmt, die Erdoberfläche hat eine bestimmte Krümmung. Je größer die Krümmung, um so größer die Abweichungen von der Euklidischen Geometrie.

Nochmals die beiden Wege.

Ich erwarte hier wieder eine Unterbrechung durch den Leser: „Was du erzählst, ist ja trivial; niemand kann doch behaupten, daß die geodätischen Linien auf einer gekrümmten Fläche dieselben geometrischen Gesetze befolgen wie gerade Linien in der Ebene. Es ist doch nur eine Umbenennung, wenn du nun auf einmal gekrümmte Flächen ‚Ebenen‘, Kurven auf diesen Flächen, z. B. (größte) Kreise auf der Kugeloberfläche, ‚Gerade‘ nennst und dann als großartige Entdeckung konstatierst, daß sie andere Gesetze befolgen als die ebenso benannten Gebilde der Euklidischen Geometrie.“

Dies ist vollkommen richtig; der Leser will eben — wie jeder denkende Mensch, auch Einstein noch im Jahre 1911 — den Weg 1 gehen, die Euklidische Geometrie festhalten, etwa die Krümmung der Lichtstrahlen durch ihre Abweichung von der Euklidischen Geraden messen und diese Messungen zur Aufstellung eines Gesetzes für die Lichtausbreitung verwenden. Und wie schon gesagt, dieser Weg ist nicht falsch, nur ungangbar; denn wo sollen wir nur die Maße und das Kriterium der Geradlinigkeit hernehmen.

Die Nichteuklidische Geometrie zeigt den Weg 2, indem sie bei ihrer Umbenennung zu viel einfacheren Gesetzen kommt als auf dem Weg 1. Für die allgemeine Relativitätstheorie heißt nun der Weg 2 folgendermaßen:

Der Weg des Lichtes oder eines sich selbst überlassenen materiellen Körpers zwischen zwei Punkten ist stets eine „geradeste (geodätische) Linie“. Die Lichtstrahlen und frei bewegten Körper zeigen durch ihr geometrisches Verhalten erst die Gesetze der Geometrie, insbesondere die Krümmung an, welche nach den Gesetzen der Nichteuklidischen Geometrie die einzelnen Beziehungen bestimmt.

Hier ist der Begriff der Krümmung von der Fläche auf den Raum (eigentlich sogar auf die vierdimensionale „Welt“) übertragen. Dies mag dem Verständnis Schwierigkeiten bereiten. Wir nannten eine Fläche gekrümmt, wenn die nach allen Seiten der Fläche von einem Punkt ausgehenden geodätischen Linien (kürzeste Verbindungen zu benachbarten Punk-

ten) nicht die Gesetze gerader Linien in der Euklidischen Geometrie befolgen. Analog sprechen wir von einer Krümmung des Raumes, wenn die von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahlen nicht die Gesetze gerader Linien der Euklidischen Geometrie befolgen, sondern die Gesetze der geodätischen Linien auf einer gekrümmten Fläche, also die Gesetze einer bestimmten Nichteuklidischen Geometrie.

Genug der Mathematik! Sollte einem Leser das Vortragene zu hoch gewesen sein, so mag er sich folgenden Gedankengang klarmachen: Solange wir unsere Maßstäbe, Uhren und Lichtstrahlen benutzen und auf die so gemessenen Naturgrößen die geometrischen Beziehungen anwenden, die wir auf der Schule gelernt haben, solange bringen wir eine von Menschen geschaffene Gesetzmäßigkeit, wie ein Vorurteil, an die Natur heran; denn Maßstäbe und Lichtstrahlen verhalten sich nicht so wie die „Strecken“ und „Geraden“ der Geometrie. Wir müssen also möglichst alles Menschenwerk ausschalten und die *Natur durch Naturerscheinungen selbst beschreiben* und ausmessen. *Das Ausbreitungsgesetz des Lichtes* und das Bewegungsgesetz von Körpern, die sich selbst überlassen sind, *dienen uns als Grundlage; alle andern Naturgesetze beziehen wir darauf. Die Geometrie dient uns nur als Hilfsmittel zum Aufstellen dieser Beziehungen; ihre Gesetze folgen darum nicht aus einer von der Erfahrungswelt unabhängigen menschlichen Gedankenreihe, sondern aus den Gesetzen der Lichtstrahlen.* Natürlich soll das nicht heißen, daß die ganze Geometrie aus lauter umstoßbaren Erfahrungsgesetzen aufgebaut wird; nur die grundlegenden Voraussetzungen, die sog. „Axiome“, werden so gewählt, daß sie mit den Erfahrungen an Lichtstrahlen übereinstimmen; alles Einzelne folgt zwangsläufig.

Vierzehntes Kapitel.

Das Gravitationsgesetz.

Lichtstrahlen, Gravitationsfeld und Geometrie.

Wir sind nun an den Punkt der Überlegungen gelangt, wo die Unabhängigkeit der Gesetze von dem zufällig eingenommenen Standpunkt und Bewegungszustand des beobachteten Forschers deutlich wird. Damit, daß die Bindung an bestimmte geometrische Sätze für die Maßstäbe (und Uhren) fortfällt, sind wir in der Wahl unsrer Maßstäbe (und Uhren) ganz frei geworden. Wir wählen sie willkürlich, indem wir nur die Raum-Zeit-Punkte numerieren; jeder Punkt bekommt vier Nummern, entsprechend den drei Raumdimensionen und der einen Zeitdimension. Man nennt diese Nummern „*Gaußsche Koordinaten*“. Nun drücken wir das einfache Gesetz, daß das Licht zwischen zwei solchen raum-zeitlichen Punkten den kürzesten Weg wählt, in diesen Koordinaten aus; dann ergeben sich ganz bestimmte geometrische Gesetze einer im allgemeinen Nichteuklidischen Geometrie. Auf diese können wir hier natürlich nicht eingehen; denn wie soll man Mathematik ohne mathematische Formeln auseinandersetzen? Es genüge, sich klarzumachen, daß natürlich im allgemeinen von Punkt zu Punkt andere Gesetze herrschen können; denn die maßgebende „*Krümmung*“ wird ja von Punkt zu Punkt verschieden sein. Mathematischer ausgedrückt: Eine bestimmte Gleichung, welche die Ausbreitung des Lichtes ausspricht, enthält außer den willkürlich gewählten Koordinaten noch Zahlen, die von Punkt zu Punkt veränderlich sein können, also, wie man mathematisch sagt, „*Koeffizienten*, welche Funktionen der Koordinaten sind“.

Diese Funktionen bestimmen die *geometrischen Gesetze*, welche die *Lichtstrahlen* befolgen; sie ergeben nur dann Euklidische Gesetze, wenn sie Konstante, also von Raum und Zeit unabhängig sind. Sie sind also in dieser Theorie, welche die Lichtstrahlen als „*geradeste Linien*“ ansieht, für dieselbe Erscheinung verantwortlich, die in der Euklidischen Theorie die Gravitationsfelder hervorgebracht haben, nämlich

für die Krümmung der Lichtstrahlen. Diese Euklidische Theorie (unser Weg 1) sagt: „Die Lichtstrahlen laufen gerade, wenn kein *Gravitationsfeld* vorhanden ist; *Gravitationsfelder krümmen die Lichtstrahlen*; gekrümmte Lichtwege zeigen Gravitationsfelder an.“ Die Einsteinsche Theorie (unser Weg 2) sagt: „Die Lichtstrahlen laufen stets auf der geradesten Bahn; befolgen sie die Euklidische Geometrie, so ist keine Krümmung der raum-zeitlichen Welt vorhanden; die *Gesetze der Geometrie der Lichtstrahlen zeigen die Krümmungsverhältnisse der raum-zeitlichen Welt an*.

Waren nun in der alten Newtonschen Theorie die Gravitationsfelder gesetzmäßig gebunden an die Materie, so muß die Einsteinsche Theorie zu einem Gesetz führen, das die *Krümmung in Zusammenhang mit der Materie* bringt; dieses Gesetz muß an Stelle des Newtonschen treten.

Die Methode der Invarianten.

Um nun dieses Gesetz zu finden, schlägt Einstein einen sehr interessanten Weg ein, der an die oben (S. 22) geschilderte Denkweise von Maxwell gemahnt, und der sich auch dem Nichtmathematiker deutlich machen läßt: Es ist nämlich klar, daß in dem gesuchten Gesetz kein Begriff auftreten kann, der von der Art der Anschauung, von den „Koordinaten“, vom Bewegungszustand des Beschauers oder dgl. abhängt; denn das *Gesetz* soll ja ganz allgemein sein und für *alle Beobachter dasselbe*. Nun gibt es solche Größen, die diese Unabhängigkeit zeigen; wir nennen solche Größen „*Invarianten*“ und wollen uns am einfachsten Fall den Sinn einer solchen Invariante klarmachen:

Es seien nur zwei Punkte P_1 und P_2 mit ihrer Verbindungslinie gegeben (wir reden jetzt wieder friedlich von Euklidischer Schulmathematik). Zum Ausmessen haben wir einen Stab, auf dem ein senkrechter Stab in einer Hülse verschoben werden kann; beide Stäbe haben eine Teilung. Wir legen den Anfangspunkt unsres ersten Stabes, der in beliebiger Richtung liege, auf den einen Punkt, verschieben die Hülse so lange, bis der zweite Stab durch den andern Punkt geht, und können jetzt die beiden Zahlen x und y ablesen.

Legen wir dieses Meßinstrument in verschiedener Richtung an, so werden wir jedesmal andere Werte x und y finden; jeder Wert x und jeder Wert y für sich sind nicht invariant; nur beide zusammen sagen etwas über die Entfernung der beiden Punkte aus. Aber immer ist nach dem Pythagoräischen Lehrsatz die Größe $x^2 + y^2$ dieselbe, wie wir auch das Meßinstrument anlegen; sie ist eine „Invariante“. In unsern Betrachtungen über spezielle Relativitätstheorie war die Geschwindigkeit eines Körpers natürlich keine Invariante für Beobachter beliebiger gleichförmiger Geschwindigkeit, die Lichtgeschwindigkeit war aber eine Invariante; dies ist ja nur der mathematisch-gelehrte Ausdruck für die Grundtatsache, von der die Theorie ausgeht.

Mit Hilfe der sogenannten *Tensorenrechnung*, also rein formal, noch ohne Beziehung auf das Gravitationsproblem, diskutiert Einstein nun solche Invarianten gegenüber allen Gaußschen Koordinaten, d. h. diejenigen Größen,

die für jeden beliebigen Beobachter denselben Wert haben, und stellt Beziehungen (Gleichungen) auf, die einen allgemeinen, vom zufälligen Beobachtungszustand unabhängigen Sinn haben. Unter den so erhaltenen invarianten Größen sucht nun Einstein diejenige aus, welche *formal analogen Charakter* mit derjenigen Größe hat, die in der Newtonschen *Gravitationsgleichung* steht, und setzt diese Größe mit der Dichte der Materie in die gleiche Beziehung, wie Newton die seine.

Für Mathematiker: Die Größe, welche nach Newton der Materiedichte proportional ist (der Proportionalitätsfaktor ist die sog. Gravitationskonstante), ist der Überschuß des Gravitationspotentials an einer Stelle über den Mittelwert der Gravitationspotentiale der Umgebung. Aus diesem Feldgesetz folgt unmittelbar das Anziehungsgesetz mit Fernwirkung, wie es allgemein bekannt ist.

So hat Einstein aus rein formalen Betrachtungen sein Gesetz gewonnen, ganz analog wie Maxwell seinen Begriff des Verschiebungsstromes gewann. Nur daß Maxwell aus

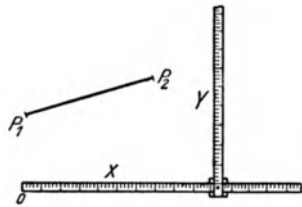


Abb. 29.

Begriff der Invarianten.

einem physikalischen Symmetriebedürfnis heraus arbeiten konnte und nicht in dem gleichen Maße auf rein formale, mathematische Betrachtungsweise angewiesen war, wie Einstein in seinem noch ganz unbetretenen und unbekanntem Gebiet.

Der physikalische Inhalt des Einsteinschen Gravitationsgesetzes.

Einstein mußte nun erst die *physikalischen Konsequenzen* ziehen, um zu sehen, ob er ein reines Gedankenspiel durchgeführt oder ein Grundgesetz der Natur gefunden hatte.

Der Erfolg war ein überzeugender. Aus den Einsteinschen Gleichungen folgt für den speziellen Fall kleiner Bewegungsgeschwindigkeiten der Materie (im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit) und kleiner Abweichung der Geometrie der Lichtstrahlen von der Euklidischen — zwei Voraussetzungen, die sicher innerhalb unsres Sonnensystems erfüllt sind — *zunächst genau dieselbe Planetenbewegung wie nach der Newtonschen Theorie*; damit ist eine große Stütze für die Anwendbarkeit des formalen Gebäudes auf die Welt der Naturerscheinungen gewonnen.

Bei genauerer Rechnung findet sich aber eine *Abweichung* von den Folgerungen der *Newtonschen Theorie*, die ganz genau eine bisher ungeklärte Erscheinung erfaßt, welcher die Newtonsche Theorie ratlos gegenübergestanden hat. Nach Newton müssen die Planeten die von Kepler entdeckten elliptischen Bahnen um die Sonne beschreiben; nach jedem Umlauf müssen sie wieder (relativ zur Sonne) denselben Punkt erreichen, an dem sie vor einem Jahr gestanden haben. Der Merkur zeigt nun zwar recht genau eine elliptische Bahn; er kehrt aber nach einem Umlauf nicht genau zu demselben Punkt zurück; sondern die Ellipse dreht sich selbst um die Sonne, und die Bahn verläuft so, wie es Abb. 30 zeigt. Man nennt den sonnennächsten Punkt der Planetenbahn das „Perihel“, den sonnenfernsten das „Aphel“. *Perihel und Aphel* liegen mit der Genauigkeit unserer astronomischen Messungen bei allen Planeten jedesmal (relativ zur Sonne) an derselben Stelle, beim Merkur aber *wandern sie auf*

Kreisen um die Sonne, und zwar legen sie auf diesen Kreisen im Jahrhundert 43 Bogensekunden zurück; das ist sehr wenig, aber nicht zu wenig für die Feinheit astronomischer Messungen. Die Newtonsche Theorie weiß keine Erklärung dieser Erscheinung zu geben; die Einsteinsche Theorie ergibt eine derartige „Perihelbewegung“ für alle Planeten; diese muß nach exakten Rechnungen für alle andern Planeten unmerklich sein, für Merkur gerade 43 Bogensekunden im Jahrhundert betragen. Die Einsteinsche Gravitationstheorie löst also über die Newtonsche hinaus das größte Rätsel des Planetensystems, das die Newtonsche Theorie übriggelassen hat. Sie hat damit ihre Anwendbarkeit und ihre Überlegenheit über alle früheren Versuche auf diesem Gebiet dargetan.

Zusammenfassung.

Ein kurzer Rückblick mag das von der allgemeinen Relativitätstheorie Erreichte deutlicher hervortreten lassen: Den Ausgangspunkt bildete die Überzeugung, daß eine Bewegung gegen den leeren Raum — eine *absolute Bewegung* —, auch wenn sie nicht geradlinig und gleichförmig ist, *keinen physikalischen Sinn* haben, also in der endgültigen Fassung der Naturgesetze nicht auftreten kann, sondern nur eine Bewegung von Materie gegen Materie. Diesem Standpunkt widersprechen von vornherein die Newtonsche *Mechanik* und die in ihr zusammengefaßten Erfahrungstatsachen. Einstein zeigte einen Weg, auf dem diese Erfahrungstatsachen durch andere Deutung doch mit dem grundsätzlichen Standpunkt vereinigt werden können, nämlich die *Hereinbeziehung der Gravitationskräfte* in die Grundlagen der Mechanik. Bisher war das Newtonsche *Gravitationsgesetz* samt der seltsamen Tatsache der Gleichheit von schwerer und träger Masse unverstanden und uneingeordnet zu den Prinzipien der Mechanik hinzugetreten. Nun haben wir ein System, welches diese

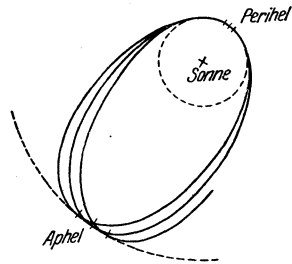


Abb. 30. Perihelbewegung.

tiefsten Naturtatsachen zusammen mit dem *Ausbreitungsgesetz des Lichtes* als *Grundlage einer neuen Mechanik* verwendet, die vor der alten Mechanik im wesentlichen folgende Vorzüge hat:

1. Sie kennt *keine absolute Bewegung*, nur Bewegung von Materie gegen Materie.

2. Es gibt *keine* besondere *Gravitationskraft*; was wir so nennen, ist eine Erscheinung der materiellen *Trägheit* (die man ja auch als eine „Kraft“wirkung ansehen kann). Was wir *Trägheitskraft* (z. B. *Fliehkraft*) und was wir *Gravitationskraft* (z. B. *Schwere*) nennen, sind nur Teile einer einzigen Erscheinung (wenn man will, einer einzigen Kraft), deren Größe von unserm willkürlich gewählten Standpunkt abhängt. Die Gleichheit der trägen und der schweren Masse ist bei dieser Anschauung selbstverständlich.

3. Man erhält hier Gesetze für die *Einwirkung der Gravitation auf andere Naturerscheinungen*, was nach der alten Anschauung vollkommen unmöglich war oder wenigstens ganz willkürlicher zusätzlicher Annahmen bedurft hätte. Nun ist es eine leicht lösbare Aufgabe, alle Naturgesetze (z. B. der Flüssigkeitsbewegung, der Optik, der Elektrizität) so zu fassen, daß der Einfluß der Gravitation hervortritt. Es gibt nur wenige Fälle, in denen dieser Einfluß meßbar ist. In den beiden nachgemessenen Fällen — Krümmung der Lichtstrahlen, Rotverschiebung der Spektrallinien — bestätigt die Erfahrung anscheinend den von der Theorie geforderten Zusammenhang.

4. Das empirische *Newtonsche Gesetz*, welches die *Gravitationswirkungen* mit der *Materie* verbindet, wird durch ein allgemeineres ersetzt, das sich — durch Berechnung der Perihelbewegung des Merkur — mit der astronomischen Wirklichkeit in besserer Übereinstimmung befindet.

Fünfzehntes Kapitel. Blick auf das Weltganze.

Unvollkommenheit der Theorie.

Von einem Gesichtspunkt, der oben (S. 106) als besonders anreizend geschildert war, haben wir nun aber nicht gesprochen, nämlich von der *Relativität der Masse*, und in dieser Hinsicht kommen wir zunächst zu einem etwas unbefriedigenden Ergebnis. Wohl ist es richtig, daß die Masse eines Körpers abnimmt, wenn man ihn weit von anderen Körpern entfernt, wohl wird die Trägheit eines Körpers durch die andern Körper *beeinflusst*; aber ein Blick auf die Verhältnisse an unserem Sternhimmel, etwa in der Milchstraße, zeigt, daß diese Beeinflussung recht klein ist und *keineswegs* dazu ausreicht, die ganze Größe der trägen Masse zu *schaffen*. Sollte dies der Fall sein, so müßten wir in der Astronomie Stellen des Weltraumes kennen, in denen alle Eigenschaften der Körper stark von ihren irdischen abweichen, etwa die Lichtgeschwindigkeit einen ganz anderen Wert bekäme. In Wirklichkeit finden wir, auch wenn wir das ganze Milchstraßensystem durchmustern, nur sehr kleine Abweichungen von irdischen Verhältnissen, eben nur jene kleinen Effekte, von denen oben die Rede war. Die Gravitationswirkungen erweisen sich als sehr klein, die Arbeit, welche nötig ist, um einen Körper aus unserm Milchstraßensystem zu entfernen, ist noch nicht groß genug, um die Materie der Milchstraße für die Trägheit der Körper verantwortlich zu machen; das „*Gravitationspotential*“ nimmt *nirgends* im Gebiet der Milchstraße genügend *große* Werte an. Wir wissen das aus den *Sternengeschwindigkeiten*, die wir ja mit genügender Näherung bestimmen können; diese gehen fast nirgends über den Betrag hinaus, der uns von der Planetenbewegung im Sonnensystem bekannt ist; der höchste beobachtete Wert liegt etwa bei 100 km in der Sekunde, d. i. $\frac{1}{3000}$ der Lichtgeschwindigkeit.

Auch hier hat Einstein einen zweiten Gesichtspunkt gefunden, der mit der besprochenen Schwierigkeit zusammen

das Problem beleuchten kann: Es ist nämlich eine längst bekannte *Schwierigkeit*, sich *auf Grund der Newtonschen Theorie ein Bild des Weltganzen zu machen*. Im Gleichgewichtszustand wird in einer Newtonschen Welt die Dichte der Sterne in sehr großer Entfernung von uns (mathematisch sagt man „im Unendlichen“) außerordentlich klein sein müssen. Die Weltkörper ziehen sich an und werden nur durch die Geschwindigkeit ihrer Bewegung am Zusammenstürzen verhindert. Bekanntlich verläßt aber ein Himmelskörper das Planetensystem, wenn diese Geschwindigkeit eine nicht allzu hoch gelegene Grenze überschreitet (die natürlich um so größer wird, je näher der Körper an der Sonne sich befindet und in der Entfernung der Erde von der Sonne ungefähr 42,5 km/s beträgt). Ebenso müssen wir annehmen, daß auch ein Körper das Milchstraßensystem verläßt, wenn seine Geschwindigkeit zu groß wird. Dann muß er aber ins Unendliche weiterfliegen, d. h. aus dem, was wir noch „unsre Welt“ nennen können, verschwinden. Und dies muß im Laufe der Zeit mit allen Körpern geschehen; denn in Wirklichkeit ist es ja nicht so, daß etwa die Erde ständig nur ihre elliptische Bahn um die Sonne beschreibe; sondern sie erfährt Störungen durch andere Planeten, auch eventuell durch andere Fixsterne; von diesen Störungen merkt man in Jahrtausenden nichts, wohl aber in Jahrmillionen. Und wir können auf Grund der alten Mechanik wohl nicht der Folgerung ausweichen, daß im Laufe der Zeit alle Himmelskörper ins Unendliche verschwinden müssen, daß *der Weltraum veröden muß*. Die Lichtstrahlen gehen ja ohnehin ins Unendliche und tragen die ganzen ungeheuren Mengen der Strahlungsenergie mit sich fort.

Gewiß, es könnte so sein; aber sehr befriedigend sind diese Vorstellungen nicht. In der allgemeinen Relativitätstheorie ist an diesen Folgerungen nichts geändert; daher können sie als *Einwand gegen die Vollständigkeit der bisherigen Gedankengänge* dienen und den Einwand, daß die Theorie noch beim Problem der Relativität der Masse versagt, bekräftigen.

Die kosmologische Erweiterung der Theorie.

Einstein schloß aus diesen Erwägungen (1917), daß zwar seine Gleichungen die Newtonschen ersetzen und verbessern, aber *in beiden Theorien eine Wirkung fehlen müsse*, die im Sonnensystem, ja vielleicht selbst im Milchstraßensystem unmerklich klein sei, aber für das Weltganze von Bedeutung. Stellen wir uns einmal vor, der Weltraum sei einigermaßen gleichmäßig mit Sternen oder auch mit un-geformter Materie gefüllt; dann muß nach der Newtonschen Theorie eine Zusammenballung und ein Abnehmen der Sterndichte nach außen hin (von einem zufällig entstandenen Zentrum aus) eintreten. Wenn aber das Newtonsche Gesetz nur gilt, solange die Materie im Raum eine gewisse *Mindestdichte* überschreitet, dann werden die unangenehmen Konsequenzen alle verschwinden; die Materie wird sich außer an einzelnen Stellen größerer Zusammenballung gleichförmig über den ganzen Weltraum verteilen; der Raum wird nirgends veröden, sondern überall von Materie einer gewissen Dichte angefüllt sein. Dabei muß man sich allerdings im Sinne der Newtonschen Mechanik und der Euklidischen Geometrie vorstellen, daß dieser Weltraum ins *Unendliche* geht und von einer *unendlichen* Menge Materie angefüllt ist.

Ist ein unendlicher Raum denkbar? Und unendliche Materie? Aber andererseits: *Ist ein endlicher Raum denkbar?* Was liegt dann dahinter? Diese Fragen sind aufgerollt worden, seit es denkende Menschen gibt. Einstein gab nun folgende Antwort: Die eben erwähnte Idee zur Verbesserung der Newtonschen Gesetze durch Einführung einer Mindestdichte kann auch auf die allgemeine Relativitätstheorie angewandt werden. Durch ein Zusatzglied, das sog. „*kosmologische Glied*“, werden die Gleichungen so verändert, daß sich Gleichgewicht der Materie bei genügend geringer, bestimmter Dichte ergibt. Dann verschwindet, wie in der Newtonschen Theorie, die Folgerung der Verödung des Raumes, aber hier *entfällt* auch das *Abwandern* der *Lichtstrahlen* und der *rasch bewegten Körper* ins Unendliche; denn durch die Materie wird ja der Lauf der Lichtstrahlen bestimmt. Die

Materie zwingt dem Raum eine Krümmung auf, d. h. die Lichtstrahlen laufen gekrümmt, wie die größten Kreise (Meridiane) auf einer Kugel. Der Lichtstrahl, der durch eine solche Welt wandert, wird nicht nur an den Zusammenballungen der Materie etwas abgelenkt, sondern überall in dem Maße, das durch die Gleichgewichtsdichte der Materie bestimmt ist. Sehen wir also selbst von den kleinen Ablenkungen an Sonnen u. dgl. großen Körpern ab, so laufen die Lichtstrahlen und die sich selbst überlassenen materiellen Körper nicht auf Bahnen, welche die geometrischen Eigenschaften der Euklidischen Geraden haben, sondern auf Bahnen, die in einer bestimmten Nichteuklidischen Geometrie die Geraden ersetzen, also Bahnen, die etwa den Meridianen auf einer Kugel entsprechen. Dies bedeutet aber, daß die Lichtstrahlen, die von einer Quelle nach irgendeiner Richtung aus fortschreiten, nach Durchmessung eines *endlichen*, wenn auch ungeheuer großen Weges *wieder zu ihrer Quelle zurückkehren*. Und dies besagt, *daß die Welt zwar keine Grenzen hat, aber doch endlich ist, so wie eine Kugeloberfläche*. Freilich ist eine Kugeloberfläche nur eine Veranschaulichung des Weltraumes, der ja in Wirklichkeit dreidimensional ist, nicht zweidimensional wie die Kugeloberfläche. Wenn die Relativitätstheorie von „Krümmung des Raumes“ spricht, so meint sie nichts anderes als die Tatsache des Zurückkommens (oder wenigstens Näherrückens) von Lichtstrahlen an den Quellpunkt, in *Analogie* zu den Vorgängen auf der gekrümmten Fläche. Mit der Grenzdicke in dieser Theorie hängt natürlich aufs engste die Länge des Lichtweges von der Quelle zur Quelle zurück zusammen; man nennt diese Länge den „*Weltumfang*“, spricht in *Analogie* zur Kreisfigur in der Ebene von einem „*Weltradius*“ und kann diese Größen in *Zusammenhang* bringen mit der gesamten in der Welt vorhandenen Materie.

Dies ist zunächst nur ein Gedankenspiel, das nicht durch physikalische, sondern eher durch naturphilosophische Gesichtspunkte angeregt ist; wir können zunächst ja diesen Weltradius gar nicht bestimmen, noch irgendeine Erscheinung nennen, in welcher er sich bemerkbar macht. Wir

können sagen, daß der Weltumfang sicher größer sein muß als die uns bekannten Entfernungen der Himmelskörper. Die größte bisher erschlossene Weite beträgt einige 100 Millionen Lichtjahre, d. i. die Strecke, welche das Licht mit seiner Sekundengeschwindigkeit von 300 000 km in 100 Millionen Jahren durchmißt. Man hat auch die phantastische Idee schon verfolgt, nach Himmelskörpern zu suchen, die man an zwei verschiedenen Stellen des Himmelsgewölbes sieht und die doch identisch sind. Aber etwas Überzeugendes ist dabei noch nicht herausgekommen.

Vielleicht interessieren einige *Zahlwerte*: Der amerikanische Astronom Hubble hat auf Grund seiner Forschungen über Spiralnebel die Dichte der Materie in dem unsern Fernrohren zugänglichen Raum zu $1,5 \cdot 10^{-31}$ Gramm im Kubikzentimeter geschätzt, d. h. etwas geringer als den quintillionsten Teil der Dichte des Wassers. (Das höchste Vakuum, das wir mit unseren wundervollsten Luftpumpen erzeugen können, hat immer noch eine Dichte von 10^{-12} g/cm³.) Der Weltradius ergibt sich daraus zu 90 Milliarden Lichtjahren; die Masse der ganzen Welt zu $\frac{1}{10}$ Quadrillion Sonnenmassen.

Die de Sittersche Kosmologie.

Mehr Erfolg hatte man auf einem anderen, noch phantastischer anmutenden Wege: Man muß an dem eben auseinandergesetzten Einsteinschen Gedankengang zwei Schritte unterscheiden: Erstens die Einführung einer neuen universellen „*kosmologischen Konstante*“, die man als Weltradius oder Weltmasse oder ähnlich auffassen kann, und die daraus entspringende Klarheit über die widerspruchslöse *Endlichkeit und Unbegrenztheit* der Welt. Zweitens die Vorstellung von der gleichmäßigen Verteilung der Materie und dem Gleichgewicht der Weltkörper. Zur anschaulichen Verdeutlichung wurden oben diese beiden Schritte zusammengeworfen; aber die mathematische Formulierung ist immer klüger als der Mathematiker, und darum enthält die von Einstein gefundene Formel noch mehr Möglichkeiten der physikalischen Auffassung. Die einfachste nächst der Einsteinschen ist die von de Sitter (1917), der das Problem folgendermaßen

stellt: „Wenn in einer Welt, in welcher die Einsteinschen Naturgesetze gelten, irgendwo ein Beobachter und von ihm entfernt ein materieller Körper sind, sonst nichts, was geschieht dann?“ Die Antwort lautet: „Der Beobachter wird den Körper sich mit wachsender Geschwindigkeit entfernen sehen. Zwei materielle Körper (Sterne), die genügend weit voneinander entfernt sind, so daß die Newtonschen Gravitationswirkungen vernachlässigbar klein werden, *streben mit wachsender Geschwindigkeit auseinander.*“

Vergleichen wir die beiden erwähnten Weltsysteme. Einerseits besticht die Einsteinsche Fragestellung nach dem Gleichgewichtszustand (nach einer „*statischen Welt*“) mehr, andererseits ist bei der Einsteinschen Antwort erstaunlich, daß er ein räumliches Gleichgewicht und *räumliche Endlichkeit* in einer *unbegrenzten Zeit* findet, während doch sonst in der Relativitätstheorie Raum und Zeit ganz gleichwertig als verschiedene Dimensionen der einen „Welt“ auftreten. In der Tat ist dies letztere bei de Sitters Welt der Fall; er spezialisiert nur in anderer Weise; er nimmt nämlich eine „*leere Welt*“ an, in der nur der eine zu betrachtende Körper vorhanden ist. Wer rein formal denkt, wird sich vielleicht von vornherein von der de Sitterschen Fragestellung mehr angezogen fühlen; wer nur physikalisch denkt, für den werden Raum und Zeit, wenn auch formal verbunden, doch verschiedene Dinge bleiben.

Aber die Natur richtet sich nicht nach unsern Vorstellungen, und so scheint trotz aller Seltsamkeit die de Sittersche Welt der wirklichen recht ähnlich zu sein. Sie gibt uns nämlich einen Anhaltspunkt, um die *astronomischen Beobachtungen* zu verstehen. Die neueren Forschungen zeigen unzweifelhaft, daß die *Spiralnebel* (deren die heutigen Fernrohre etwa zwei Millionen zeigen) außerhalb der Milchstraße liegen und selbst milchstraßenähnliche Gebilde sind; ihre Entfernung ist größer als die aller anderen astronomischen Objekte und beträgt für den nächsten (den bekannten Andromedanebel) etwa eine Million, für die entferntesten etwa zweihundert Millionen Lichtjahre. Diese Spiralnebel nun *bewegen sich* in der Tat *alle von uns weg*; ihre Geschwindigkeiten sind viel größer als

die anderer astronomischer Objekte, und das Erstaunlichste ist, daß diese *Geschwindigkeiten um so größer sind*, je weiter die betr. Nebel *von uns entfernt sind*, so daß man die Geschwindigkeit geradezu als Maß der Entfernung ansehen kann. Man findet schon Geschwindigkeiten bis über 10 000 km in der Sekunde, d. i. bis zu $\frac{1}{30}$ der Lichtgeschwindigkeit.

Zum Verständnis: Die Entfernung eines Nebels wird aus der Leuchtkraft gewisser veränderlicher Sterne (Cepheiden), die man in allen Spiralnebeln findet, ermittelt. Die Geschwindigkeit wird aus der Verschiebung von Spektrallinien, dem sog. „Doppler“-effekt, bestimmt. Bewegt sich ein Schwingungen (Ton oder Licht) aussendender Körper von uns weg, so treffen uns in jeder Zeiteinheit weniger Schwingungen, als dort in der Zeiteinheit abgehen; und das Umgekehrte tritt ein, wenn der Körper auf uns zuläuft (dies läßt sich durch eine Überlegung analog derjenigen von S. 112 leicht einsehen). Der Ton einer auf uns zukommenden pfeifenden Lokomotive ist höher, der einer sich entfernenden niedriger als der einer stillstehenden. Da die Spiralnebel sich entfernen, sind die zu uns kommenden Schwingungen verlangsamt; wir erhalten also eine Verschiebung nach Rot hin.

Die Geschwindigkeit der Hinwegbewegung hängt von der Entfernung in einer Weise ab, für welche die „kosmologische Konstante“ maßgebend ist; wir können also aus den Beobachtungen an Spiralnebeln diese Konstante und somit den Weltradius bestimmen; er ergibt sich zu etwa zwei Milliarden Lichtjahren, also bedeutend kleiner wie bei obiger Rechnung für die Einsteinsche Welt. Weiterhin hat Lemaitre (1927) gezeigt, daß die statische Welt keinen Bestand haben kann, daß sie, wie der Fachausdruck lautet, instabil ist. Der Weltradius kann danach — obwohl die kosmologische Konstante natürlich weiter konstant bleibt — keinen konstanten Wert haben; er *wird mit der Zeit immer größer und größer*.

Aber danach bleibt es wieder erstaunlich, wie *gering die Zeit ist*, in der das Universum sich auf seine heutige Größe ausgedehnt haben muß. Noch vor wenigen Milliarden Jahren müßten danach die Himmelskörper sich noch recht nahe gewesen sein, und so alt ist ja schon die kleine Erde. Die alte Sonne hat aber doch nach den allgemeinen Ansichten der Astronomen schon acht bis zehn Billionen Jahre gesehen.

Hier sind wir nun schon weit ins Reich des Problematischen eingedrungen; noch oft werden wohl unsere Ansichten über den Bau des Universums wechseln. Aber es ist sicherlich ein großes Verdienst der Relativitätstheorie, daß sie Anregungen und Ideen in die Astronomie getragen hat, die — neben andern aus der Astronomie selbst hervorgegangen — die staunenswerten Fortschritte dieses Gebietes im letzten Jahrzehnt zustande gebracht haben.

Noch einmal das Weltbild.

So entwirft die allgemeine Relativitätstheorie ein abgerundetes Bild der physikalischen Welt wie keine frühere Theorie; aber dieses *Weltbild* ist trotz seines Ausgangspunktes bei der Elektromagnetik (Lichtausbreitung, spezielle Relativitätstheorie) ein *rein mechanisches*. Die Gesetze einer die Gravitation umspannenden Mechanik treten als die allgemeinsten hervor; wo bleiben die Grundgesetze des *elektromagnetischen Feldes*?

Die nächstliegende Antwort wäre: Die *Materie*, die ja das Gravitationsfeld erzeugt, oder besser gesagt, notwendig zum Gravitationsfeld gehört, ist *elektromagnetischer Natur*. Und in der Tat kann man zeigen, daß aus den Einsteinschen Gravitationsgleichungen bestimmte Bedingungen für die Materie folgen, die vollkommen identisch mit den alten Maxwell'schen Gleichungen werden, wenn man annehmen kann, daß die Materie nur aus elektromagnetischen Feldern besteht.

In einer idealen Theorie sollten die beiden noch voneinander unabhängigen Felder, das *elektromagnetische* und das *Gravitationsfeld*, als *Teile eines einzigen Feldes* erscheinen und gemeinsam die Krümmung der Welt und ihre geometrische Struktur erzeugen. Um eine solche Theorie haben sich seit fünfzehn Jahren die besten Köpfe bemüht (Einstein, Hilbert, Weyl, Eddington, Kaluza); aber ein durchschlagender Erfolg ist noch nicht errungen. Heute sind sogar fast alle Versuche in dieser Richtung als gescheitert anzusehen; nur Einstein wandelt wieder allein einen neuen Pfad, von dem er neue, noch großartigere Ausblicke erhofft.

Ein großes Problem liegt ja der heutigen Physik vor, zu dem alle hier geschilderten Überlegungen keine Lösung geben, das große Problem der *Quantenstruktur* der Materie und der Strahlung. Wir wissen lange, daß die Materie und die elektrische Ladung nicht ins Unendliche teilbar sind, daß es Atome und Elektronen gibt. Wir wissen seit dreißig Jahren, daß noch eine andere Struktur, die der *Planckschen Quanten*, in der Welt der Atome und somit für den ganzen Aufbau der Materie maßgebend ist. Wir wissen im Lauf der letzten Jahrzehnte immer deutlicher, daß auch auf diesem Gebiete die Vorgänge nicht so verlaufen, wie es dem menschlichen Anschauungsvermögen entspricht, und daß wir noch manche Vorstellungen werden opfern müssen, die uns stets als selbstverständlich erschienen sind.

Die Relativitätstheorie hat uns zuerst die Augen dafür geöffnet, wie die Natur von unseren altvertrauten Vorstellungen unabhängig ist, und einen Weg gezeigt, um von Vorurteilen loszukommen. Sie hat andererseits aber die altbekannten Naturgesetze so klar zu einem System zusammengeschlossen, daß sie heute als Abschluß und Vollendung einer „*klassischen*“ Physik angesehen werden muß, die von dem großen Sturm der neuen Atom- und Quantenphysik ergänzt und stellenweise verändert, aber nicht erschüttert werden kann, die vielmehr noch vielfach den Weg in die neuen Gebiete erleuchtet. Dies ist die fundamentale Stellung der Relativitätstheorie innerhalb der Naturwissenschaft.

Sachverzeichnis.

- Ablenkung der Lichtstrahlen** 102.
Absolute Bewegung 10f., 30, 136.
Absoluttheorie 31, 35, 42.
Addition von Geschwindigkeiten 12, 33, 58f., 71, 79.
Äquivalenzprinzip 95f., 101, 111, 113.
Äther 15, 18, 22.
Akustik 3, 13, 15, 16, 25.
Ampèresches Gesetz 18.
Anschaulichkeit 3, 4, 22.
Aphel 134.
Arbeit 63, 114.
Astrophysik 67.
Atomistik 8, 13, 32f.
Atomphysik 35, 66.
Axiome 130.
 α -Teilchen 67.
- Behmloot** 33.
Beobachter 41.
Beschleunigung 9, 62, 78, 80, 85, 96, 105.
Beugung des Lichtes 69.
Beugungsgitter 115.
Bewegung des Äthers 29.
 β -Teilchen 67.
- Cepheiden** 143.
Chemie 10.
- Doppelsterne** 70.
Dopplereffekt 143.
Drehscheibe 11, 89, 90.
Dreieck 123f., 127.
- Ebene** 122f., 127.
Elektrodynamik 13, 18f., 30, 78, 144.
Elektron 25, 35, 62, 66, 73.
Elektronentheorie 24f., 28, 62.
Emissionstheorie des Lichtes 14, 69.
- Energie** 63f., 114.
Erdbeschleunigung 94.
Erhaltungssätze 63f.
- Faradaysches Gesetz** 18.
Federkraft 83f.
Feld, elektromagnetisches 16, 26, 78.
— -stärke 16, 19.
— -wirkung 17, 92.
Fernwirkung 8, 13, 17, 92.
Fizeauscher Versuch 34, 37, 41, 50, 69, 76.
Fliehkraft 87, 88, 89f., 106, 108, 136.
Flüssigkeiten 13, 84.
Flugzeug 97.
Fraunhofersche Linien 57.
Frequenz 115f., 118.
- Galileisches Relativitätsprinzip** 11, 68.
Gase 13.
Gaußsche Koordinaten 131, 133.
Geodätische Linie 128, 129.
Geometrie 120, 130.
—, Euklidische 120, 122f.
—, Nichteuclidische 126f.
Gerade 122f., 127.
Geradlinigkeit 120.
Gewicht 93, 94.
Gleichstrom 70.
Gleichzeitigkeit 46f., 50.
Gravitation 13, 78, 83, 86, 105, 136.
Gravitationsfeld 92, 109, 131, 132, 144.
— -konstante 133.
— -potential 113f., 116, 117, 133.
- Heliumkern** 68.
Hexenschaukel 89, 90.
Höhenstrahlung 67.

Induktion, elektromagnetische 14, 17, 20f.
Interferenz 69.
— -streifen 37f., 54, 56.
Invariante 110, 132.

Kanalstrahlen 58.
Kathodenstrahlen 25, 28.
Kern 35, 66.
Kinetische Energie 63, 65, 106, 114.
Klassische Physik 7, 145.
Kohärenz 38.
Komponenten 110, 133.
Kosmologie 139f.
Kosmologische Konstante 142.
Kraft 9, 78, 82, 84f.
— -linie 17.
Kreisbewegung 81, 86, 88.
Kreisel 97.
Krümmung der Lichtstrahlen 102, 136, 140.
— einer Fläche 128.
— des Raumes 129, 132, 140, 144.

Ladung, elektrische 18, 19.
Längeneinheit 75.
— -messung 54, 60.
Leerer Raum 8, 14, 80, 85, 89.
Leere Welt 142.
Licht s. Optik.
— -geschwindigkeit 15, 20, 26, 48, 65, 74f., 101, 108, 118, 133.
— -strahlendreieck 125, 128.
Liliputsterne 117.

Masse 9, 25f., 61f., 65, 73, 78, 85, 94, 106, 137.
Materie 8, 25, 132, 144.
Mathematik 2, 4, 22, 119f., 122f., 126f., 129f., 131, 132.
Maxwellsche Gleichungen 23, 26, 30, 73, 78, 144.
Mechanik 8f., 82f.
Merkur (Perihelbewegung) 134, 136.
Michelsonscher Versuch 36, 38f., 42, 50, 54, 69, 76.
Milchstraße 137f.

Naturgesetze 4, 52, 76, 77, 80, 104.
Neptun (Entdeckung) 104.
Newtonsche Mechanik 9.

Newtonsches Gravitationsgesetz 78, 95, 102, 104, 133, 138.

Optik 3, 13, 14, 20, 78, 99f.
Organismus 52.

Paradoxe 42, 50f., 58, 113.
Parallele 123, 126.
Pendel 96, 97.
Perihel 134, 136.
Planetenbewegung 134.
Potentielle Energie 106, 114.
Proton 35, 66.
Pythagoräischer Lehrsatz 44, 55, 76, 133.
 π (Zahl) 121.

Quantentheorie 7, 67, 70, 145.

Radioaktivität 25, 28, 66f.
Raum 6.
— -messung 120f.
Reibung 84.
Relativitätsprinzip 11, 30f., 36, 51, 68, 76, 79, 89, 98.
— -theorie (Wortbedeutung) 31.
Rotierende Körper 81, 90, 107, 120f.
Rotverschiebung der Spektrallinien 58, 116, 136.

Schall s. Akustik.
— -geschwindigkeit 33.
Schwere Masse 94, 135.
Schwerkraft s. Gravitation.
Schwingungen 13, 21.
Selbstinduktion 26.
Signalgeschwindigkeit 47, 52.
Sonnenfinsternis 102.
Spannung, elektrische 14.
Spektrallinien 57, 114, 143.
Spiralnebel 141.
Statische Welt 142.
Sterneschwindigkeiten 137.
Strom, elektrischer 14, 18, 19, 25.
Stützkraft 84.
Synchronismus (von Uhren) 46, 48, 60, 70, 118.

Tensorrechnung 133.
Teufelsrad 11, 89, 90.
Trägheit 26, 86f., 91, 92f., 136.
Träge Masse 94, 135.

<p>Überlichtgeschwindigkeit 56, 58, 105.</p> <p>Überschallgeschwindigkeit 56.</p> <p>Verödung des Weltraums 138.</p> <p>Verschiebungsstrom 20, 22, 133.</p> <p>Vierdimensionale Welt 74f.</p> <p>Wärmelehre 7, 13, 64.</p> <p>Wasserstoffkern 68.</p> <p>Wechselstrom 17.</p> <p>Wellen, elektrische 21.</p> <p>Wellentheorie (des Lichtes und Schalles) 3, 15, 37, 109.</p> <p>Welt, vierdimensionale 74f.</p>	<p>Weltbild 7, 72f., 144.</p> <p>—, elektromagnetisches 23, 25f.</p> <p>—, mechanisches 12f., 16, 25f.</p> <p>Weltradius 140.</p> <p>— -umfang 140.</p> <p>Wirbel 18.</p> <p>Wurfparabel 96.</p> <p>Zeit 6.</p> <p>— -dauer 45, 46, 49, 50, 109.</p> <p>— -einheit 75.</p> <p>— -messung 44, 46, 60, 71, 74, 109f., 117.</p> <p>Zentrifugalkraft s. Fliehkraft.</p> <p>Zwerge, weiße 117.</p>
--	--