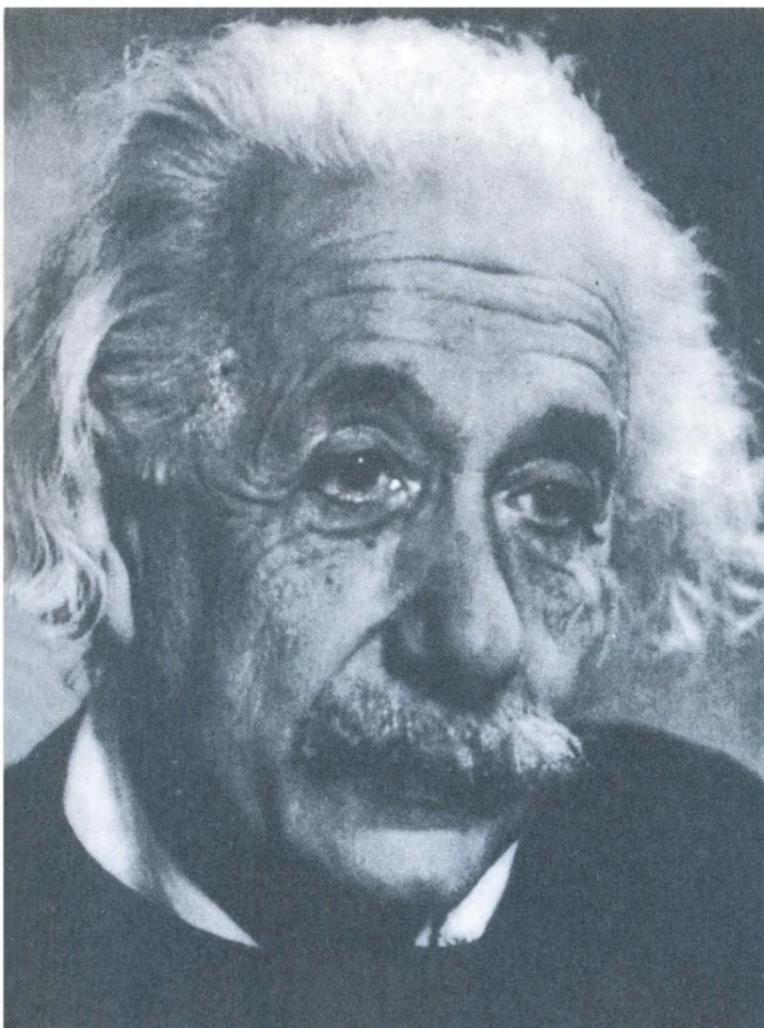


Kleine
Naturwissenschaftliche
Bibliothek


LEIPZIG



$$E=m \cdot c^2$$

LANDAU/RUMER

**Was ist die
Relativitätstheorie?**

Was ist die Relativitätstheorie?

L. D. LANDAU † UND JU. B. RUMER

13. Auflage

Mit 17 Abbildungen



BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft
Leipzig 1989

Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek · Band 1

ISSN 0232-346 X

Autoren:

Professor Lew Dawidowitsch Landau †, Professor Juri Borisowitsch Rumer

Titel der Originalausgabe:

Что такое теория относительности?

2. Auflage. Verlag „Sowjetskaja Rossija“, Moskau 1963

Deutsche Übersetzung: Prof. Dr. Gerd Lassner, Leipzig

Landau, Lev Davidovič :

Was ist die Relativitätstheorie? / L.D. Landau u.

Ju.B. Rumer. Dt. Übers. G. Lassner. – 13. Aufl. –

Leipzig : BSB Teubner, 1989. – 58 S. : 17 Abb.

(Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek ; 1)

NE: Rumer, Jurij Borisovič.; GT

EST: Čto takoe teorija otnositel'nosti? <dt.>

© Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig,
1962 und 1965

© BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1981
13. Auflage

VLN 294-375/92/89 · LSV 1119

Lektor: Dipl.-Met. Christine Dietrich

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig,

Betrieb der ausgezeichneten Qualitätsarbeit, III/18/96

Bestell-Nr. 666 043 4

00360

Vorwort

Seit Albert Einstein die Relativitätstheorie geschaffen hat, sind mehr als 60 Jahre vergangen. Im Laufe der Zeit hat sich diese Theorie, die damals vielen nur als ein paradoxes Spiel des Verstandes erschien, zu einem Eckpfeiler der Physik entwickelt. Die moderne Physik wäre ohne die Relativitätstheorie fast ebenso undenkbar wie ohne die Vorstellung über Atome und Moleküle. Es ist schwierig, alle physikalischen Erscheinungen auch nur aufzuzählen, die ohne die Relativitätstheorie nicht erklärt werden könnten. Auf dieser Theorie beruhen die Konstruktion solch komplizierter Geräte wie der Beschleuniger für Elementarteilchen, die Berechnung von Kernreaktionen usw.

Leider aber ist die Relativitätstheorie außerhalb eines recht engen Kreises von Spezialisten sehr wenig bekannt. Sie gehört allerdings auch zu den „schwierigsten Theorien“, und man kann vom Nichtphysiker den Umgang mit ihrem komplizierten mathematischen Apparat nicht verlangen.

Dessenungeachtet glauben wir aber, daß man die Grundbegriffe und Ideen dieser Theorien in einer solchen Form darstellen kann, daß sie einem genügend großen Kreis von Lesern verständlich werden.

Wir hoffen, daß der Leser nach der Lektüre unseres Buches nicht zu der Meinung kommt, die Relativitätstheorie behaupte, „alles in der Welt sei relativ“. Im Gegenteil, er wird sehen, daß die Relativitätstheorie, wie auch jede andere echte physikalische Theorie, eine Lehre über die objektive Wirklichkeit ist, die nicht von den Wünschen und dem Geschmack eines einzelnen abhängt. Indem man sich von den alten Vorstellungen über Raum, Zeit und Masse befreit, wird man einen tiefen Einblick in den wirklichen Aufbau der Welt gewinnen.

Die Verfasser

„. . . es bleibt unzweifelhaft, daß die Mechanik eine Abbildung von langsamen realen Bewegungen war, aber die neue Physik ist eine Abbildung von gigantisch schnellen realen Bewegungen . . .“

„Die Veränderlichkeit der menschlichen Vorstellungen über Raum und Zeit widerlegt ebensowenig die objektive Realität des einen und des anderen, wie die Veränderlichkeit der wissenschaftlichen Erkenntnisse über Struktur und Formen der Bewegung der Materie die objektive Realität der äußeren Welt widerlegt.“

W. I. Lenin

Inhalt

Relativität, an die man sich gewöhnt hat

- Hat jede Behauptung einen Sinn? 7
- Rechts und links 7
- Ist jetzt Tag oder Nacht? 7
- Wer ist größer? 8
- Das Relative erscheint absolut 9
- Das Absolute erwies sich als relativ 9
- Der „gesunde Menschenverstand“ versucht zu protestieren 10

Der Raum ist relativ

- Ein und derselbe Ort oder nicht? 12
- Wie bewegt sich der Körper wirklich? 13
- Sind alle Beobachtungspunkte gleichwertig? 14
- Die Ruhe wird gefunden 15
- Ein ruhendes Laboratorium 15
- Bewegt sich der Zug? 15
- Mit der Ruhe ist es endgültig vorbei 17
- Das Trägheitsgesetz 18
- Auch die Geschwindigkeit ist relativ 19

Die Tragödie des Lichtes

- Das Licht breitet sich nicht augenblicklich aus 20
- Kann man die Geschwindigkeit des Lichtes ändern? 20
- Licht und Schall 21
- Das Relativitätsprinzip der Bewegung scheint anfechtbar 22
- Weltäther 23
- Es entsteht eine schwierige Lage 24
- Das Experiment muß entscheiden 25
- Das Relativitätsprinzip triumphiert! 26
- Aus dem Regen in die Traufe 27

Die Zeit ist relativ

- Besteht nun wirklich ein Widerspruch? 29
- Bitte im Zug Platz nehmen! 30
- Der „gesunde Menschenverstand“ ist blamiert 31
- Die Zeit teilt das Geschick des Raumes 32
- Die Wissenschaft triumphiert 34
- Die Geschwindigkeit hat eine Grenze 35
- Früher oder später 37

Uhren und Lineale zeigen Launen

Wir nehmen noch einmal im Zug Platz 38

Die Uhren gehen systematisch nach 40

Die Zeitmaschine 42

Reise zu den Sternen 44

Die Gegenstände verkürzen sich 46

Geschwindigkeit mit Launen 49

Arbeit verändert die Masse

Masse 52

Die Masse wächst 52

Wieviel kostet ein Gramm Licht? 54

Schlußbetrachtung

Relativität, an die man sich gewöhnt hat

Hat jede Behauptung einen Sinn?

Offensichtlich nicht. Selbst wenn man ganz sinnvolle Wörter unter völliger Beachtung der grammatischen Regeln verbindet, kann sich der größte Unsinn ergeben. Zum Beispiel hat die Behauptung „Dieses Wasser ist dreieckig“ wohl keinerlei Sinn. Leider ist aber nicht jede Sinnlosigkeit so offensichtlich, und oft erweist sich eine Behauptung, die auf den ersten Blick ganz vernünftig aussieht, bei genauerer Analyse als völlig sinnlos.

Rechts und links

Auf welcher Seite des Weges – auf der rechten oder auf der linken – liegt das Haus? Diese Frage kann man nicht ohne weiteres beantworten.

Geht man etwa von der Brücke zum Wald, dann steht das Haus auf der linken Seite; wenn man aber umgekehrt vom Wald zur Brücke geht, so steht es rechts.

Man kann also nicht von der linken oder rechten Seite des Weges sprechen, ohne die Richtung anzugeben, auf die man links und rechts bezieht.

Andererseits kann man ohne weiteres vom rechten Flußufer sprechen, weil durch die Strömung eine Richtung des Flusses festgelegt wird. Analog ist die Behauptung, das Auto fahre auf der rechten Seite, nur berechtigt, weil durch die Bewegung des Autos eine Richtung der Straße ausgezeichnet wird.

So sind also Begriffe „rechts“ und „links“ relativ. Sie haben nur einen Sinn, wenn man die Richtung angibt, auf die man sie bezieht.

Ist jetzt Tag oder Nacht?

Die Antwort auf diese Frage hängt von dem Ort ab, an dem sie gestellt wird. Wenn in Moskau Tag ist, so ist in Wladiwostok Nacht. Ein Widerspruch besteht hier nicht. Tag und Nacht sind

wieder relative Begriffe, und man kann die gestellte Frage nicht beantworten, ohne sie auf eine bestimmte Stelle der Erde zu beziehen.

Wer ist größer?



Auf dem oberen Bild ist der Hirt größer als die Kuh, auf dem unteren ist es umgekehrt. Auch hier gibt es keinerlei Widerspruch. Die Bilder wurden von verschiedenen Punkten aus be-



obachtet. Im ersten Fall war die Kuh weiter entfernt, im zweiten der Hirt. Für ein Bild sind also nicht die wahren Größen der Gegenstände wesentlich, sondern wichtig ist der Blickwinkel, unter dem man sie sieht, und diese Winkelmaße sind offensichtlich relativ. Spricht man vom Winkelmaß bestimmter Gegen-

stände, so muß man den Punkt angeben, von dem aus der Beobachter blickt. Sagt man z. B. „Dieser Turm wird unter einem Blickwinkel von 45° gesehen“, so ist über die Größe des Turmes gar nichts ausgesagt. Dagegen folgt aus der Behauptung „Aus einer Entfernung von 15 m sieht man den Turm unter einem Blickwinkel von 45° “, daß der Turm 15 m hoch ist, wenn man voraussetzt, daß die Augen des Beobachters mit dem Fuß des Turmes in gleicher Höhe liegen.

Das Relative erscheint absolut

Wenn man den Beobachtungspunkt nur wenig verschiebt, so ändert sich das Winkelmaß auch nur wenig. Deshalb wird das Winkelmaß oft in der Astronomie verwendet. Die in Sternenkarten eingetragene Winkelentfernung zwischen zwei Sternen ist gleich dem Winkel, unter dem man die Entfernung der beiden Sterne voneinander von der Erde aus sieht.

Wie man sich auch auf der Erde bewegen mag, von jedem Punkt aus sieht man die Sterne in gleichem Abstand voneinander. Das liegt daran, daß die Sterne so unvorstellbar weit von uns entfernt sind, daß man Entfernungen auf der Erde mit gutem Gewissen vernachlässigen kann. In diesem Fall kann die Winkelentfernung als absolutes Maß für die Entfernung gelten. Von verschiedenen Stellen der Umlaufbahn der Erde um die Sonne aus betrachtet, werden die Veränderungen der Winkelmaße schon bemerkbar, wenn sie auch noch unbedeutend sind. Wenn man allerdings den Beobachtungspunkt auf irgendeinen anderen Stern verlegen könnte, z. B. auf den Sirius, dann würden sich die Winkelmaße verändern. Sterne, die an unserem Sternenhimmel weit voneinander entfernt erscheinen, können dann, von dort aus gesehen, näher beieinander liegen und umgekehrt.

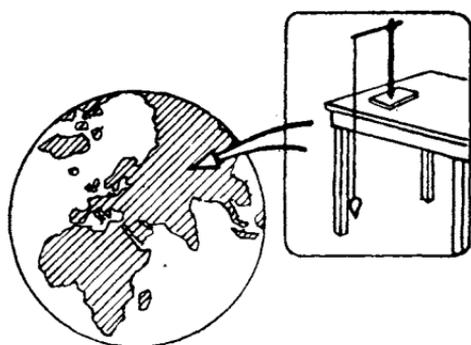
Das Absolute erwies sich als relativ

Man spricht häufig von „oben“ und „unten“. Sind dies relative oder absolute Begriffe?

Diese Frage beantworteten die Menschen zu verschiedenen Zeiten verschieden. Als sie noch nichts von der Kugelgestalt der

Erde wußten, stellten sie sich die Erde eben vor wie eine Scheibe, und die Vertikale zählte zu den absoluten Begriffen. Man war der Meinung, daß die senkrechte Richtung in allen Punkten der Erdoberfläche ein und dieselbe sei und daß es völlig natürlich wäre, von „oben“ und „unten“ zu sprechen. Als dann die Kugelgestalt der Erde bekannt wurde, geriet der Begriff der „Vertikalen“ im Bewußtsein der Menschen ins Wanken.

Denn in der Tat hängt bei der Kugelgestalt der Erde die Richtung der Vertikalen von dem Punkt der Erdoberfläche ab, in dem man sie errichtet. An verschiedenen Punkten der Erdober-



fläche ist diese Richtung unterschiedlich. Da also die Begriffe „oben“ und „unten“ ohne Ortsangabe ihren Sinn verlieren, wurden diese früher für den Menschen absoluten Begriffe zu relativen. Es gibt keine für das Weltall einheitliche Vertikale. Für jede beliebige Richtung im Raum kann man einen Punkt der Erdoberfläche angeben, in dem diese die Vertikale bildet.

Der „gesunde Menschenverstand“ versucht zu protestieren

All das bisher Gesagte erscheint uns heute selbstverständlich und ruft keinerlei Zweifel hervor. Aber die Geschichte zeigt, daß es der Menschheit nicht leicht fiel, den relativen Charakter der Begriffe „oben“ und „unten“ zu verstehen. Die Menschen neigen nämlich dazu, allen Begriffen, deren Relativität aus der täglichen Erfahrung nicht unmittelbar offenbar wird (wie im Falle „rechts“ und „links“), eine absolute Bedeutung beizumessen; erinnern wir uns nur an den Einwand gegen die Kugelgestalt

der Erde im Mittelalter, der heute ein Lächeln hervorruft: „Wie können denn die Leute mit dem Kopf nach unten gehen?“

Zu solch falschen Argumenten kam es deshalb, weil man nicht verstand, daß wegen der Kugelgestalt der Erde der Begriff der Vertikalen relativ wird.

Wenn man den relativen Charakter der Vertikalen nicht beachten und zum Beispiel die Vertikale in Moskau als absolut



auffassen würde, dann liefen tatsächlich die Bewohner Neuseelands mit dem Kopf nach unten. Dabei muß man aber bedenken, daß aus der Sicht der Neuseeländer umgekehrt die Bewohner Moskaus mit dem Kopf nach unten laufen. Hier besteht keinerlei Widerspruch, weil, wie schon gesagt, die Vertikale in Wirklichkeit kein absoluter, sondern ein relativer Begriff ist.

Nun ist es aber so, daß man sich der Bedeutung des relativen Charakters der Vertikalen erst dann bewußt wird, wenn man zwei genügend weit voneinander entfernte Orte der Erdoberfläche ins Auge faßt, wie eben Moskau und Neuseeland. Betrachtet man dagegen zwei nahe beieinander liegende Punkte, etwa zwei Häuser in der gleichen Stadt, so kann man praktisch alle Senkrechten als parallel ansehen, d. h., die Vertikale bekommt bei geringem Ortsunterschied einen absoluten Sinn. Erst wenn man es mit Gebieten zu tun hat, deren Größe mit der Erdoberfläche vergleichbar ist, führt der Gebrauch einer absoluten Vertikalen zu Sinnlosigkeiten und Widersprüchen.

Die betrachteten Beispiele zeigen, daß wir viele Begriffe verwenden, die relativ sind und die erst dann einen Sinn bekommen, wenn man die Bedingungen angibt, unter denen man sie anwendet.

Der Raum ist relativ

Ein und derselbe Ort oder nicht?

Nicht selten wird davon gesprochen, daß sich zwei Ereignisse an dem gleichen Ort abgespielt haben, und wir haben uns daran gewöhnt, dieser Behauptung einen absoluten Sinn zu geben. In Wirklichkeit verhält es sich aber ebenso wie bei der Aussage, es sei fünf Uhr, ohne daß man gleichzeitig angibt, wo es fünf Uhr ist, in Moskau oder in Chikago.

Um sich das klar zu machen, sei angenommen, zwei Frauen, die sich auf einer Reise befinden, verabredeten, sich jeden Tag im gleichen Abteil des Expreßzuges Moskau-Wladiwostok zu treffen, um an ihre Männer Briefe zu schreiben. Die Männer werden aber wohl kaum der Meinung sein, daß sich ihre Frauen jeden Tag an der gleichen Stelle des Raumes treffen. Im Gegenteil haben sie allen Grund zu behaupten, daß die Treffpunkte jeweils Hunderte von Kilometern voneinander entfernt liegen, denn sie erhielten ja Briefe aus Jaroslawl und Perm, Swerdlowsk und Tjumen, Omsk und Chabarowsk.

So fanden also die zwei Ereignisse, das Schreiben der Briefe am ersten und zweiten Tag, vom Standpunkt der Frauen aus am gleichen Ort statt, vom Gesichtspunkt der Männer aus lagen jedoch Hunderte von Kilometern dazwischen.

Wer hat nun recht, die Frauen oder die Männer? Es gibt keinerlei Grund dafür, den einen den Vorrang zu geben. Hieraus erkennt man deutlich, daß die Aussage „an ein und derselben Stelle des Raumes“ nur einen relativen Sinn hat.

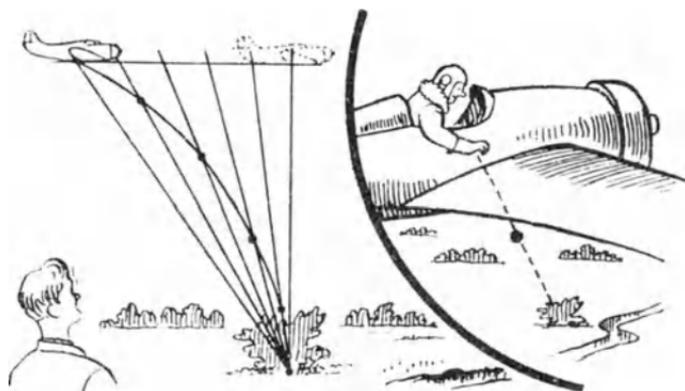
Entsprechend ist es mit der Behauptung, daß die Stellung zweier Sterne am Himmel zusammenfällt, denn diese Aussage ist nur dann vollständig, wenn man hinzufügt, daß die Beobachtung von der Erde aus geschieht. Man kann also nur dann davon sprechen, daß zwei Ereignisse an der gleichen Stelle des Raumes stattfinden, wenn man zugleich die Körper angibt, auf die sich die Festlegung des Ortes eines Ereignisses bezieht.

So ist also der Begriff der Lage im Raum relativ. Unter der Lage eines Körpers im Raum versteht man daher immer seine Lage bezüglich anderer Körper. Wenn man fordern würde, in der Antwort auf die Frage, wo sich ein Körper befindet, nichts über andere Körper zu sagen, so würde die Frage ihren Sinn verlieren.

Wie bewegt sich der Körper wirklich?

Aus dem Gesagten folgt, daß auch die Bewegung der Körper im Raum relativ ist. Wenn man davon spricht, daß sich ein Körper im Raum bewegt hat, so bedeutet das lediglich, daß er seine Lage in bezug auf andere Körper verändert hat.

Beobachtet man die Bewegung eines Körpers von zwei verschiedenen Punkten aus, die sich wiederum gegeneinander ver-



schieben, so kann die Bewegung des Körpers vollkommen verschieden aussehen.

Angenommen, aus einem Flugzeug werde ein Stein abgeworfen. Vom Flugzeug aus gesehen, fällt der Stein auf einer Geraden, von der Erde aus gesehen, beschreibt er dagegen eine Kurve, eine sogenannte Parabel.

Wie aber bewegt sich der Stein nun in Wirklichkeit? Diese Frage hat genausowenig Sinn wie die Frage, unter welchem Winkel man in Wirklichkeit den Mond sieht. Unter welchem Winkel würde man ihn von der Sonne aus sehen, oder unter welchem wird er von der Erde aus beobachtet?

Die geometrische Form einer Kurve, auf der sich ein Körper bewegt, ist ebenso relativ wie die Fotografie eines Gebäudes. So, wie man verschiedene Aufnahmen erhält, wenn man das Gebäude von vorn oder hinten fotografiert, so ergeben sich auch verschiedene Bewegungsformen eines Körpers, wenn man ihn von verschiedenen Stationen aus beobachtet.

Sind alle Beobachtungspunkte gleichwertig?

Wenn man sich bei der Beobachtung der Bewegung eines Körpers darauf beschränkt, die Form seiner Trajektorie (so heißt die Bahnkurve) zu untersuchen, so wird man einen solchen Beobachtungspunkt wählen, daß die zu erhaltende Kurve möglichst einfach wird. Ähnlich verhält sich ein guter Fotograf, der seinen Standpunkt so wählt, daß die Aufnahme schön wird und die Gegenstände in harmonischer Anordnung wiedergibt.

Nun interessiert aber beim Studium der Bewegung der Körper im Raum noch einiges mehr. Man will nicht nur die Trajektorien kennenlernen, sondern möchte auch vorhersagen können, wie sich ein Körper unter gewissen Bedingungen bewegen wird. Mit anderen Worten, man will die Gesetze kennenlernen, die die Bewegung bestimmen, die den Körper zwingen, sich gerade so und nicht anders zu bewegen.

Betrachtet man von diesem Gesichtspunkt aus die Relativität der Bewegung, so wird klar, daß nicht alle Lagen im Raum gleichwertig sind.

Wenn man zum Fotografen geht, um sich ein Paßbild anfertigen zu lassen, so wünscht man natürlich eine Aufnahme des Gesichtes und nicht des Hinterkopfes. Dieser Wunsch bestimmt auch den Punkt im Raum, von dem aus der Fotograf aufnimmt. Irgendeine andere Stellung des Fotoapparates würde nicht dem Auftrage entsprechen.

Die Ruhe wird gefunden

Die Bewegung der Körper wird durch äußere Einwirkungen beeinflusst, die man als Kräfte bezeichnet. Das Studium ihres Einflusses gestattet es, das Problem der Bewegung auf eine völlig neue Art zu behandeln.

Angenommen, man hat einen Körper zur Verfügung, auf den keine Kräfte wirken. Je nach dem Beobachtungspunkt wird sich der Körper unterschiedlich, und zwar auf mehr oder weniger seltsame Weise bewegen. Man wird nun aber zugeben, daß der Beobachtungspunkt am natürlichsten gewählt wäre, von dem aus gesehen sich der Körper in Ruhe befände.

So kann man jetzt eine völlig neue Definition der Ruhelage geben, die nicht von der Bewegung des betrachteten Körpers bezüglich anderer Körper abhängt. Sie lautet so:

Ein Körper, auf den keine äußeren Kräfte einwirken, befindet sich im Zustand der Ruhe.

Ein ruhendes Laboratorium

Wie kann nun der Zustand der Ruhe verwirklicht werden? Wann darf man sicher sein, daß auf einen Körper keine Kräfte einwirken? Dazu ist es offensichtlich notwendig, den betrachteten Körper weit von allen anderen Körpern, die ihn beeinflussen könnten, zu entfernen.

Aus solchen ruhenden Körpern kann man nun, wenigstens in Gedanken, ein ganzes Laboratorium aufbauen und jetzt über Eigenschaften von Bewegungen sprechen, die man aus diesem Laboratorium, das als ruhend anzusehen ist, beobachtet.

Wenn sich die Eigenschaften der Bewegung eines Körpers, die man in irgendeinem anderen Laboratorium beobachtet, von denjenigen unterscheiden, die man im ruhenden Laboratorium beobachtet, so kann man mit gutem Recht behaupten, daß sich das erstgenannte Laboratorium bewegt.

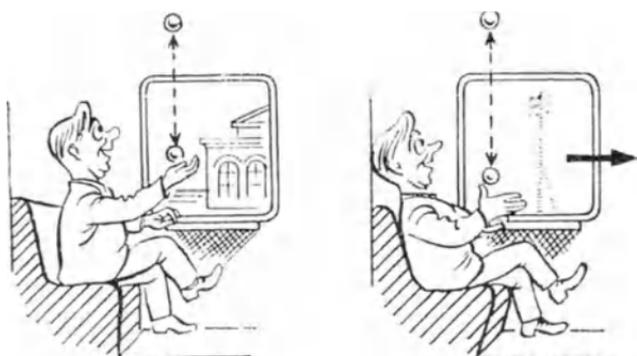
Bewegt sich der Zug?

Infolge der Feststellung, daß in einem sich bewegenden Laboratorium die Bewegung anderen Gesetzen gehorcht als in einem ruhenden, könnte es scheinen, als ob der Begriff der Bewegung

seinen relativen Charakter verloren hätte. Wenn im weiteren über Bewegung gesprochen wird, so soll darunter nur die Bewegung der relativen Ruhe verstanden werden. Eine solche Bewegung wird absolute Bewegung genannt.

Kann man nun aber bei jeder Bewegung des Laboratoriums in diesen Abweichungen von den Bewegungsgesetzen des Körpers, die man in ruhenden Laboratorien erhält, beobachten?

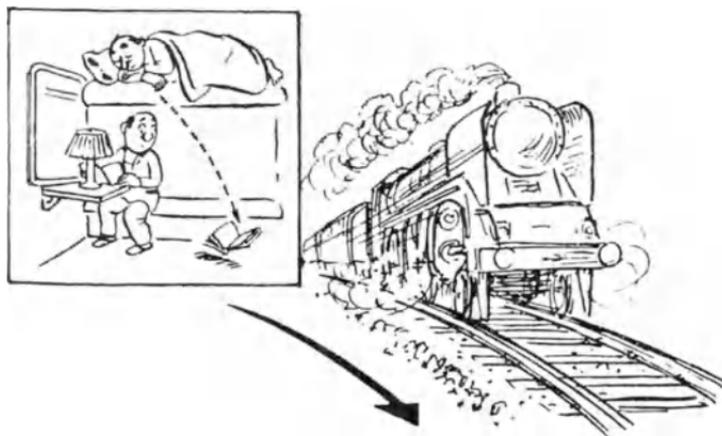
Angenommen, man sitzt in einem Zug, der mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus fährt, und beobachtet die Bewegung der Körper im Abteil. Dann vergleicht man diese Bewegungen mit denjenigen, die in einem stehenden Zug ablaufen. Die Erfahrung lehrt, daß in einem Zug, der sich geradlinig und gleichförmig bewegt, keinerlei Abweichungen von den Bewegungen in einem nicht fahrenden Zug bemerkt werden können. Jeder weiß, daß ein in einem fahrenden Zug nach oben geworfener Ball wieder in die Hand zurückfällt und keine Kurve beschreibt, wie sie in dem Bild auf Seite 17 dargestellt ist. Abgesehen von dem technisch unvermeidbaren Rütteln, verläuft in einem sich geradlinig und gleichförmig bewegenden Zug alles genauso wie in einem stehenden.



Anders ist es, wenn der Zug seine Geschwindigkeit verringert oder vergrößert. Im ersten Fall erfährt man einen Stoß nach vorn, im zweiten nach hinten, und man spürt deutlich einen Unterschied zur Ruhelage.

Wenn ein Waggon, der sich gleichförmig bewegt, die Bewegungsrichtung ändert, empfindet man das ebenfalls. Bei einer engen Rechtskurve wird man auf die linke Seite des Waggon, bei einer Linkskurve nach rechts gedrückt.

Verallgemeinert man diese Betrachtungen, so kommt man zu folgendem Schluß: Solange sich ein Laboratorium geradlinig gleichförmig bezüglich eines ruhenden Laboratoriums bewegt, sind keine Abweichungen vom Verhalten der Körper im ruhenden System zu beobachten. Sobald sich aber die Geschwindigkeit des bewegten Laboratoriums in Größe (Beschleunigung oder Verzögerung) oder Richtung (Kurve) ändert, so drückt sich das sofort im Verhalten der in ihm befindlichen Körper aus.



Mit der Ruhe ist es endgültig vorbei

Die erstaunliche Eigenschaft eines sich geradlinig und gleichförmig bewegenden Laboratoriums, das Verhalten der in ihm befindlichen Körper nicht zu beeinflussen, veranlaßt uns, den Begriff der Ruhe noch einmal zu durchdenken. Dabei zeigt sich, daß sich der Zustand der Ruhe und der Zustand der geradlinigen gleichförmigen Bewegung nicht voneinander unterscheiden. Ein Laboratorium, das sich bezüglich des ruhenden Laboratoriums geradlinig gleichförmig bewegt, kann selbst als ruhend angesehen werden. Das bedeutet, daß nicht eine, die absolute, Ruhe existiert, sondern eine unendliche Menge verschiedener „Ruhens“. Es gibt nicht nur eine Ruhestation, sondern unendlich viele Ruhestationen, die sich, relativ zueinander, geradlinig und gleichförmig, aber mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen.

Da also die Ruhe nicht absolut, sondern relativ ist, muß man

immer angeben, in bezug auf welches der unendlich vielen, sich relativ zueinander geradlinig und gleichförmig bewegenden Laboratorien man die Bewegung eines Körpers beobachtet.

Damit ist es also nicht gelungen, den Begriff der Ruhe absolut zu fassen. Immer bleibt die Frage offen, bezüglich welches ruhenden Systems man die Bewegung beobachtet.

Auf diese Weise haben wir ein außerordentlich wichtiges Naturgesetz entdeckt, das sogenannte Relativitätsprinzip der Bewegung. Es lautet:

In allen Laboratorien, die sich im Verhältnis zueinander geradlinig und gleichförmig bewegen, verläuft die Bewegung der Körper nach gleichen Gesetzen.

Das Trägheitsgesetz

Aus dem Relativitätsprinzip der Bewegung folgt, daß sich ein Körper, auf den keine äußeren Kräfte einwirken, nicht nur im Zustand der Ruhe, sondern auch in dem der geradlinig gleichförmigen Bewegung befinden kann. Diesen Sachverhalt nennt man in der Physik das Trägheitsgesetz.

Allerdings ist dieses Gesetz im täglichen Leben gleichsam verschleiert und nicht unmittelbar erkennbar. Denn nach dem Trägheitsgesetz müßte sich ja ein Körper, der sich im Zustand geradlinig gleichförmiger Bewegung befindet und auf den keine äußeren Kräfte wirken, endlos so fortbewegen. Die Erfahrung lehrt uns aber, daß ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, stehenbleibt.

Das Rätsel findet seine Lösung darin, daß alle Körper, die man beobachtet, doch von bestimmten äußeren Kräften, den sogenannten Reibungskräften, beeinflußt werden. Das heißt, daß die Bedingung, die für die Beobachtung des Trägheitsgesetzes notwendig ist, nämlich das Fehlen jeglicher auf den Körper einwirkenden Kräfte, nicht erfüllt ist. Durch verbesserte Versuchsbedingungen, durch Verringerung der Reibungskräfte, kann man sich aber den idealen Verhältnissen, die für die Beobachtung des Trägheitsgesetzes notwendig sind, nähern und so die Gültigkeit dieses Gesetzes auch für solche Bewegungen nachweisen, denen man im täglichen Leben begegnet.

Die Entdeckung des Trägheitsgesetzes ist eine der größten Entdeckungen. Ohne sie wäre die Entwicklung der Physik nicht möglich gewesen. Wir verdanken diese Entdeckung dem Genius

Galileo Galileis, der mutig gegen die damals herrschende und von der Autorität der katholischen Kirche gestützte Lehre des Aristoteles auftrat, nach der die Bewegung eines Körpers nur bei Vorhandensein einer Kraft möglich sei und ohne sie unvermeidlich aufhören müsse. Durch eine Reihe glänzender Versuche bewies Galilei, daß umgekehrt die Ursache für das Stehenbleiben eines sich bewegenden Körpers die Reibungskraft ist und daß sich beim Fehlen dieser Kraft ein einmal in Bewegung gesetzter Körper ewig weiterbewegen würde.

Auch die Geschwindigkeit ist relativ

Aus dem Relativitätsprinzip der Bewegung ergibt sich also noch eine weitere Folgerung: Von der Geschwindigkeit eines sich geradlinig gleichförmig bewegenden Körpers zu sprechen, ohne anzugeben, von welcher ruhenden Versuchstation aus die Geschwindigkeit gemessen wurde, hat genausowenig Sinn wie die Angabe einer geographischen Länge, ohne daß man vorher festlegt, von welchem Meridian aus sie zu rechnen ist.

Die Geschwindigkeit ist also auch ein relativer Begriff. Wenn man die Geschwindigkeit ein und desselben Körpers bezüglich verschiedener ruhender Laboratorien bestimmt, erhält man verschiedene Resultate. Dagegen hat aber jede Änderung der Geschwindigkeit, sei es eine Beschleunigung oder eine Verlangsamung oder eine Änderung ihrer Richtung, einen absoluten Sinn und hängt nicht von dem ruhenden Laboratorium ab, von dem aus man die Bewegung beobachtet.

Die Tragödie des Lichtes

Das Licht breitet sich nicht augenblicklich aus

Wir haben uns von der Richtigkeit des Relativitätsprinzips der Bewegung und von der Existenz unendlich vieler „ruhender“ Laboratorien überzeugt. In diesen Laboratorien unterscheiden sich die Bewegungsgesetze eines Körpers nicht voneinander. Nun gibt es jedoch eine Bewegungsform, die auf den ersten Blick dem oben aufgestellten Prinzip zu widersprechen scheint. Es ist die Ausbreitung des Lichtes.

Das Licht breitet sich nicht augenblicklich aus, obwohl seine Geschwindigkeit riesig groß ist, nämlich 300000 km/s.

Eine so ungeheuer große Geschwindigkeit ist schwer vorstellbar, um so weniger, als man im täglichen Leben nur Geschwindigkeiten begegnet, die im Vergleich mit der Lichtgeschwindigkeit verschwindend klein sind. Selbst die Geschwindigkeit kosmischer Raketen erreicht nur 12 km/s. Von allen Körpern, mit denen wir es zu tun haben, bewegt sich die Erde auf ihrem Weg um die Sonne am schnellsten. Aber auch ihre Geschwindigkeit beträgt nur 30 km/s.

Kann man die Geschwindigkeit des Lichtes ändern?

An sich ist die riesige Geschwindigkeit des Lichtes nicht besonders erstaunlich. Überraschend ist nur, daß diese Geschwindigkeit so streng konstant ist.

Die Bewegung eines Körpers kann man immer künstlich verzögern oder beschleunigen, sogar die eines Geschosses. Dazu braucht man dem Geschöß nur einen mit Sand gefüllten Sack in den Weg zu stellen. Beim Durchschlagen des Sackes verliert das Geschöß einen Teil seiner Geschwindigkeit und fliegt dann langsamer.

Völlig anders verhält es sich beim Licht. Während die Geschwindigkeit eines Geschosses von der Konstruktion des Gewehrs und den Eigenschaften des Pulvers abhängt, ist die Lichtgeschwindigkeit bei allen Lichtquellen die gleiche.

Wenn man auf dem Weg eines Lichtstrahs eine Glasscheibe aufstellt, so verringert sich während des Durchgangs durch die

Scheibe die Geschwindigkeit des Lichtes, denn die Lichtgeschwindigkeit ist im Glas kleiner als im leeren Raum. Jedoch setzt das Licht nach seinem Austritt aus der Scheibe seinen Weg wieder mit der Geschwindigkeit von 300000 km/s fort.

Die Ausbreitung des Lichtes im leeren Raum weist im Gegensatz zu allen anderen Bewegungen die äußerst wichtige Eigenschaft auf, daß sie nicht beschleunigt oder verzögert werden kann. Welche Veränderungen der Lichtstrahl im Stoff auch erfährt, nach dem Heraustreten in den leeren Raum breitet er sich weiter mit der vorherigen Geschwindigkeit aus.

Licht und Schall

In dieser Beziehung hat die Ausbreitung des Lichtes nichts mit der Bewegung gewöhnlicher Körper, wohl aber etwas mit der Ausbreitung des Schalles gemeinsam. Der Schall ist eine Wellenbewegung des Mediums, in dem er sich ausbreitet. Deshalb wird seine Geschwindigkeit durch die Eigenschaften des Mediums bestimmt und nicht durch die Eigenschaften des tönenden Körpers. Die Geschwindigkeit des Schalles kann, ähnlich wie die Lichtgeschwindigkeit, nicht verkleinert oder vergrößert werden, auch nicht dadurch, daß man den Schall durch irgendwelche Körper hindurchschickt.

Stellt man zum Beispiel auf dem Weg der Schallausbreitung eine Metallwand auf, so ändert der Schall zwar im Innern dieser Wand seine Geschwindigkeit. Er erhält aber seine Ausgangsgeschwindigkeit zurück, sobald er wieder in das ursprüngliche Medium eintritt.

Unter eine Glocke, an die eine Pumpe angeschlossen ist, sollen eine elektrische Lampe und eine elektrische Klingel gelegt und die Luft dann nach und nach herausgepumpt werden. Dann wird der Ton der Klingel schwächer werden und endlich überhaupt nicht mehr zu hören sein, während die Lampe wie zuvor leuchtet.

Dieser Versuch zeigt deutlich, daß sich der Schall nur in einem stofflichen Mittel, das Licht jedoch auch im leeren Raum ausbreiten kann.

Hierin besteht der wesentliche Unterschied zwischen Licht und Schall.

Das Relativitätsprinzip der Bewegung scheint anfechtbar

Die riesige, aber nicht unendlich große Geschwindigkeit des Lichtes scheint zu einem Widerspruch mit dem Relativitätsprinzip der Bewegung zu führen.

Man stelle sich einen Zug vor, der mit der riesigen Geschwindigkeit von $240\,000\text{ km/s}$ fährt. Wir befinden uns an der Spitze des Zuges, und am Ende werde eine Lampe eingeschaltet. Überlegen wir uns nun, welche Zeit wir messen würden, die das Licht benötigt, um von dem einen Ende des Zuges zum anderen zu kommen. Diese Zeit, so scheint es, wird sich von der Zeit unterscheiden, die im ruhenden Zug gemessen würde. Das Licht müßte also relativ zum Zug eine Geschwindigkeit (in Fahrtrichtung gemessen) von nur $300\,000 - 240\,000 = 60\,000\text{ km/s}$ haben. Es würde sozusagen die von ihm wegeilende vordere Wand des ersten Wagens einholen. Wenn man jetzt die Lampe an der Spitze des Zuges aufstellt und die Zeit mißt, die das Licht bis zum letzten Wagen braucht, so müßte man erwarten, daß die Geschwindigkeit in der der Fahrt entgegengesetzten Richtung $240\,000 + 300\,000 = 540\,000\text{ km/s}$ beträgt (Licht und letzter Wagen bewegen sich ja gewissermaßen aufeinander zu).

Hieraus würde folgen, daß sich in einem fahrenden Zug das Licht nach verschiedenen Seiten mit verschiedener Geschwindigkeit ausbreitete, während in einem ruhenden Zug die Geschwindigkeit in beiden Richtungen die gleiche wäre.

Wesentlich anders liegt die Sache bei einem Geschoß. Gleichgültig, ob man in Fahrtrichtung oder entgegengesetzt schießt, die Geschwindigkeit der Kugel, relativ zu den Wänden des Wagens, ist immer die gleiche und gleich der Geschwindigkeit in einem ruhenden Zug.

Das ist deshalb so, weil die Geschwindigkeit des Geschosses von der Geschwindigkeit abhängt, mit der sich das Gewehr bewegt. Die Geschwindigkeit des Lichtes aber verändert sich, wie wir sahen, bei Änderung der Geschwindigkeit der Lampe nicht. Aus diesen Überlegungen scheint eindeutig hervorzugehen, daß sich die Ausbreitung des Lichtes im krassen Widerspruch zum Relativitätsprinzip der Bewegung befindet. Während die Gewehrkugel in einem stehenden wie in einem fahrenden Zug mit der gleichen Geschwindigkeit in bezug auf die Wagenwand fliegt, breitet sich das Licht in einem Zug, der mit einer Geschwindigkeit von $240\,000\text{ km/s}$ fährt, scheinbar nach der einen Seite mit dem fünften Teil der Geschwindigkeit und nach der

anderen Seite 18mal schneller aus als in einem stehenden Zug.

So scheint es fast, als ob das Studium der Lichtausbreitung die Möglichkeit böte, die absolute Geschwindigkeit des Zuges zu ermitteln. Vielleicht darf man sogar hoffen, die Erscheinung der Lichtausbreitung dazu benutzen zu können, den Begriff der absoluten Ruhe doch noch aufzustellen.

Ein Laboratorium, in dem sich das Licht nach allen Seiten mit der gleichen Geschwindigkeit von 300000 km/s ausbreitet, kann als absolut ruhendes Laboratorium bezeichnet werden.

In jedem anderen Laboratorium, das sich zu diesem geradlinig und gleichförmig bewegt, müßte die Lichtgeschwindigkeit nach unseren Überlegungen in verschiedenen Richtungen unterschiedlich sein. In diesem Fall würde aber weder die relative Bewegung noch die relative Geschwindigkeit noch die relative Ruhe existieren, die oben festgestellt wurden.

Weltäther

Wie sind diese Dinge nun wirklich zu verstehen? Früher, als man eine Analogie zwischen der Ausbreitung des Lichtes und der des Schalles annahm, führten die Physiker ein spezielles Medium ein, den sogenannten Weltäther, in dem sich das Licht in der gleichen Weise ausbreiten sollte wie der Schall in der Luft. Dabei wurde vorausgesetzt, daß die Körper bei ihrer Bewegung durch den Äther diesen nicht mit sich fortreißen, so wie ein Käfig aus dünnen Stäben, der sich im Wasser bewegt, dieses auch nicht in Bewegung setzt.

Wenn sich unser Zug in bezug auf den Äther nicht bewegt, so müßte sich das Licht in allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten. Dagegen würde sich eine Bewegung des Zuges relativ zum Äther sofort dadurch bemerkbar machen, daß die Ausbreitung des Lichtes in verschiedenen Richtungen unterschiedlich würde.

Jedoch wirft die Einführung des Äthers, eines Mittels, dessen Schwingungen sich in Gestalt von Licht äußern sollen, eine Reihe unlösbarer Fragen auf. Erstens wirkt die Hypothese von der Existenz des Äthers ziemlich gekünstelt. Während man nämlich die Eigenschaften der Luft nicht nur durch die Beobachtung der Schallausbreitung, sondern auch mittels verschiedener physikalischer und chemischer Methoden untersuchen kann, nimmt

der Äther rätselhafterweise an den meisten dieser Erscheinungen nicht teil. Die Dichte und der Druck der Luft sind schon groben Messungen zugänglich. Dagegen blieben alle Versuche, irgendwie den Druck oder die Dichte des Äthers zu ermitteln, erfolglos.

Dies alles ergab eine ziemlich ausweglose Lage.

Natürlich ließe sich jede Erscheinung der Natur dadurch „erklären“, daß man eine spezielle Flüssigkeit einführt, die alle notwendigen Eigenschaften hätte. Eine echte Theorie unterscheidet sich aber von der bloßen Umschreibung bekannter Tatsachen mit gelehrten Worten dadurch, daß aus ihr viel mehr folgt, als die Tatsachen, auf die sie sich gründet, selbst aussagen. Zum Beispiel fand der Begriff des Atoms in hohem Maße im Zusammenhang mit Fragen der Chemie Eingang in die Wissenschaft, aber die Vorstellung von den Atomen eröffnete die Möglichkeit, eine Unmenge von Erscheinungen zu erklären und vorherzusagen, die zur Chemie nicht die geringste Beziehung hatten.

Mit der Vorstellung vom Äther verhält es sich tatsächlich nicht anders, als wenn etwa ein primitiver Mensch die Wirkungsweise des Grammophons damit erklären wollte, daß in dem geheimnisvollen Kasten ein „Grammophongeist“ eingeschlossen sei. Solche „Erklärungen“ erklären natürlich nichts.

Schon vor der Äthertheorie hatten die Physiker traurige Erfahrungen ähnlicher Art gemacht: Man hatte seinerzeit auch die Erscheinung des Brennens durch die Eigenschaften einer besonderen Flüssigkeit, des sogenannten Phlogistons, und die Erscheinungen der Wärme durch die einer anderen Flüssigkeit, des sogenannten Wärmestoffes, „erklärt“. Unnötig zu sagen, daß diese Flüssigkeiten, ebenso wie der Äther, absolut nicht erfaßbar waren.

Es entsteht eine schwierige Lage

Die Hauptschwierigkeit aber besteht darin, daß eine Verletzung des Relativitätsprinzips der Bewegung durch das Licht auch unweigerlich eine Verletzung dieses Prinzips durch andere Körper zur Folge hätte.

Denn in der Tat setzt jedes Medium der Bewegung der Körper einen Widerstand entgegen. Deshalb hätte die Bewegung des Körpers im Äther ebenfalls mit Reibung verbunden sein müssen. Die Bewegung der Körper hätte sich verlangsamen und diese

hätten schließlich in den Zustand der Ruhe übergehen müssen. Indessen dreht sich die Erde (nach geologischen Messungen) schon viele Milliarden Jahre um die Sonne, und es sind keine Anzeichen einer Bremsung durch Reibung zu bemerken. So gerät man bei dem Versuch, das seltsame Verhalten des Lichtes in einem fahrenden Zug durch die Einführung des Äthers zu erklären, in eine Sackgasse. Durch die Vorstellung vom Äther wird der Widerspruch zwischen der Verletzung des Relativitätsprinzips durch das Licht und der Gültigkeit dieses Prinzips für alle anderen Bewegungen nicht beseitigt.

Das Experiment muß entscheiden

Wie läßt sich nun dieser Widerspruch lösen? Bevor hierauf eingegangen wird, sei die Aufmerksamkeit einmal auf folgendes gerichtet.

Zu dem Widerspruch zwischen der Ausbreitung des Lichtes und dem Relativitätsprinzip der Bewegung sind wir ausschließlich durch unsere Überlegungen gelangt.

Zwar waren alle diese Überlegungen durchaus überzeugend. Beschränkt man sich aber nur auf Überlegungen, so gleicht man gewissen Philosophen früherer Zeiten, die den Versuch unternahmen, die Naturgesetze nur durch den eigenen Verstand zu ergründen. Dabei entsteht aber unweigerlich die Gefahr, daß die so aufgebaute Welt bei aller Wertschätzung sehr wenig Ähnlichkeit mit der Wirklichkeit hat.

Oberster Richter aller physikalischen Theorien ist das Experiment. Deshalb darf man sich nicht auf Überlegungen darüber beschränken, wie sich das Licht in einem fahrenden Zug ausbreitet, sondern man muß Versuche anstellen, die zeigen, wie sich das Licht unter derartigen Bedingungen tatsächlich verhält. Die Ausführung eines solchen Versuches wird dadurch vereinfacht, daß wir selbst auf einem zweifellos sich bewegendem Körper leben. Auf ihrem Weg um die Sonne beschreibt die Erde keineswegs eine geradlinige Bewegung und kann sich deshalb, von einer beliebigen Ruhestation aus betrachtet, nicht ständig in Ruhe befinden.

Selbst wenn man eine Ausgangsstation wählt, bezüglich der die Erde im Januar ruht, so wird sich unser Planet, da er seine Bewegungsrichtung ständig ändert, im Juli mit Sicherheit in Bewegung befinden. Wenn man deshalb die Lichtausbreitung auf

der Erde studiert, so tut man das in einem sich bewegenden Laboratorium, das sich dazu noch mit einer für unsere Bedingungen sehr soliden Geschwindigkeit von 30 km/s fortbewegt. (Die Drehung der Erde um ihre Achse, die eine Geschwindigkeit bis zu einem halben Kilometer in der Sekunde erreicht, kann dabei vernachlässigt werden.)

Darf man aber nun wirklich die Erdkugel mit dem fahrenden Zug vergleichen, von dem oben die Rede war und der uns in eine Sackgasse befördert hatte? Der Zug bewegt sich ja geradlinig und gleichförmig, während die Erde eine Kreisbahn beschreibt. Man darf es deshalb, weil man mit Recht annehmen kann, daß während des Bruchteils einer Sekunde, den das Licht benötigt, um durch unsere Beobachtungsgeräte hindurchzugehen, die Erdbewegung geradlinig und gleichförmig verläuft. Der dabei entstehende Fehler ist so winzig, daß er überhaupt nicht festgestellt werden kann.

Wenn man aber den Zug mit der Erde vergleicht, müßte man auch erwarten, daß sich das Licht auf der Erde genauso merkwürdig verhielte wie im Zug, d. h., es müßte sich nach verschiedenen Seiten mit verschiedener Geschwindigkeit ausbreiten.

Das Relativitätsprinzip triumphiert!

Ein solcher Versuch wurde im Jahre 1881 von Michelson, einem der bedeutendsten Experimentatoren des vorigen Jahrhunderts, wirklich angestellt. Er ermittelte mit großer Genauigkeit die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Richtungen relativ zur Erde. Um die zu erwartenden kleinen Unterschiede in der Geschwindigkeit feststellen zu können, mußte Michelson eine aufs äußerste verfeinerte Experimentiertechnik anwenden, und er zeigte in dieser Hinsicht einen großartigen Erfindergeist. Die Präzision des Versuches war so groß, daß dabei auch noch viel geringere Unterschiede in den Geschwindigkeiten hätten festgestellt werden können, als sie zu erwarten waren.

Der Versuch von Michelson, der seitdem noch mehrmals unter den verschiedensten Bedingungen wiederholt wurde, führte zu einem völlig unerwarteten Ergebnis. Die Ausbreitung des Lichtes in einem sich bewegenden Laboratorium verläuft in Wirklichkeit völlig anders, als aus unseren Überlegungen folgte. Michelson entdeckte nämlich, daß sich auf der in Bewegung

befindlichen Erde das Licht nach allen Richtungen mit völlig gleicher Geschwindigkeit ausbreitet. In dieser Beziehung geht die Ausbreitung des Lichtes genauso vor sich wie der Flug eines Geschosses, nämlich unabhängig von der Bewegung des Laboratoriums nach allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit in bezug auf dessen Wände.

So zeigt der Versuch von Michelson im Gegensatz zu unseren Überlegungen, daß die Erscheinung der Lichtausbreitung in nichts dem Relativitätsprinzip der Bewegung widerspricht, sondern daß es im Gegenteil mit ihm vollkommen übereinstimmt. Mit anderen Worten: Die auf Seite 22 dargestellten Überlegungen haben sich als falsch herausgestellt.

Aus dem Regen in die Traufe

So hat uns das Experiment von dem schweren Widerspruch zwischen den Gesetzen der Lichtausbreitung und dem Relativitätsprinzip der Bewegung befreit. Der Widerspruch war nur scheinbar und entstand offensichtlich durch einen Fehlschluß in unseren Überlegungen. Worin besteht aber nun dieser Fehlschluß?

Fast ein Vierteljahrhundert, von 1881 bis 1905, zerbrachen sich die Physiker in der ganzen Welt die Köpfe an dieser Frage, aber alle vorgebrachten Erklärungen führten unweigerlich zu immer neuen Widersprüchen zwischen Theorie und Versuch.

Denkt man sich eine Schallquelle und einen Beobachter in einem sich bewegenden Käfig aus dünnen Stäben, so würde der Beobachter einen heftigen Luftzug verspüren. Wenn man jetzt die Schallgeschwindigkeit in bezug zum Käfig messen würde, so wäre sie in Richtung der Bewegung des Käfigs kleiner als in umgekehrter Richtung. Brächte man aber die Schallquelle im Abteil eines fahrenden Zuges unter, so würde man bei verschlossenen Türen und Fenstern in allen Richtungen die gleiche Schallgeschwindigkeit ermitteln, weil sich die Luft im Abteil gemeinsam mit dem Wagen bewegt.

Wenn man nun vom Schall zum Licht übergeht, so könnte zur Erklärung des Michelsonschen Versuches folgender Vorschlag dienen: Bei ihrer Bewegung im Raum läßt die Erde den Äther nicht unbewegt, da sie, ähnlich wie der Käfig aus dünnen Stäben, durch ihn hindurchgeht. Nehmen wir nun aber umgekehrt an, sie risse den Äther mit sich fort, indem sie mit ihm gewisser-

maßen ein Ganzes bildete, dann würde das Resultat des Michelsonschen Versuches ganz verständlich werden.

Aber diese Annahme steht im krassen Widerspruch zu zahlreichen Erfahrungen, z. B. zur Ausbreitung des Lichtes in einem Rohr, durch das Wasser fließt. Wenn die Annahme über die Mitbewegung des Äthers richtig wäre, müßte die Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Bewegung des Wassers gleich sein der Geschwindigkeit des Lichtes im unbewegten Wasser plus der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers. Unmittelbare Messungen ergeben jedoch Geschwindigkeiten, die kleiner sind, als aus dieser Überlegung folgt.

Es wurde schon über den recht merkwürdigen Umstand gesprochen, daß Körper, die durch den Äther hindurchgehen, keinerlei merkliche Reibung erfahren. Wenn sie aber nun nicht nur durch den Äther hindurchgehen, sondern ihn auch noch mit sich fortrissen, müßte die Reibung auf jeden Fall bedeutend sein.

So erwiesen sich vorerst alle Versuche, dem aus dem unerwarteten Resultat des Michelsonschen Versuches folgenden Widerspruch zu entgehen, als erfolglos.

Fassen wir zusammen.

Michelsons Versuch bestätigt das Relativitätsprinzip nicht nur für die Bewegung gewöhnlicher Körper, sondern auch für die Lichtausbreitung, d. h. für alle Naturerscheinungen.

Wie schon früher ausgeführt, folgt aus dem Relativitätsprinzip der Bewegung unmittelbar die Relativität der Geschwindigkeit. Der Wert der Geschwindigkeit muß für verschiedene, sich relativ zueinander bewegende Laboratorien unterschiedlich sein. Andererseits ist die Lichtgeschwindigkeit bei verschiedenen Laboratorien die gleiche, nämlich 300000 km/s. Das bedeutet, daß sie nicht relativ, sondern absolut ist.

Die Zeit ist relativ

Besteht nun wirklich ein Widerspruch?

Auf den ersten Blick scheint es also, als ob man es mit einem logischen Widerspruch zu tun hätte. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Richtungen bestätigt das Relativitätsprinzip der Bewegung, zugleich aber ist die Lichtgeschwindigkeit selbst absolut.

Erinnern wir uns jedoch daran, wie sich der Mensch des Mittelalters gegenüber der Tatsache verhielt, daß die Erde Kugelgestalt hat. Für ihn stand das im krassen Widerspruch zur Schwerkraft, nach der alle Körper „nach unten“ fallen mußten. Dagegen wissen wir heute ganz genau, daß es hier keinerlei logischen Widerspruch gibt, einfach weil die Begriffe „oben“ und „unten“ nicht absolut, sondern relativ sind.

Die gleiche Lage besteht auch bei dem Problem der Lichtausbreitung.

Es wäre vergeblich, wollte man einen Widerspruch zwischen dem Relativitätsprinzip der Bewegung und der Absolutheit der Lichtgeschwindigkeit suchen. Der vermeintliche Widerspruch entsteht nur deshalb, weil wir, ohne es zu merken, noch andere Voraussetzungen einführten, ähnlich wie die Menschen im Mittelalter nur deshalb die Kugelgestalt der Erde für unwahr hielten, weil sie die Begriffe „oben“ und „unten“ als absolut ansahen. Dieser von uns als lächerlich empfundene Glaube an die Absolutheit von „oben“ und „unten“ war eine Folge der begrenzten Erfahrungen jener Menschen. Damals reisten die Menschen nur wenig, und infolgedessen kannten sie auch nur kleine Teile der Erdoberfläche. Offenbar geht es uns in gewisser Hinsicht ähnlich, indem wir auf Grund unserer beschränkten Erfahrungen irgend etwas Relatives für absolut halten. Was aber könnte das sein?

Um diesen Fehler zu entdecken, wollen wir uns im weiteren nur auf solche Tatsachen stützen, die durch das Experiment erwiesen sind.

Bitte im Zug Platz nehmen!

Stellen wir uns einen Zug von 5400000 km Länge vor, der geradlinig und gleichförmig mit einer Geschwindigkeit von 240000 km in der Sekunde fahren möge.

Zu irgendeinem Zeitpunkt soll in der Mitte des Zuges eine Lampe angezündet werden. Im ersten und letzten Wagen seien Türen angebracht, die sich automatisch öffnen, wenn das Licht auf sie auftrifft. Was werden die Leute im Zug sehen und was diejenigen, die auf einem Bahnsteig stehen?

Bei der Beantwortung dieser Frage wollen wir uns, wie gesagt, nur an experimentell bestätigte Tatsachen halten.

Die Fahrgäste, die in der Mitte des Zuges sitzen, sehen folgendes: Da sich nach dem Versuch von Michelson das Licht nach allen Seiten mit der gleichen Geschwindigkeit von 300000 km/s ausbreitet, erreicht es in 9 s (2700000:300000) sowohl den ersten als auch den letzten Wagen, und beide Türen öffnen sich gleichzeitig.

Was sehen aber die Menschen auf dem Bahnsteig? In bezug auf den Bahnsteig breitet sich das Licht ebenfalls mit der Geschwindigkeit von 300000 km/s aus. Der letzte Wagen fährt aber dem Lichtstrahl entgegen; deshalb wird dieser den letzten Wagen

nach $\frac{2700000}{300000 + 240000} = 5$ s erreichen. Dem vorderen Wagen muß der Lichtstrahl dagegen nachjagen, und er wird ihn deshalb erst nach $\frac{2700000}{300000 - 240000} = 45$ s erreichen.

Den Menschen auf dem Bahnsteig wird es also vorkommen, als ob sich die Türen nicht gleichzeitig öffneten. Zuerst geht die hintere Tür auf und 45 — 5 = 40 Sekunden später die vordere.¹ So werden zwei völlig ähnliche Ereignisse, nämlich das Öffnen der vorderen und der hinteren Tür des Zuges, von den Fahrgästen im Zug als gleichzeitig beobachtet, während für die Leute auf dem Bahnsteig zwischen beiden Ereignissen 40 Sekunden liegen.

¹ Diese Überlegung soll später noch etwas präzisiert werden.

Der „gesunde Menschenverstand“ ist blamiert

Liegt nun in dem zuletzt Gesagten ein Widerspruch? Ist der gefundene Sachverhalt nicht genauso absurd wie folgende Aussage: „Das Krokodil ist vom Schwanz bis zum Kopf gemessen zwei Meter lang und vom Kopf bis zum Schwanz einen Meter?“

Versuchen wir einmal zu ergründen, warum uns das gefundene Resultat so widersinnig vorkommt, obwohl es mit den experimentellen Tatsachen übereinstimmt.

Doch soviel man auch darüber nachdenken würde, man könnte keinen logischen Widerspruch darin finden, daß zwei Ereignisse, die für die Leute im Zug gleichzeitig verlaufen, für Beobachter auf dem Bahnsteig zeitlich 40 Sekunden auseinander liegen.

Das einzige, womit man sich trösten könnte, wäre, daß diese Ergebnisse dem „gesunden Menschenverstand“ widersprechen.

Aber erinnern wir uns, wie sich der „gesunde Menschenverstand“ der Menschen früherer Jahrhunderte der Tatsache widersetzte, daß sich die Erde um die Sonne dreht! Denn tatsächlich lehrte doch die tägliche Erfahrung den Menschen des Mittelalters mit unbestreitbarer Gewißheit, daß die Erde ruht und sich die Sonne um die Erde dreht. Und war es nicht der gleiche „gesunde Menschenverstand“, mit dem die Unmöglichkeit der Kugelgestalt der Erde bewiesen werden sollte?

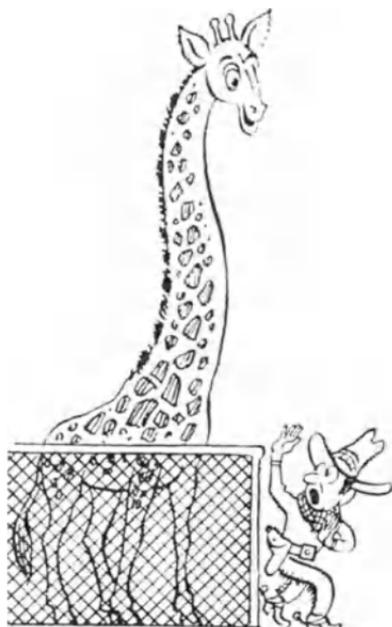
Der Zusammenstoß des „gesunden Menschenverstandes“ mit den realen Tatsachen wird in der bekannten Anekdote über einen Farmer verspottet, der beim Anblick einer Giraffe im zoologischen Garten in die Worte ausbrach: „Das kann es doch nicht geben!“

Der sogenannte gesunde Menschenverstand ist nichts anderes als eine Verallgemeinerung der Vorstellungen und Gewohnheiten, die uns das tägliche Leben vermittelt. Er bezeichnet eine bestimmte Stufe des Wissens, die den Stand unserer Erfahrungen widerspiegelt.

Unsere Schwierigkeit zu begreifen, daß, vom Bahnsteig aus betrachtet, zwei Ereignisse nicht gleichzeitig stattfinden, die im Zug gleichzeitig ablaufen, ist mit den Schwierigkeiten des Farmers vergleichbar, den der Anblick der Giraffe in Bestürzung versetzte. So, wie der Farmer noch nie ein solches Tier gesehen hatte, haben auch wir uns noch nie mit einer Geschwindigkeit bewegt, die auch nur im entferntesten der phantastischen Geschwindigkeit von 240000 km/s näher käme. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß die Physiker, als sie es mit solch hohen Geschwindigkeiten zu tun bekamen, Dinge beobachteten, die

wesentlich von denen verschieden waren, an die wir aus dem täglichen Leben gewöhnt sind.

Das unerwartete Resultat des Michelsonschen Versuches, das die Physiker vor neue Tatsachen gestellt hatte, zwang sie, sogar gegen den „gesunden Menschenverstand“ scheinbar so offenkundige und gewohnte Vorstellungen, wie die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse, neu zu durchdenken.



Natürlich könnte man auf Grund des „gesunden Menschenverstandes“ das Vorhandensein dieser neuen Erscheinungen negieren, aber dann würde man sich so verhalten wie der Farmer in der Anekdote.

Die Zeit teilt das Geschick des Raumes

Die Wissenschaft schreckt vor einem Zusammenstoß mit dem sogenannten gesunden Menschenverstand nicht zurück. Was sie dagegen fürchtet, ist, daß die existierenden Vorstellungen nicht mit den neuen Versuchsergebnissen übereinstimmen. Wenn dies eintritt, so bricht sie unbarmherzig mit überholten Vorstellungen und hebt damit unser Wissen auf eine höhere Stufe.

Wir hatten bisher angenommen, daß zwei gleichzeitige Ereignisse, von jedem Laboratorium aus beobachtet, gleichzeitig erscheinen. Der Versuch führte uns zu einem anderen Schluß. Es zeigt sich nämlich, daß die Annahme nur in dem Falle zutrifft, wenn sich die Laboratorien relativ zueinander in Ruhe befinden. Wenn sich zwei Laboratorien in bezug aufeinander bewegen, so können zwei Ereignisse, die von einem der beiden Laboratorien aus als gleichzeitig beobachtet werden, bezüglich des anderen Laboratoriums zu verschiedenen Zeitpunkten ablaufen. Der Begriff der Gleichzeitigkeit ist also relativ und bekommt nur einen Sinn, wenn man angibt, wie sich das Laboratorium bewegt, von dem aus die Ereignisse beobachtet werden.

Zum Vergleich sei noch einmal die Relativität des Winkelmaßes, von dem auf Seite 9 die Rede war, betrachtet. Wie verhielt es sich da? Angenommen, die Winkelentfernung zwischen zwei Sternen sei, von der Erde aus gemessen, Null, d. h., die Sterne lägen hintereinander. Würde man diese Behauptung als absolut ansehen, so würde das zu keiner Erscheinung unseres täglichen Lebens im Widerspruch stehen. Anders wäre es jedoch, wenn man das Sonnensystem verlassen und die beiden Sterne von irgendeinem anderen Punkt des Raumes beobachten würde. In diesem Fall würde das Winkelmaß sehr wohl von Null verschieden sein.

Diese für den modernen Menschen offensichtliche Tatsache, daß zwei Sterne, die, von der Erde aus beobachtet, zusammenfallen, bei der Beobachtung von einem anderen Punkt des Raumes aus aber durchaus voneinander entfernt liegen können, wäre dem Menschen des Mittelalters als sinnlos erschienen, da er sich den Himmel als eine mit Sternen besäte Kuppel vorstellte.

Wenn wir vor der Frage stünden, ob denn nun zwei Ereignisse, abgesehen von allen Beobachtungsstationen, in Wirklichkeit gleichzeitig oder nicht gleichzeitig eintreten, so hätte diese Frage leider genausowenig Sinn wie die Frage, ob die beiden Sterne, abgesehen vom Beobachtungspunkt, auf einer Geraden liegen oder nicht. Denn darauf kommt es ja gerade an. Die Tatsache, daß beide Sterne als auf einer Geraden liegend beobachtet werden, hängt nicht nur von ihrer Stellung ab, sondern auch von dem Beobachtungspunkt, und ebenso ist die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse nicht nur von diesen, sondern auch von dem Laboratorium abhängig, von dem aus sie registriert werden.

Solange man es mit Geschwindigkeiten zu tun hatte, die klein waren im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit, konnte man den relativen Charakter des Begriffes der Gleichzeitigkeit nicht er-

kennen. Als man aber Bewegungen zu untersuchen begann, deren Geschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar war, mußte man den Begriff der Gleichzeitigkeit neu durchdenken, genauso wie man die Begriffe „oben“ und „unten“ genauer formulieren mußte, seitdem man Reisen unternahm, deren Entfernungen dem Erddurchmesser nahekamen. Vorher konnte natürlich die Vorstellung von der Erde als einer Fläche zu keinem Widerspruch mit der Erfahrung führen.

Zwar haben wir keine Möglichkeit, uns mit Geschwindigkeiten zu bewegen, die der Lichtgeschwindigkeit nahekomen, und diese vom Gesichtspunkt der alten Vorstellungen paradoxen Erscheinungen aus eigener Anschauung zu beobachten. Aber dank der modernen Experimentiertechnik kann man diese Tatsachen mit völliger Sicherheit in einer Reihe physikalischer Erscheinungen nachweisen.

So teilt die Zeit das Schicksal des Raumes! Die Feststellung „zu ein und demselben Zeitpunkt“ ist genauso nichtssagend wie die Worte „an ein und demselben Ort“.

Der zeitliche Abstand zweier Ereignisse verlangt ebenso wie die räumliche Entfernung zwischen ihnen die Angabe eines Laboratoriums, auf das sich diese Angaben beziehen.

Die Wissenschaft triumphiert

Die Entdeckung der Relativität der Zeit bedeutet eine gewaltige Umwälzung in der Anschauung des Menschen über die Natur. Sie ist einer der größten Siege der menschlichen Vernunft über den Konservatismus jahrhundertalter Vorstellungen und ist nur mit der Entdeckung der Kugelgestalt der Erde vergleichbar. Diese Entdeckung gelang im Jahre 1905 dem größten Physiker des 20. Jahrhunderts, Albert Einstein, der von 1880 bis 1955 lebte. Der damals erst Fünfundzwanzigjährige rückte damit in die Reihe der Giganten des menschlichen Geistes, und er wurde zu einem Wegbereiter der Wissenschaften wie Kopernikus und Newton.

W. I. Lenin nannte Albert Einstein einen „der größten Reformatoren der Wissenschaft“.

Die Lehre von der Relativität der Zeit und die sich aus ihr ergebenden Schlußfolgerungen werden gewöhnlich als Relativitätstheorie bezeichnet. Sie darf nicht mit dem Relativitätsprinzip der Bewegung verwechselt werden.

Die Geschwindigkeit hat eine Grenze

Bis zum zweiten Weltkrieg lag die Höchstgeschwindigkeit der Flugzeuge unter der Schallgeschwindigkeit, während heute Flugzeuge gebaut werden, die mit Überschallgeschwindigkeit fliegen. Die Radiowellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Wäre es nun vielleicht auch denkbar, eine „Überlichtgeschwindigkeits-Telegrafie“ zu schaffen, mit deren Hilfe man Signale mit einer Geschwindigkeit übertragen könnte, die die Lichtgeschwindigkeit überträte? Eine solche Aufgabe ist unlösbar.

Wenn man nämlich Signale mit unendlicher Geschwindigkeit übertragen könnte, so wäre auch die Möglichkeit gegeben, die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse eindeutig festzustellen. Man würde in diesem Fall sagen, daß zwei Ereignisse dann gleichzeitig stattfinden, wenn ein sich mit unendlicher Geschwindigkeit ausbreitendes Signal vom ersten Ereignis gleichzeitig mit einem entsprechenden Signal vom zweiten Ereignis ankommt. Die Gleichzeitigkeit würde damit einen absoluten Charakter erhalten, der nicht von der Bewegung des Laboratoriums abhinge, auf das sich die Behauptung bezöge.

Da aber eine absolute Zeit durch das Experiment widerlegt wird, kommt man zu der Schlußfolgerung, daß ein Signal nicht augenblicklich übertragen werden kann. Die Übertragung einer Wirkung von einem Punkt des Raumes zu einem anderen kann nicht mit unendlich großer Geschwindigkeit erfolgen, mit anderen Worten:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit kann einen bestimmten endlichen Wert, die sogenannte Grenzgeschwindigkeit, nicht überschreiten. Diese Grenzgeschwindigkeit stimmt mit der Lichtgeschwindigkeit überein.

In der Tat müssen ja nach dem Relativitätsprinzip der Bewegung in allen Laboratorien, die sich in bezug aufeinander geradlinig und gleichförmig bewegen, die Naturgesetze die gleichen sein. Die Behauptung, daß die Geschwindigkeit eine gegebene Grenze nicht überschreiten kann, ist aber auch ein Naturgesetz, und deshalb muß der Wert dieser Grenzgeschwindigkeit in allen Laboratorien gleich sein. Dieselben Eigenschaften weist bekanntlich auch die Lichtgeschwindigkeit auf.

So ist die Lichtgeschwindigkeit nicht einfach die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Erscheinung der Natur, sondern sie spielt eine fundamentale Rolle als Grenzgeschwindigkeit.

Die Entdeckung der Existenz einer endlichen Grenzgeschwindigkeit im Weltall ist eine gewaltige Leistung der Wissenschaft und ein Triumph ihrer experimentellen Möglichkeiten.

Die Physiker des vorigen Jahrhunderts dachten nicht im entferntesten an die Existenz einer endlichen Grenzgeschwindigkeit in der Welt, geschweige denn daran, daß deren Existenz bewiesen werden könnte. Mehr noch, selbst wenn man beim Experimentieren auf eine Grenzgeschwindigkeit in der Natur gestoßen wäre, hätte man daran gezweifelt, hier ein Naturgesetz aufgefunden zu haben, und man hätte das Ergebnis den beschränkten experimentellen Möglichkeiten zugeschrieben, die im Lauf der weiteren technischen Entwicklung würden vervollkommen werden können.

Das Relativitätsprinzip zeigt, daß die Existenz einer endlichen Grenzgeschwindigkeit in der Natur der Sache selbst liegt. Damit zu rechnen, daß durch die weitere technische Entwicklung Geschwindigkeiten erreicht werden könnten, die über der Lichtgeschwindigkeit liegen, wäre ebenso verfehlt wie der Gedanke, daß es nur eine Folge unseres begrenzten Wissens und nicht etwa ein geographisches Gesetz sei, wenn sich auf der Erde keine zwei Punkte finden lassen, die mehr als 20000 km voneinander entfernt liegen, und daß man deshalb hoffen könne, solche Punkte mit Hilfe einer weiterentwickelten Geographie doch noch zu entdecken.

Die Lichtgeschwindigkeit hat deshalb eine so universelle Bedeutung für die Naturerscheinungen, weil sie die Grenzgeschwindigkeit für die Ausbreitung jeder irgendwie anderen Erscheinung ist. Das Licht eilt entweder jeder anderen Erscheinung voraus oder breitet sich im äußersten Fall mit gleicher Geschwindigkeit aus.

Wenn sich die Sonne in zwei Teile spalten würde und aus ihr ein Doppelstern entstände, so würde sich natürlich auch die Bewegung der Erde ändern. Früher, als die Physiker noch nichts über die Existenz einer Grenzgeschwindigkeit wußten, wären sie nun ohne weiteres der Ansicht gewesen, daß sich die Bewegung der Erde in dem gleichen Augenblick ändern müßte, in dem sich die Sonne spaltete. Jedoch benötigt das Licht 8 min, um von der gespaltenen Sonne zur Erde zu gelangen.

In Wirklichkeit würde sich daher die Bewegung der Erde auch erst 8 min nach der Spaltung der Sonne ändern, während sich bis zu diesem Moment die Erde so bewegen würde, als wäre nichts geschehen. Und überhaupt kann kein Ereignis, das mit der Sonne oder auf der Sonne stattfindet, vor Ablauf dieser

8 min einen Einfluß auf die Erde oder auf ihre Bewegung ausüben.

Die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Signals hindert uns selbstverständlich nicht daran, die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse festzustellen. Man braucht dazu nur die Laufzeitverzögerung der Signale zu berücksichtigen, wie das gewöhnlich auch geschieht.

Eine solche Methode, die Gleichzeitigkeit festzustellen, würde vollkommen mit der Relativität dieses Begriffes in Einklang stehen. In der Tat braucht man, um die Laufzeitverzögerung des Signals zu berechnen, die Entfernung zwischen dem Ort des Ereignisses und dem Standort des Beobachters nur durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals zu teilen. Andererseits hatten wir aber, wenn wir uns noch einmal an unsere Überlegungen betreffs des Briefversandes aus dem Expreß Moskau-Wladivostok erinnern, gesehen, daß der Ort im Raum selbst ein durchaus relativer Begriff ist.

Früher oder später

Wir wollen einmal annehmen, daß in dem Zug mit der angezündeten Lampe, den wir Einstein-Zug nennen wollen, der Mechanismus der automatischen Tür beschädigt sei, und die Leute im Zug bemerkten jetzt, daß sich die vordere Tür 15 s früher öffnet als die hintere. Die Leute auf dem Bahnsteig dagegen sehen, daß sich die hintere Tür $40 - 15 = 25$ s früher öffnet. So kann also für bestimmte Beobachter ein Ereignis früher als das andere eintreten, während es für andere Beobachter gerade umgekehrt ist.

Dabei wird man sich jedoch sofort darüber klar werden, daß eine solche Relativität der Begriffe „früher“ und „später“ Grenzen haben muß. Man wird z. B. schwerlich auf den Gedanken kommen, daß vom Standpunkt irgendeines Beobachters aus ein Kind früher geboren sein könnte als seine Mutter.

Wenn sich auf der Sonne ein Fleck bildet, so kann ihn ein Astronom, der die Sonne durch ein Teleskop beobachtet, nach 8 min sehen. Alles, was der Astronom danach unternimmt, wird absolut später liegen als das Entstehen des Fleckes, und zwar später vom Standpunkt irgendeines beliebigen Laboratoriums, von dem aus der Astronom und die Sonne beobachtet werden. Umgekehrt wird alles, was der Astronom bis zu 8 min vor der Fleckbildung getan hat (so daß ein Lichtsignal davon

vor der Fleckbildung auf der Sonne hätte ankommen können), absolut früher geschehen sein.

Wenn jedoch der Astronom z. B. seine Brille in einem Moment aufsetzte, der zwischen diesen beiden Grenzen liegt, so wäre das Zeitverhältnis zwischen dem Auftreten des Fleckes und dem Aufsetzen der Brille nicht mehr als absolut anzusehen.

Wir könnten uns nun in bezug auf den Sonnenfleck und den Astronomen in der Weise bewegen, daß wir je nach Geschwindigkeit und Richtung unserer Bewegung den Astronomen beim Aufsetzen der Brille vor oder nach der Fleckbildung oder auch gleichzeitig mit ihr beobachten könnten.

Das Relativitätsprinzip zeigt also, daß es drei Typen von Zeitbeziehungen zwischen mehreren Ereignissen gibt: „absolut früher“, „absolut später“ und „weder früher noch später“, genauer gesagt, entsprechend der Bewegung des Laboratoriums, von dem aus die Ereignisse beobachtet werden, entweder früher oder später.

Uhren und Lineale zeigen Launen

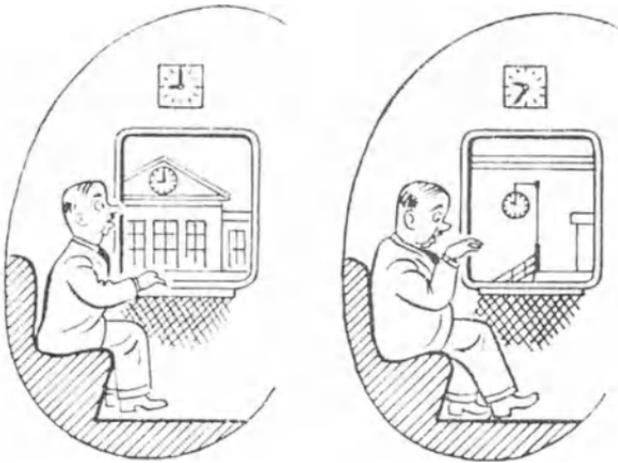
Wir nehmen noch einmal im Zug Platz

Vor uns soll eine sehr lange Eisenbahnstrecke liegen, auf der der Einstein-Zug dahinrast. An der Strecke liegen, 864 000 000 km voneinander entfernt, zwei Stationen. Bei einer Geschwindigkeit von 240 000 km/s benötigt der Zug eine Stunde, um diese Strecke zurückzulegen.

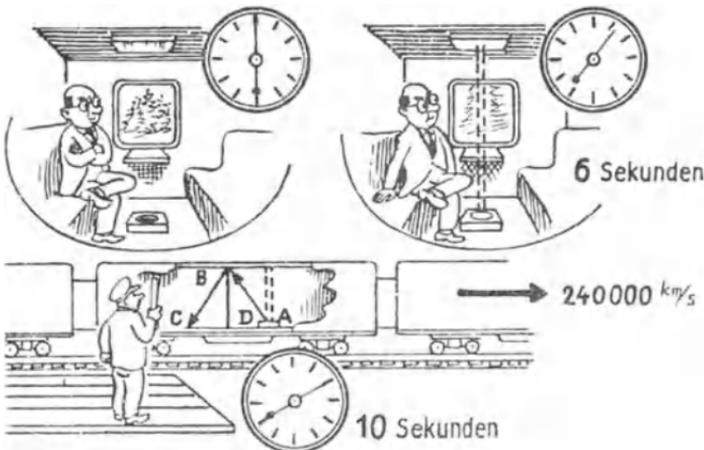
Auf beiden Stationen befinden sich Uhren. Auf der ersten Station besteigt ein Reisender den Zug und vergleicht vor der Abfahrt des Zuges seine Uhr mit der Bahnhofsuhr. Bei der Ankunft auf der anderen Station stellt er überrascht fest, daß seine Uhr nachgeht. Der Uhrmacher hatte dem Reisenden aber versichert, daß seine Uhr völlig in Ordnung ist.

Was mag hier geschehen sein?

Um uns darüber klar zu werden, stellen wir uns vor, daß der Reisende den Lichtstrahl einer Lampe, die auf dem Boden des Wagens steht, zur Decke richtet. An der Decke sei ein Spiegel



befestigt, der den Lichtstrahl wieder zur Lampe reflektiert. Der Weg des Lichtstrahls, wie ihn der Reisende sieht, wird im oberen Teil des Bildes auf Seite 39 gezeigt. Wesentlich anders erscheint



dieser Weg einem Beobachter, der sich auf dem Bahnsteig befindet. In der Zeit, in der sich der Lichtstrahl von der Lampe zur Decke bewegt, verschiebt sich ja infolge der Bewegung des

Zuges der Spiegel selbst, und bis der Strahl wieder zur Lampe zurückkehrt, hat sich diese nochmals um das gleiche Stück verschoben.

Wir erkennen, daß für den Beobachter auf dem Bahnsteig das Licht offensichtlich einen größeren Weg zurückgelegt hat als für den Beobachter im Zug. Andererseits wissen wir aber, daß die Lichtgeschwindigkeit absolut ist, sie ist für den Reisenden im Zug wie auch für denjenigen, der auf dem Bahnsteig steht die gleiche. Das zwingt uns aber zu folgendem Schluß: Auf dem Bahnsteig ist zwischen Aussendung und Rückkehr des Lichtstrahls eine längere Zeit vergangen als im Zug!

Es ist nicht schwer, das Verhältnis dieser Zeiten zu berechnen.

Angenommen, der Beobachter auf dem Bahnsteig stellt fest, daß zwischen Aussenden und Rückkehr des Lichtstrahls 10 s verstrichen sind. In diesen 10 s hat das Licht eine Strecke von $300\,000 \times 10 = 3\,000\,000$ km zurückgelegt. Hieraus folgt, daß jede der Seiten AB und BC des gleichschenkligen Dreiecks ABC 1500000 km lang ist. Die Seite AC ist offensichtlich dem Weg gleich, den der Zug in 10 s zurücklegt, nämlich $240\,000 \times 10 = 2\,400\,000$ km.

Jetzt kann man leicht die Höhe des Wagens bestimmen, die gleich der Höhe BD des gleichschenkligen Dreiecks ABC ist.

Im rechtwinkligen Dreieck ist bekanntlich das Quadrat über der Hypotenuse (AB) gleich der Summe der Quadrate über den Katheten (AD und BD). Aus der Gleichung $AB^2 = AD^2 + BD^2$ ergibt sich für die Höhe des Wagens $BD = \sqrt{AB^2 - AD^2} = 1\,500\,000^2 - 1\,200\,000^2 = 900\,000$ km, eine ganz beachtliche Höhe also, die uns aber bei den astronomischen Ausmaßen des Einstein-Zuges nicht weiter in Erstaunen setzt.

Der Weg, den der Strahl vom Boden bis zur Decke und wieder zurück durchlaufen muß, ist, vom Gesichtspunkt des Reisenden aus, gleich der doppelten Höhe, das sind $2 \times 900\,000 = 1\,800\,000$ km. Für das Durchlaufen dieses Weges benötigt das

$$\text{Licht } \frac{1\,800\,000}{300\,000} = 6 \text{ s.}$$

Die Uhren gehen systematisch nach

Während also auf dem Bahnhof 10 s vergehen, sind es im Zug nur 6 s. Das bedeutet, wenn nach Bahnhofszeit seit Abfahrt des Zuges eine Stunde abgelaufen ist, sind nach der Uhr des Rei-

senden nur $60 \times \frac{6}{10} = 36$ Minuten vergangen. Die Uhr des

Reisenden geht also gegenüber der Bahnhofsuhr 24 min nach.

Es ist leicht einzusehen, daß die Uhr um so mehr nachgeht, je größer die Geschwindigkeit des Zuges ist.

In der Tat, je näher die Geschwindigkeit des Zuges der Lichtgeschwindigkeit kommt, desto mehr nähert sich die Länge der Kathete AD , das ist die vom Zug zurückgelegte Strecke, der Hypotenuse AB , d. h. dem in der gleichen Zeit vom Licht zurückgelegten Weg. Entsprechend verringert sich das Verhältnis zwischen der Kathete BD und der Hypotenuse. Dieses Verhältnis ist aber gleichzeitig das Verhältnis zwischen der Zeit im Zug und der auf dem Bahnhof. Wenn man also die Geschwindigkeit des Zuges immer mehr der Lichtgeschwindigkeit annähert, kann man erreichen, daß, während nach Bahnofszeit eine Stunde vergeht, das entsprechende Zeitintervall im Zug beliebig klein wird. Beträgt die Geschwindigkeit des Zuges z. B. das 0,9999-fache der Lichtgeschwindigkeit, so vergeht im Zug nur eine Minute, wenn nach Bahnofszeit eine Stunde gemessen wird.

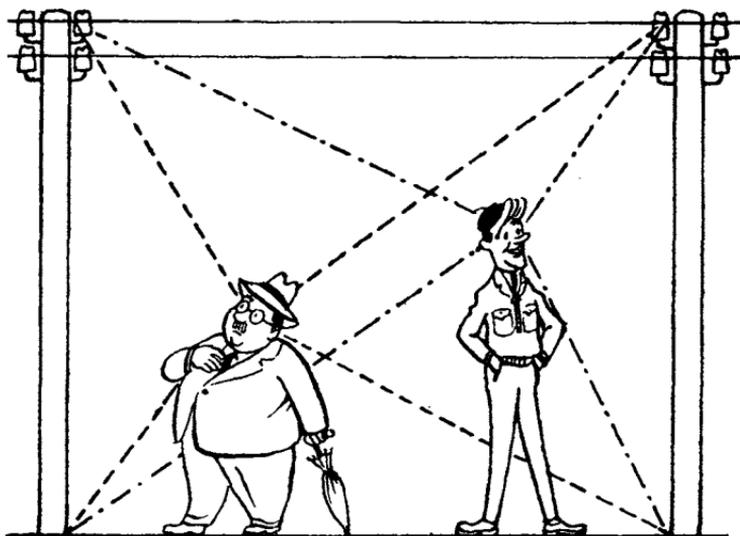
So bleibt also jede in Bewegung befindliche Uhr hinter einer ruhenden zurück. Widerspricht aber dieses Resultat nicht dem Relativitätsprinzip der Bewegung, von dem wir ausgingen; bedeutet es vielleicht, daß eine Uhr, die schneller als alle anderen geht, sich im Zustand absoluter Ruhe befindet?

Das ist deshalb nicht der Fall, weil der Vergleich der Uhren im Zug mit der auf dem Bahnsteig unter völlig ungleichen Bedingungen stattfand. Es waren ja nicht nur zwei Uhren, sondern drei Uhren am Vergleich beteiligt! Der Reisende vergleicht seine Uhr mit zwei verschiedenen Uhren auf verschiedenen Stationen. Würde man umgekehrt im ersten und letzten Wagen des Zuges Uhren anbringen, so würde ein Beobachter auf einem der Bahnhöfe, wenn er die Angaben der Bahnhofsuhr mit dem Stand der Uhren im vorbeifahrenden Zug vergliche, entdecken, daß die Bahnhofsuhr systematisch nachgeht.

In diesem Fall nämlich, wenn sich der Zug geradlinig und gleichförmig bezüglich des Bahnsteiges bewegt, wäre man berechtigt, den Zug als ruhend anzusehen und die Station als in Bewegung befindlich. Die Naturgesetze müssen im Zug und auf dem Bahnsteig die gleichen sein.

Jeder Beobachter, der sich bezüglich seiner Uhr im Ruhezustand befindet, stellt fest, daß andere Uhren, die sich in bezug auf ihn selbst bewegen, vorgehen, und das um so mehr, je größer ihre Geschwindigkeit ist.

Die Dinge liegen hier analog wie in dem Fall, in dem jeder von zwei Beobachtern, die neben zwei Telegraphenmasten stehen, seinen Telegraphenmast unter einem größeren Winkel sieht als den Mast des anderen.



Die Zeitmaschine

Wir wollen jetzt annehmen, daß sich der Einstein-Zug nicht geradlinig, sondern kreisförmig bewegt und nach einer bestimmten Zeit wieder auf der Ausgangsstation eintrifft. Wie wir bereits wissen, wird der Reisende nun entdecken, daß seine Uhr nachgeht, und zwar um so mehr, je schneller der Zug gefahren ist. Erhöht man die Geschwindigkeit des Einstein-Zuges, so kann man erreichen, daß, während für den Reisenden ein einziger Tag verflossen ist, für das Bahnhofspersonal viele Jahre vergangen sind. Kehrt der Reisende nach Ablauf dieses Tages (nach seiner Uhr) zum Ausgangsbahnhof der kreisförmigen Bahnstrecke zurück, so wird er erfahren, daß alle seine Verwandten und Bekannten längst gestorben sind.

Im Gegensatz zur Reise zwischen zwei Stationen, auf der der Reisende seine Uhr mit verschiedenen Uhren verglich, vergleicht er jetzt bei seiner Fahrt auf einer Kreisbahn nicht die Angaben von drei, sondern nur von zwei Uhren, nämlich der Uhr im Zug und der auf der Ausgangsstation.

Besteht hier irgendein Widerspruch zum Relativitätsprinzip? Könnte man vielleicht annehmen, daß sich der Reisende in Ruhe befindet, während sich die Station auf einer Kreisbahn mit der Geschwindigkeit des Einstein-Zuges bewegt? Denn dann käme man zu der Folgerung, daß, während für den Menschen auf dem Bahnsteig ein Tag vergangen ist, der Reisende im Zug mehrere Jahre verbracht hat. Eine solche Überlegung würde jedoch nicht richtig sein, und zwar aus folgenden Gründen.

Aus dem Vorangegangenen wissen wir, daß man einen Körper nur dann als ruhend ansehen kann, wenn auf ihn keine Kräfte einwirken. Nun gibt es allerdings nicht nur eine, sondern unendlich viele „Ruhen“, und zwei ruhende Körper können sich bekanntlich in bezug aufeinander geradlinig und gleichförmig bewegen. Aber die Uhr im Einstein-Zug, der auf einer Kreisbahn dahinrast, wird ganz offensichtlich von der Fliehkraft beeinflusst, und deshalb kann man sie auf keinen Fall als ruhend ansehen. In diesem Fall ist der Unterschied in den Angaben zwischen der ruhenden Bahnhofsuhr und der Uhr im Zug absolut.

Wenn zwei Menschen mit Uhren, die die gleiche Zeit anzeigen, auseinandergelassen und sich nach einiger Zeit wieder treffen, so ist es nach der Uhr desjenigen später, der sich in Ruhe oder in gleichförmiger geradliniger Bewegung befunden hat, also nach derjenigen Uhr, auf die keine Kräfte eingewirkt haben.

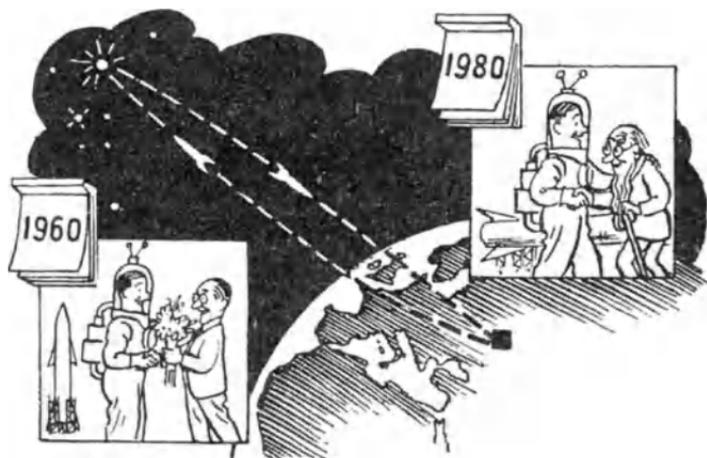
Eine Reise auf einem kreisförmigen Weg mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit eröffnet uns, wenn auch nur in beschränktem Umfang, die prinzipielle Möglichkeit, die „Zeitmaschine“ von Wells zu verwirklichen: Wieder zur Ausgangsstation zurückgekehrt, würden wir feststellen, daß wir in die Zukunft geraten sind. Mit dieser Zeitmaschine könnten wir zwar in die Zukunft reisen, nicht aber in die Vergangenheit zurück. Darin besteht der große Unterschied zur Zeitmaschine von Wells.

Es wäre vergeblich, darauf zu hoffen, daß die weitere Entwicklung der Wissenschaften eine Reise in die Vergangenheit ermöglichen könnte. Andernfalls müßte man die prinzipielle Möglichkeit ganz sinnloser Situationen anerkennen. So könnte sich z. B. ein Mensch, der in die Vergangenheit zurückkehrte, in die absurde Lage versetzt sehen, daß seine Eltern noch gar nicht geboren sind.

Eine Reise in die Zukunft aber bringt nur scheinbare Widersprüche mit sich.

Reise zu den Sternen

Es gibt Sterne, die beispielsweise von uns so weit entfernt sind, daß das Licht bis dorthin 40 Jahre benötigt. Weil man nun weiß, daß es eine Geschwindigkeit, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit, nicht gibt, müßte man zu dem Schluß kommen, daß man diese Sterne in nicht weniger als 40 Jahren erreichen könnte. Eine solche Schlußfolgerung wäre aber falsch, weil sie nicht die Änderung der Zeit in Abhängigkeit von der Bewegung berücksichtigt.



Angenommen, wir würden in einer Einstein-Rakete mit einer Geschwindigkeit von 240 000 km/s zu einem solchen Stern fliegen.

Für die Menschen auf der Erde würde diese Reise $\frac{300\,000 \times 40}{240\,000}$

= 50 Jahre dauern.

Für uns in der Rakete aber verkürzte sich diese Zeit bei der genannten Geschwindigkeit im Verhältnis 10:6. Folglich würden

wir den Stern nach $\frac{6}{10} \times 50 = 30$ Jahren erreichen und nicht erst nach 50 Jahren.

Wenn man die Geschwindigkeit der Rakete vergrößerte, so daß sie der Lichtgeschwindigkeit nahekäme, könnte man die Zeit, die man benötigt, um diesen fernen Stern zu erreichen, beliebig verkürzen. Theoretisch wäre es bei genügend hoher Geschwindigkeit möglich, in einer Minute zu dem Stern zu gelangen und

wieder zur Erde zurückzukehren. Auf der Erde wären dann allerdings volle 80 Jahre vergangen.

Es könnte nun so scheinen, als ob sich auf diese Weise eine Möglichkeit für die Verlängerung des menschlichen Lebens ergäbe. Das ist nur vom Standpunkt der anderen Menschen zutreffend, weil der Mensch in Abhängigkeit von „seiner“ Zeit altert. Leider erweist sich diese Perspektive jedoch bei genauerer Betrachtung als äußerst armselig.

Das beginnt schon damit, daß der menschliche Organismus eine Beschleunigung, die die irdische Schwerebeschleunigung wesentlich überschreitet, nicht lange aushalten kann. Deshalb würde man, um bis zu einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit zu gelangen, eine sehr lange Zeit benötigen. Berechnungen zeigen, daß bei einer Reise von einem halben Jahr und mit einer Beschleunigung in der Größenordnung der Erdbeschleunigung insgesamt ein halber Monat gewonnen werden könnte. Wird die Reise ausgedehnt, nimmt der Zeitgewinn rasch zu. Würde man sich ein Jahr in der fliegenden Rakete aufhalten, so könnten schon $1\frac{1}{2}$ Jahre gewonnen werden, bei einer zweijährigen Reise 28 Jahre, und bleibt man 3 Jahre in dieser Rakete, so würden auf der Erde 360 Jahre vergehen.

Diese Zahlen erscheinen eigentlich ziemlich erfreulich. Ungünstiger steht es aber mit dem Aufwand an Energie. Der Energieverbrauch einer Rakete mit der äußerst bescheidenen Masse von einer Tonne würde bei einer Fluggeschwindigkeit von 260 000 km/s (eine solche Geschwindigkeit ist nötig, damit die Zeit „verdoppelt“ wird, d. h., damit man erreicht, daß während eines Reisejahres auf der Erde zwei Jahre vergehen) 250 000 000 000 000 Kilowattstunden betragen. Eine solche Energiemenge wird aber auf der Erde nur im Verlauf vieler Jahre erzeugt.

Dabei wurde aber nur die Energie der Rakete während des Fluges in Betracht gezogen und nicht berücksichtigt, daß unser Flugkörper erst einmal auf die Geschwindigkeit von 260 000 km/s gebracht werden muß. Am Ende der Reise muß dann die Rakete wieder gebremst werden, damit sie gefahrlos landen kann. Wieviel Energie wäre dafür erst erforderlich!

Selbst wenn man einen Treibstoff zur Verfügung hätte, dessen Strahl aus dem Düsenantrieb mit der größtmöglichen Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit, ausströmt, so würde man eine Energie benötigen, die 200mal größer wäre als die oben berechnete. Man würde also so viel Energie verbrauchen, wie die Menschheit insgesamt in einigen Jahrzehnten erzeugt. In Wirk-

lichkeit beträgt aber die Ausstrahlungsgeschwindigkeit weniger als den zehntausendsten Teil der Lichtgeschwindigkeit. Dadurch würde der Energieverbrauch für unseren erdachten Flug unwahrscheinlich groß werden.

Die Gegenstände verkürzen sich

So wurde also die Zeit, wovon wir uns soeben überzeugt haben, von der stolzen Höhe eines absoluten Begriffs herabgestürzt. Sie hat nur einen relativen Sinn, der die genaue Angabe des Laboratoriums notwendig macht, in dem die Zeit gemessen wird. Wenden wir uns nun wieder dem Raum zu. Schon vor der Beschreibung des Michelsonschen Versuches war klar geworden, daß der Raum relativ ist. Trotz dieser Relativität des Raumes haben wir jedoch den Abmessungen der Körper einen absoluten Charakter zugeschrieben, d. h., wir haben angenommen, daß die Abmessungen Eigenschaften eines bestimmten Körpers sind, die nicht von dem Laboratorium abhängen, in dem die Beobachtung stattfindet. Die Relativitätstheorie zwingt uns jedoch, diese Annahme aufzugeben. Sie beruht nämlich ebenso wie die Vorstellung über den absoluten Charakter der Zeit auf einem Vorurteil und ist dadurch entstanden, daß wir es immer mit Geschwindigkeiten zu tun haben, die im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit winzig klein sind.

Wir wollen uns vorstellen, daß der Einstein-Zug an einem Bahnsteig vorbeifahre, der eine Länge von 2400000 km hat.

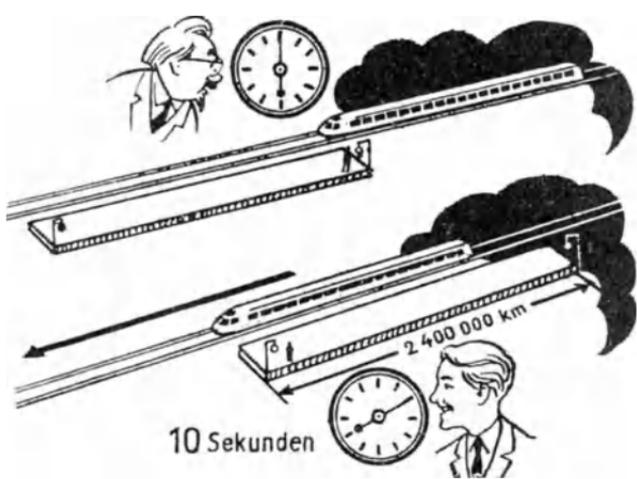
Wird der Bahnsteig nach der Meinung der Reisenden im Einstein-Zug die gleiche Länge haben? Von einem Ende des Bahnsteiges bis zum anderen benötigt der Einstein-Zug nach der Bahnhof-

uhr $\frac{2400000}{240000} = 10$ s. Aber auch die Reisenden haben Uhren,

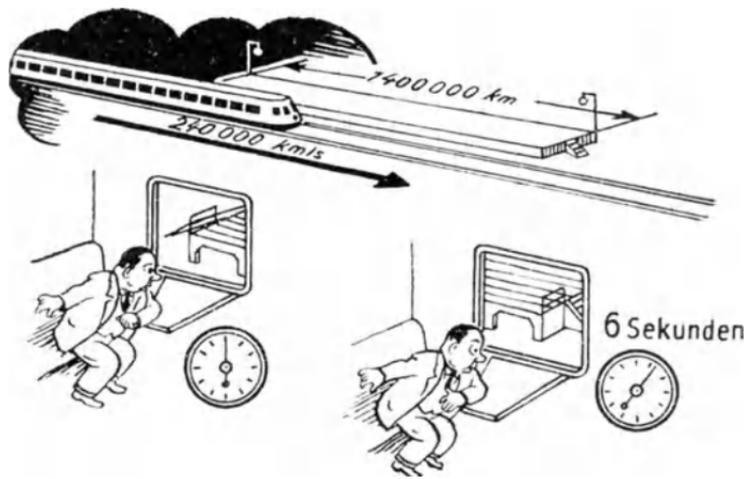
und danach gemessen braucht der Zug eine kürzere Zeit, um am Bahnsteig vorbeizufahren. Wie wir schon wissen, dauert es 6 s. Hieraus werden die Reisenden mit vollem Recht schließen, daß die Länge des Bahnsteiges nicht 2400000 km, sondern $6 \times 240000 = 1440000$ km beträgt.

Man sieht also, daß die Länge des Bahnsteiges vom Standpunkt eines in bezug auf ihn ruhenden Beobachters größer ist als vom Standpunkt eines Beobachters aus, in bezug auf den sich der Bahnsteig bewegt. Jeder sich bewegende Körper verkürzt sich in der Richtung seiner Bewegung.

Jedoch ist diese Verkürzung keineswegs ein Kennzeichen für die Absolutheit der Bewegung: Begibt man sich in ein Laboratorium, in bezug auf das der Körper ruht, so verlängert er sich

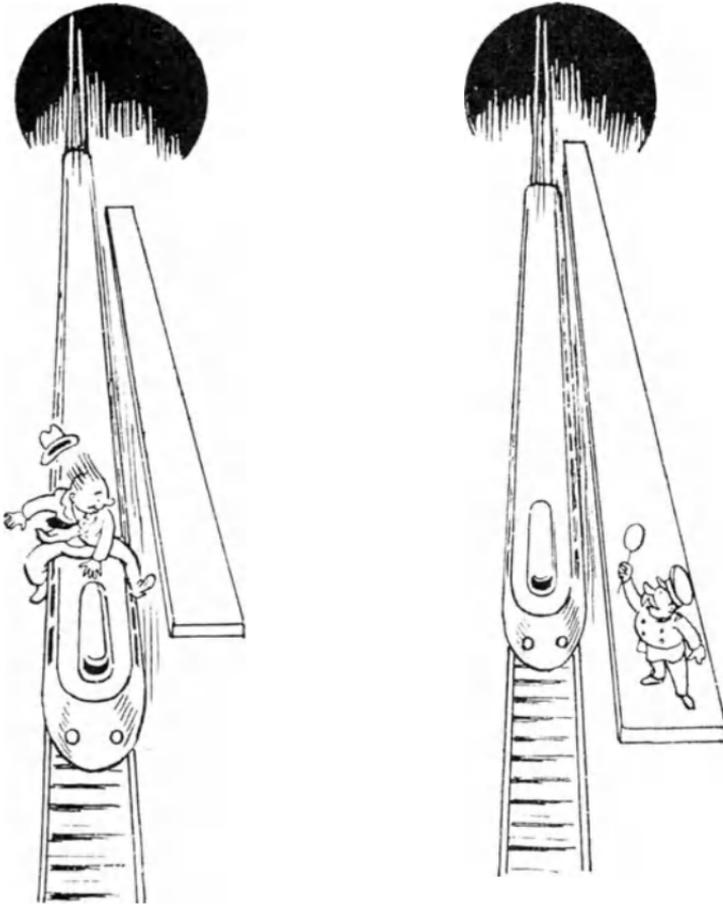


wieder. Genauso wie die Reisenden feststellen, daß sich der Bahnsteig verkürzt, sehen die auf dem Bahnsteig stehenden Menschen den Einstein-Zug verkürzt (im Verhältnis 6:10).



Das ist auch keine optische Täuschung. Das gleiche Resultat würde jedes beliebige Instrument anzeigen, das man zur Längenmessung verwenden kann.

Nachdem wir erkannt haben, daß sich die Gegenstände verkürzen, müssen wir auch unsere Überlegungen auf Seite 30 über die Zeitunterschiede beim Öffnen der Türen im Einstein-Zug korrigieren. Denn dort gingen wir bei der Berechnung der Zeitpunkte, in denen sich die Türen, vom Bahnsteig aus gesehen, öffnen, davon aus, daß der fahrende Zug die gleiche Länge wie der stehende habe. Tatsächlich verkürzt sich der Zug aber für die Menschen auf dem Bahnsteig. Dementsprechend wird nach der Bahnsteiguhr der Zeitunterschied zwischen dem Öffnen der Türen in Wirklichkeit nicht 40 s, sondern $\frac{6}{10} \times 40 = 24$ s betragen.



Für unsere dann weiter gezogenen Schlußfolgerungen ist diese Korrektur selbstverständlich unwesentlich.

Die Abbildungen auf Seite 48 zeigen den Bahnsteig und den Einstein-Zug, wie diese ein Beobachter vom Bahnsteig bzw. vom Zug aus sehen würde. Man erkennt, daß auf dem rechten Bild der Bahnsteig länger ist als der Zug, auf dem linken Bild der Zug länger als der Bahnsteig.

Welches von diesen Bildern entspricht nun der Wirklichkeit?

Diese Frage hat genausowenig Sinn wie die Frage über die Größe des Hirten und der Kuh auf Seite 8.

Das eine wie das andere Bild stellt die objektive Wahrheit dar, nur von verschiedenen Gesichtspunkten aus „fotografiert“.

Geschwindigkeit mit Launen

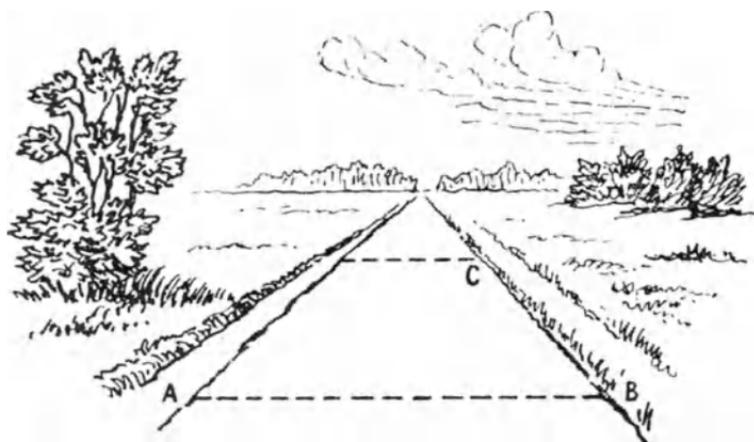
Welche Geschwindigkeit hat ein Reisender relativ zum Bahnkörper, wenn er mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h im Zug nach vorn geht und der Zug mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h fährt? Es ist uns klar, daß die Geschwindigkeit des Reisenden in bezug auf den Bahnkörper $50 + 5 = 55$ km/h beträgt. Unsere Überlegung beruht auf dem Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten, und an der Gültigkeit dieses Gesetzes gibt es für uns keinen Zweifel. Denn in der Tat legt ja der Zug in einer Stunde 50 km zurück und der Mensch im Zug nochmals 5 km. Das sind gerade die 55 km, von denen die Rede war.

Andererseits ist aber verständlich, daß auf Grund der Existenz der Grenzgeschwindigkeit das Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten nicht universell auf große und kleine Geschwindigkeiten anwendbar ist. Wenn sich nämlich der Reisende im Einstein-Zug mit einer Geschwindigkeit von 100000 km/s bewegen würde, so könnte seine Geschwindigkeit in bezug auf den Gleiskörper nicht $240000 + 100000 = 340000$ km/s betragen, weil diese Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit, die ja die Grenze bedeutet, übertreffen würde und deshalb in der Natur nicht existieren kann.

So ist also das Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten, das im täglichen Leben angewendet wird, ungenau. Es gilt lediglich für Geschwindigkeiten, die im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit hinreichend klein sind.

Der Leser, dem bereits eine Reihe Paradoxa der Relativitätstheorie vertraut wurden, wird leicht begreifen, warum die eigent-

lich so klaren Überlegungen, mit denen das Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten hergeleitet wurde, nicht anwendbar sind. Es wurden ja die Strecken addiert, die in einer Stunde der Zug relativ zum Bahnkörper und der Reisende relativ zum Zug zurücklegt. Die Relativitätstheorie lehrt aber, daß man diese



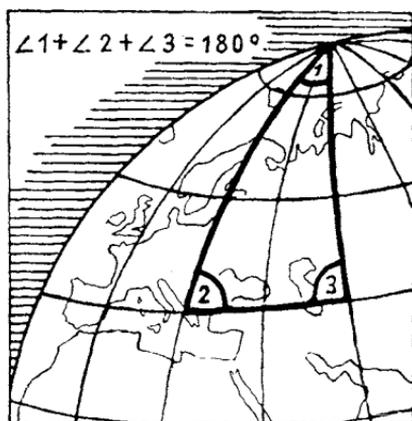
Strecken nicht einfach als gleichwertig hintereinanderlegen kann. Das wäre genauso sinnlos, als wenn man, um den Flächeninhalt des auf der obigen Abbildung dargestellten Wegstückes zu bestimmen, die Längen der Strecken AB und BC multiplizieren würde, weil man dabei vergessen hätte, daß infolge der Perspektive die Strecken verzerrt sind. Außerdem mußte zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Reisenden bezüglich des Bahnkörpers der Weg ermittelt werden, den der Reisende in einer Stunde Bahnfahrzeit zurücklegte, während für die Bestimmung seiner Geschwindigkeit im Zug die Zugzeit zugrunde gelegt wurde, und diese Zeiten sind, wie wir wissen, ganz und gar nicht die gleichen.

Aus all dem folgt, daß Geschwindigkeiten, von denen wenigstens eine der Lichtgeschwindigkeit nahe kommt, ganz anders addiert werden, als wir es gewöhnt sind.

Man kann diese paradoxe Art der Addition von Geschwindigkeiten schon aus dem Experiment erkennen, wenn man zum Beispiel die Lichtausbreitung in fließendem Wasser beobachtet (über die schon oben gesprochen wurde). Die Tatsache, daß die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung im fließenden Wasser nicht gleich der Summe der Lichtgeschwindigkeit im ruhenden

Wasser und der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers ist, sondern unter dieser Summe liegt, ist eine direkte Folge der Relativitätstheorie.

$$\angle 1 + \angle 2 + \angle 3 = 180^\circ$$



Besonders eigenartig addieren sich Geschwindigkeiten dann, wenn eine von ihnen der Lichtgeschwindigkeit genau gleich ist. Wie wir wissen, hat diese Geschwindigkeit die Eigenschaft, sich nicht zu verändern, wie sich ein Beobachter auch bewegen mag. Mit anderen Worten, welche Geschwindigkeit man auch zu den 300000 km/s hinzufügt, man wird immer wieder die gleiche Geschwindigkeit, nämlich 300000 km/s erhalten.

Es gibt eine einfache Analogie zu unserer Feststellung, daß die übliche Additionsregel bei Geschwindigkeiten nicht anwendbar ist.

Bekanntlich beträgt in einem ebenen Dreieck (s. Bild oben links) die Winkelsumme zwei Rechte. Man denke sich nun aber ein Dreieck, das auf die Erdoberfläche gezeichnet ist (s. Bild oben rechts). Wegen der Kugelgestalt der Erde ist die Winkelsumme in diesem Dreieck schon größer als zwei Rechte. Dieser Unterschied wird aber nur dann bemerkbar, wenn die Abmessungen des Dreiecks mit denen der Erde vergleichbar sind.

Ebenso, wie man für die Ausmessung kleiner Gebiete der Erdoberfläche die Regeln der Planimetrie anwenden kann, ist es analog möglich, für die Addition kleiner Geschwindigkeiten die üblichen Additionsregeln zu benutzen.

Arbeit verändert die Masse

Masse

Angenommen, wir wollen einen ruhenden Körper mit einer bestimmten Geschwindigkeit in Bewegung setzen. Dazu müssen wir auf ihn eine Kraft einwirken lassen. Wird die Bewegung des Körpers nicht durch Nebenkräfte, etwa die Reibungskraft, behindert, so wird der Körper in Bewegung geraten, und seine Geschwindigkeit wird ständig zunehmen. Nach einer bestimmten Zeit wird dann die Geschwindigkeit den von uns gewünschten Wert erreicht haben. Dabei wird man finden, daß man für verschiedene Körper verschiedene Zeiten benötigt, um ihnen bei gleicher Kraftwirkung eine bestimmte Geschwindigkeit mitzuteilen.

Um die Reibung auszuschalten, wollen wir uns vorstellen, daß sich im Weltraum zwei gleichgroße Kugeln befinden, die eine aus Blei, die andere aus Holz. Jede dieser Kugeln soll so lange mit der gleichen Kraft angeschleppt werden, bis sie eine gewisse Geschwindigkeit, sagen wir 10 km in der Stunde, erreicht hat.

Es ist klar, daß man, um dieses Ergebnis zu erzielen, die Kraft auf die Bleikugel eine längere Zeit wirken lassen muß als auf die Holzkugel. Man charakterisiert diesen Sachverhalt, indem man sagt, daß die Bleikugel eine größere Masse hat als die Holzkugel. Weil nun unter der Einwirkung einer konstanten Kraft die Geschwindigkeit proportional zur Zeit wächst, kann man als Maß für die Masse das Verhältnis der Zeit, die zur Erreichung der gegebenen Geschwindigkeit aus dem Zustand der Ruhe erforderlich ist, zu dieser Geschwindigkeit selbst einsetzen. Die Masse ist in diesem Verhältnis proportional, wobei der Proportionalitätsfaktor von der Kraft abhängt, die die Bewegung verursacht.

Die Masse wächst

Die Masse ist eine der wichtigsten Eigenschaften eines jeden Körpers. Wir haben uns daran gewöhnt, daß die Masse eines Körpers immer konstant bleibt und vor allem nicht von der Geschwindigkeit abhängt. Das folgt aus unserer vorangegangenen Behauptung, daß die Geschwindigkeit bei Einwirkung einer

konstanten Kraft direkt proportional der Zeit wächst, in der diese Kraft wirkt.

Diese Behauptung beruht jedoch auf der üblichen Regel der Addition der Geschwindigkeiten, und es wurde gerade nachgewiesen, daß diese Regel nicht in allen Fällen anwendbar ist.

Wie errechnen wir denn eigentlich die Geschwindigkeit, die der Körper am Ende der zweiten Sekunde nach Beginn der Kraftereinwirkung hat? Wir addieren zu der Geschwindigkeit, die der Körper nach der ersten Sekunde hatte, die Geschwindigkeit, die er in der zweiten Sekunde erlangt hat, und das nach der gewöhnlichen Regel der Addition der Geschwindigkeiten.

So kann man aber nur verfahren, wenn die erreichte Geschwindigkeit nicht der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar ist. Ist letzteres der Fall, so ist es nicht mehr zulässig, die alte Regel anzuwenden. Addiert man aber die Geschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Relativitätstheorie, dann liegt das Ergebnis immer etwas niedriger als bei Benutzung der alten Regel. Das bedeutet, daß bei großen Werten der erreichten Geschwindigkeit diese nicht mehr proportional zur Zeit der Kraftereinwirkung wächst, sondern langsamer. Das ist auch verständlich, da ja die Grenzgeschwindigkeit existiert.

In dem Maße, in dem sich die Geschwindigkeit eines Körpers der Lichtgeschwindigkeit nähert, wächst sie bei unveränderter Kraft immer langsamer und langsamer, so daß die Grenzgeschwindigkeit niemals überschritten wird.

Solange es noch möglich ist zu behaupten, daß die Geschwindigkeit proportional zur Zeit der Kraftereinwirkung wächst, kann die Masse als unabhängig von der Geschwindigkeit angesehen werden. Sobald die Geschwindigkeit jedoch der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar wird, verschwindet die Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und Zeit, und die Masse wird von der Geschwindigkeit abhängig. Da die Zeit der Beschleunigung unbegrenzt zunehmen, die Geschwindigkeit eine bestimmte Grenze aber nicht übersteigen kann, erkennt man, daß jetzt die Masse gemeinsam mit der Geschwindigkeit wächst und unendlich groß wird, wenn die Geschwindigkeit des Körpers die Lichtgeschwindigkeit erreicht.

Berechnungen zeigen, daß die Masse eines Körpers bei Bewegung um so viele Male wächst, wie sich seine Länge bei der Bewegung verkürzt. So ist also die Masse des Einstein-Zuges, der sich mit der Geschwindigkeit von 240000 km/s bewegt, $\frac{10}{6}$ mal größer als die Masse des ruhenden Zuges.

Natürlich ist es ganz klar, daß wir bei gewöhnlichen Geschwindigkeiten, die im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit klein sind, die Änderung der Massen ebenso vernachlässigen können wie die Abhängigkeit der Abmessungen eines Körpers von der Geschwindigkeit oder die Abhängigkeit des Zeitabstandes zwischen zwei Ereignissen von der Geschwindigkeit, mit der sich ein Beobachter dieser Ereignisse bewegt.

Die aus der Relativitätstheorie folgende Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit kann man aber unmittelbar experimentell durch die Beobachtung schneller Elektronen nachprüfen.

Unter modernen experimentellen Bedingungen sind Elektronen, die sich mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen, keine Seltenheit, sondern eine alltägliche Sache. In speziellen Beschleunigern werden Elektronen auf Geschwindigkeiten gebracht, die sich von der Lichtgeschwindigkeit um weniger als 30 km/s unterscheiden.

Auf diese Weise ist die moderne Physik in der Lage, die Masse der auf eine ungeheure Geschwindigkeit gebrachten Elektronen mit der Masse ruhender Elektronen zu vergleichen. Die Versuchsergebnisse bestätigen die aus den Prinzipien der Relativitätstheorie folgende Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit vollständig.

Wieviel kostet ein Gramm Licht?

Die Zunahme der Masse eines Körpers steht in engem Zusammenhang mit der auf diesen Körper verwendeten Arbeit: Sie ist proportional der Arbeit, die benötigt wird, um ihn in Bewegung zu setzen. Es ist jedoch nicht notwendig, daß die Arbeit den Körper in Bewegung setzt. Jede beliebige auf den Körper angewendete Arbeit, jede Vergrößerung seiner Energie vergrößert seine Masse. So hat z. B. ein erhitzter Körper mehr Masse als ein kalter, eine zusammengepreßte Feder mehr Masse als eine entspannte. Allerdings ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der Massenänderung und der Energieänderung winzig klein: Um die Masse eines Körpers um ein Gramm zu erhöhen, müßte man ihm eine Energie von 25 Millionen Kilowattstunden zuführen.

Aus diesem Grund ist die Massenänderung unter gewöhnlichen Bedingungen völlig unbedeutend, und sie entzieht sich auch den genauesten Messungen. Erhitzt man beispielsweise eine Tonne

Wasser von 0°C bis zum Siedepunkt, so beträgt die Vergrößerung der Masse etwa ein fünfmillionstel Gramm.

Verbrennt man in einem geschlossenen Ofen eine Tonne Kohle, so ist die Masse der Verbrennungsprodukte nach der Abkühlung lediglich um ein dreitausendstel Gramm kleiner als die Masse der Kohle und des Sauerstoffs, aus denen die Verbrennungsprodukte zusammengesetzt waren. Diese fehlende Masse wurde durch die bei der Verbrennung frei gewordene Wärme abgeführt.

Jedoch kennt die moderne Physik auch Erscheinungen, bei denen die Massenänderung eine beachtliche Rolle spielt. Das ist der Fall, wenn beim Zusammenstoß von Atomkernen andere Kerne entstehen. So bilden sich z. B. beim Zusammenstoß eines Wasserstoffatomkerns und eines Lithiumatomkerns zwei Heliumatomkerne, und die Masse ändert sich um $\frac{1}{400}$ ihres vorherigen Wertes.

Es wurde schon erwähnt, daß man für die Vergrößerung der Masse eines Körpers um ein Gramm eine Energie von 25 Millionen Kilowattstunden benötigt. Hieraus folgt, daß die Energie, die bei der Umwandlung von 1 g eines Wasserstoff-Lithiumgemisches in Helium frei wird, den vierhundertsten Teil davon beträgt, also $\frac{25000000}{400} = 62500$ Kilowattstunden.

Stellen wir uns nun einmal die Frage, welcher in der Natur vorkommende Stoff (gewichtsmäßig gerechnet) am teuersten ist. Im allgemeinen wird angenommen, daß es das Radium ist, denn ein Gramm davon hat kürzlich, wie aus der internationalen Literatur hervorgeht, noch etwa 25000 Rubel gekostet. Demgegenüber wollen wir einmal den Preis eines anderen Stoffes bestimmen, den des – Lichtes.

Bei einer elektrischen Glühlampe erhält man nur den zwanzigsten Teil der verbrauchten Energie in Form von sichtbarem Licht. Deshalb entspricht 1 g Licht der Menge an Arbeit, die 20mal größer ist als 25 Kilowattstunden, das sind 500 Millionen Kilowattstunden. Das ergibt, wenn wir für 10 Kilowattstunden eine Kopeke rechnen, 500000 Rubel; 1 g Licht ist also 20mal teurer als 1 g Radium.

Schlußbetrachtung

Exakte und überzeugende Experimente zwingen uns also, die Richtigkeit der Relativitätstheorie anzuerkennen, die erstaunliche Eigenschaften der uns umgebenden Welt enthüllt, Eigenschaften, deren Existenz uns beim ersten, genauer gesagt, beim oberflächlichen Studium entgehen.

Wir sahen, welche tiefgehende und grundlegende Veränderungen die Relativitätstheorie an fundamentalen Begriffen und Vorstellungen hervorbringt, die sich die Menschheit im Verlauf der Jahrhunderte aus den Erfahrungen des täglichen Lebens gebildet hatte.

Bedeutet das nun den völligen Zusammenbruch der gewohnten Vorstellungen? Bedeutet das nicht, daß die gesamte Physik, die vor der Aufstellung des Relativitätsprinzips geschaffen wurde, abgetan ist wie ein alter Schuh, der seine Dienste geleistet hat, jetzt aber nicht mehr zu gebrauchen ist?

Wenn dem so wäre, so würden alle wissenschaftlichen Untersuchungen zwecklos sein, denn man kann sich niemals der Überzeugung hingeben, daß in der Zukunft nicht eine neue Lehre eine frühere völlig überholt.

Angenommen, ein Reisender in einem Zug, aber nicht im Einstein-Zug, sondern in einem gewöhnlichen Schnellzug, käme auf die Idee, seine Uhr nach den Regeln der Relativitätstheorie zu korrigieren, weil er andernfalls befürchten würde, daß seine Uhr im Vergleich zur Bahnhofsuhr nachginge. Ein solcher Reisender würde sicherlich ausgelacht werden. Denn abgesehen davon, daß die Korrektur nur einen mikroskopisch kleinen Teil einer Sekunde betragen würde, hätte doch in Wirklichkeit jedes Rütteln des Zuges auch auf die beste Uhr einen entschieden größeren Einfluß.

Ein Chemieingenieur, der es bezweifelte, daß die Masse des Wassers beim Erhitzen konstant bleibt, ist sicher nicht ganz bei Verstand. Hingegen müßte ein Physiker, der Zusammenstöße von Atomkernen beobachtete und dabei die Massenänderung bei der Kernumwandlung nicht berücksichtigte, wegen Unwissenheit aus dem Laboratorium gejagt werden.

Die Konstrukteure konstruieren ihre Motoren nach den Gesetzen der alten Physik und werden es auch immer so halten,

weil Korrekturen nach der Relativitätstheorie einen viel geringeren Einfluß auf die Maschine hätten als z. B. eine Mikrobe, die auf dem Schwungrad säße. Ein Physiker jedoch, der schnelle Elektronen beobachtet, muß die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit berücksichtigen.

Die Relativitätstheorie widerlegt also nicht die alten wissenschaftlichen Begriffe und Vorstellungen, sondern vertieft sie und bestimmt die Grenzen, innerhalb deren sie angewendet werden können, ohne daß man zu falschen Resultaten kommt. Keines der Naturgesetze, die von den Physikern vor der Entstehung der Relativitätstheorie entdeckt wurden, wird außer Kraft gesetzt, sondern es werden nur die Grenzen seiner Anwendbarkeit klar umrissen.

Das Verhältnis zwischen der Physik, die die Relativitätstheorie berücksichtigt – sie wird auch relativistische Physik genannt –, im Gegensatz zur alten, der klassischen Physik ist etwa das gleiche wie zwischen der höheren Geodäsie, die die Kugelgestalt der Erde berücksichtigt, und der niederen Geodäsie, die die Kugelgestalt nicht in Rechnung zu stellen braucht. Wie die höhere Geodäsie vom relativen Charakter der Vertikalen ausgehen muß, so muß die relativistische Physik die Relativität der Abmessungen eines Körpers und des Zeitintervalls zwischen zwei Ereignissen in Betracht ziehen. Für die klassische Physik existiert diese Relativität nicht.

Ähnlich wie sich die höhere Geodäsie aus der niederen entwickelt hat, so ist die relativistische Physik eine Fortentwicklung und Erweiterung der klassischen Physik.

Man kann von den Formeln der sphärischen Geometrie – der Geometrie auf der Kugeloberfläche – zu den Formeln der Planimetrie – der Geometrie in der Ebene – übergehen, wenn man die Annahme macht, der Erdradius sei unendlich groß. Die Erde erscheint dann nicht mehr als Kugel, sondern als unendliche Ebene, die Vertikale erhält einen absoluten Sinn, und die Summe der Winkel im Dreieck wird genau zwei Rechte.

Einen ähnlichen Übergang kann man auch bei der relativistischen Physik vollziehen, wenn man annimmt, daß die Lichtgeschwindigkeit unendlich groß wird, d. h., daß sich das Licht augenblicklich ausbreitet.

In der Tat sahen wir, daß der Begriff der Gleichzeitigkeit absolut wird, sobald wir annehmen, daß sich das Licht augenblicklich ausbreitet. Auch der Zustand zwischen zwei Ereignissen und die Maße der Körper erhalten dann einen absoluten Sinn, unabhängig vom Laboratorium, aus dem sie beobachtet werden.

Folglich können wir alle klassischen Vorstellungen aufrechterhalten, wenn wir nur die Lichtgeschwindigkeit als unendlich groß ansehen.

Jedoch würde uns jeder Versuch, die endliche Lichtgeschwindigkeit mit den alten Vorstellungen über Raum und Zeit in Einklang zu bringen, in die närrische Lage eines Menschen versetzen, der von der Kugelgestalt der Erde weiß, aber trotzdem die Vertikale seiner Heimatstadt für absolut hält, und der sich folglich hütet, sich von dieser Stadt zu entfernen, weil er fürchtet, dann kopfüber in den Weltraum zu stürzen.

Band	Autor und Titel	Preis	Best.-Nr.
1	Landau/Rumer, Was ist die Relativitätstheorie?	3,60	6660434
2	Makejewa/Zedrik, Verwunderliches aus der Physik	4,15	6655272
7	Artamonow, Optische Täuschungen	7,90	6651562
8	Schustorowitsch, Neues aus der Theorie der chemischen Bindung	3,60	6655205
13	Gläser, Was ist Radiographie?	6,80	6655897
17	Kompanejez, Statistische Gesetze in der Physik	7,80	6656267
23	Butkewitsch/Selikson, Ewige Kalender	5,90	6656961
24	Dautcourt, Was sind Pulsare?	4,90	6657067
26	Lange, Physikalische Paradoxa und interessante Aufgaben	8,—	6657016
27	Bogdanow, Laser lenken Flugkörper	4,30	6657454
28	Bogdanow, Vom Molekül zum Kristall	7,40	6657489
29	Dautcourt, Was sind Quasare?	4,90	6657534
36	Holz Müller, Unsere Umwelt – ihre Entwicklung und Erhaltung	6,—	6657657
37	Komarow, Neue unterhaltsame Astronomie	10,50	6662659
38	Lange, Physikalische Knocheleien	5,60	6658350
44	Ljubimow/Nowikow, Einfache elektrische Stromkreise – keine Angst vor Schaltalgebra	3,90	6659871
45	Kaplan, Physik der Sterne	13,—	6659943
47	Nowikow, Schwarze Löcher im All	5,50	6660354
48	Pogosjan, Umweltfaktor Atmosphäre	9,90	6660346
49	Röseberg, Philosophie und Physik	8,50	6660848
50	Meinhold, Energie aus der Tiefe der Erde	6,50	6660311
51	Jefremow, In die Tiefen des Weltalls	11,50	6660872
52	Nowikow, Evolution des Universums	11,50	6660880
53	Kogan, Hundert Aufgaben zur Elektrizität	4,30	6661453
54	Anders, Rund um das Wasser – ein physikalischer Streifzug	3,40	6661445
55	Slobodezki/Aslamasow, Nachgedacht und mitgemacht – Kniffliges aus der Physik	11,50	6661891
56	Sorge/Hauptmann, Ultraschall	6,50	6662616
57	Anders, Weil die Erde rotiert	4,50	6662595
58	Pätz/Rascher/Seifert, Kohle – ein Kapitel aus dem Tagebuch der Erde	8,80	6662704
59	Pokrowski, Explosion und Sprengung	9,80	6662608
60	Marow, Die Planeten des Sonnensystems	19,80	6662624
61	Spiering, Auf der Suche nach der Urkraft	7,60	6663205
62	Resanow, Die Entstehung der Ozeane	12,—	6663838
63	Tarassow/Tarassowa, Der gebrochene Lichtstrahl	9,10	6663811
64	Ostrowski, Holografie – Grundlagen, Experimente und Anwendungen	12,80	6663803