

Über die Relativitätstheorie

Von D. Wattenberg.

Die Meinung, mit Hilfe der Mechanik alle Naturvorgänge in der starren und belebten Welt ohne Schwierigkeit erklären zu können, erwies sich nach der raschen Entwicklung der empirischen Forschung um die Mitte des vorigen Jahrhunderts als haltlos. Dadurch setzte dann ein allmählicher Umschwung vom mechanischen zum elektromagnetischen Weltbild ein. Der letzte Pfeiler dieses Entwicklungsganges ist die Relativitätstheorie (R.-Th.)¹, die von Einstein begründet und von bedeutenden Physikern erweitert und ausgebaut wurde.

Der Ausgangspunkt der Untersuchungen war das Licht, das sich mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde ausbreitet. Newton hielt es für stoffliche Teilchen, die in den Raum hinausgeschleudert werden, während Huyghens die Lichtbewegung als Wellenvorgänge erklärte. Wenn Licht aber Wellennatur besitzt, wobei man zunächst an die Lehre der Akustik und Hydraulik dachte, so muß es auch einen Träger der Lichtwellen geben. Descartes behauptete, die bloße Existenz durch Entfernungen getrennter Körper sei ein Beweis für das Dasein eines Mittels zwischen ihnen. Dieses Medium nannte man Äther, obgleich die klassische Physik weder die physikalischen noch die physiologischen Eigenschaften dieser Substanz, die alle Materie durchdringen sollte, nachweisen konnte. Ebenso wenig konnte man sich einen absolut leeren Raum vorstellen. Die Schwierigkeit aber, den hypothetischen Äther in das mechanische Weltbild einzuordnen, konnten die Physiker damaliger Zeit nicht meistern, und daher führte die Entwicklung unter Faraday und Maxwell fast zwangsläufig zur Elektrodynamik. Durch diesen Umschwung wurde die gesamte physikalische Forschung und Anschauung in neue Bahnen geleitet und die Mechanik schließlich der Elektrodynamik unterworfen. Es ist zwar nicht möglich, den gesamten Fragenkomplex hier aufzurollen. Wir geben uns lediglich mit der Erkenntnis Maxwells zufrieden, daß das Licht nichts anderes ist als eine elektrische Erscheinung, die auf elektromagnetischen Schwingungen beruht. Diese Entdeckung hat sich experimentell beweisen lassen, als es Hertz 1887 erstmalig gelang, elektrische Wellen tatsächlich zu erzeugen, wie sie uns jetzt beim Radio dienen. Heute wissen wir, daß die elektrischen Wellen mit Schall- und Wasserwellen nichts zu tun haben, sondern daß aus diesen nur die Anschaulichkeit hergeleitet werden kann. Elektrische Wellen denkt man sich als im Raum fortschreitende elektromagnetische Felder, deren Zustand fortwährend zwischen positiv und negativ wechselt und die an keinen stofflichen

¹ Für einige notwendige Unterscheidungen zwischen dem mathematischen Weltbild Einsteins und der wirklichen Welt vgl. die philosophischen Bemerkungen von Th. Wulf S. J. in dieser Zeitschrift 100 (1920) 113 ff. Einen ausführlichen Artikel über diese Frage unter dem Titel „Theoretische Physik und wirkliche Welt“ werden wir demnächst veröffentlichen.

Die Schriftleitung.

Träger gebunden sind. Das Licht ist nichts anderes als elektrische Wellen mit hoher Frequenz.

Da die Ausbreitung des Lichtes mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/sek. erfolgt, so muß die Fortpflanzung für einen ruhenden Beobachter nach allen Seiten gleich schnell vor sich gehen. Für einen zweiten Beobachter aber, der sich gegen den ersten bewegt, kann die Ausbreitung nach Annahme der klassischen Physik nicht mehr in jeder Richtung konstant sein, weil gleichzeitig eine Bewegung gegen den ruhend gedachten Äther erfolgt. Denkt man sich den Äther als einen Stoff, in dem alle Körper schweben, wie Fische im Meere schwimmen, so müßte bei Bewegungen gegen ihn eine Art „Ätherwind“ erkennbar werden. Da man diese Voraussetzung nicht machen darf, ist eine Bewegung gegen ihn gleich einer Bewegung gegen den leeren Raum. Wir können daher die Erdbewegung nur durch Vergleiche mit Örtern anderer Weltkörper ermitteln, weil es nur Bewegungen von Materie gegen Materie gibt. Solche Bewegungen sind, solange sie gradlinig verlaufen, relativ; denn es ist gleichgültig, ob ich sage, ein Körper befindet sich zu einem bewegten in Ruhe, oder ein Körper befindet sich zu einem ruhenden in Bewegung. Der Schluß ist immer derselbe, wie wir es auch beim fahrenden Zuge beobachten. Wenn man das Bewußtsein der Fahrt ausschaltet, so kann man auch schließen, der Zug stehe still und die Welt komme dem Zuge entgegen. Genau so liegt das Verhältnis bei einem fahrenden Schiff. Seine Bewegung relativ zum Wasser ist durch Vergleichspunkte und ähnliche Experimente meßbar. Es gibt aber keine Möglichkeit, seinen Bewegungszustand allein durch Beobachtungen, die restlos auf den Ort des Beobachters begrenzt sind, mechanisch zu ermitteln. Ebenso kann auch die Erdbewegung relativ zum Lichtäther nicht ermittelt werden. Aber trotzdem erhob sich die Frage, ob diese Translation der Erde nicht doch optisch festgelegt werden könne, zumal man doch nach Versuchen von Fitzgerald wußte, daß sich der Äther in absoluter Ruhe befindet. Eine meßbare Bewegung gegen ihn würde dann eine absolute Bewegung ausdrücken.

Die Überlegung führte den Physiker Michelson in Chicago 1881 zu seinem berühmt gewordenen optischen Versuch, den Einfluß der Erdbewegung auf die Lichtgeschwindigkeit experimentell nachzuweisen. Wenn die Erde ruhte, so müßte die Lichtausbreitung nach allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit erfolgen. Wir wissen aber, daß sich die Erde mit einer Geschwindigkeit von 30 km/sek. um die Sonne bewegt, so daß sie einem in ihrer Bewegungsrichtung ausgesandten Lichtstrahl naheilt und sich von einem entgegengesetzt gerichteten Signal entfernt. Scheinbar erfolgt hier die Lichtausbreitung in einer Richtung schneller. Diesen Effekt wollte Michelson finden und ließ im Physikalischen Laboratorium der Universität Chicago aus einer Lichtquelle zwei Strahlen austreten, wovon einer von einem in Bewegungsrichtung der Erde befindlichen und der zweite von einem senkrecht dazu aufgestellten Spiegel reflektiert wurde. Während des Experiments bewegte sich also der in der Bewegungsrichtung liegende Spiegel von der Lichtquelle weg, und die Zeit, die der Lichtstrahl gebraucht, um nach der Reflexion an die Quelle zurückzugelangen,

müßte hier länger sein, als beim zweiten Spiegel. Bei Verdrehung der Apparatur um 90° würde dann eine Verschiebung des Interferenzbildes eintreten und auf diese Weise die absolute Geschwindigkeit der Erde gegen den Äther herauskommen. Trotz aller Mittel feinsten Präzisionstechnik hat sich der gesuchte Effekt doch nicht nachweisen lassen, so daß die Lichtausbreitung auch bei bewegter Erde nach allen Richtungen konstant ist, wodurch das Relativitätsprinzip auch optisch bzw. dynamisch Gültigkeit behielt. Hierdurch entstand ein Widerspruch zur klassischen Physik, aus dem erst Einstein im Jahre 1905 einen Ausweg wies. Vorher hatte schon der holländische Physiker H. A. Lorentz in Leiden vermutet, daß eine gegen den ruhend angenommenen Lichtäther erfolgende Bewegung auf alle Körper, auf Molekulardurchmesser und Elektronen in der Bewegungsrichtung eine Kontraktion ausübe. Diese Verkürzung setzt sich während der Rotation der Erde laufend fort und entzieht sich jeglicher experimentellen Prüfung, weil alle Maßstäbe denselben Einflüssen unterworfen werden. So sinnvoll diese Hypothese erscheinen mag, so trägt sie doch den Charakter einer ad hoc ersonnenen Hilfshypothese.

Einstein ging bei Erhellung dieser Fragen von der Zeit aus. Den Physikern war seit Newton die Vorstellung einer absoluten Zeit zum Dogma geworden. Einstein behauptete aber, daß die Zeit, mittels der ein physikalischer Vorgang beschrieben wird, nur einen relativen Wert habe. Denkt man sich nämlich im Weltall eine große Uhr, auf der jeder kosmische Vorgang angezeigt wird, so ist jedes Ereignis an eine bestimmte Zeit gebunden. Dieser Zustand wird auch dadurch nicht geändert, daß wir unsere Zeitangaben von verschiedenen Standpunkten durch Zeitsignale vergleichen und kontrollieren können. Man kann die Zeit, die während der Übermittlung eines Signals verstreicht, in Rechnung setzen, denn die Entfernung beider Signalstationen voneinander, dividiert durch die konstante Lichtgeschwindigkeit, ergibt den Unterschied beider Signale. Werden durch solche Experimente zwei Uhren verglichen, so braucht man die übermittelte Zeit nur um die durch Rechnung gefundene Zeitdifferenz zu korrigieren. Diese Vorstellungen wurden durch die spezielle R.-Th. aufgehoben. Hiernach ist nämlich der Vergleich zweier Uhren nicht allein unter Berücksichtigung der Entfernung beider Beobachter möglich, sondern in erster Linie ist der Bewegungszustand beider Beobachter gegeneinander maßgebend. Es gibt also keine absolute Zeit. Die Zeit ist vielmehr abhängig vom Standpunkt beider Beobachter. Mögen daher auch zwei Ereignisse an zwei verschiedenen Orten für einen Beobachter gleichzeitig erfolgen, dem zweiten Beobachter, der zum ersten bewegt ist, erscheinen sie nicht gleichzeitig. Damit büßt ebenfalls der Begriff der Gleichzeitigkeit seine Bedeutung ein. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der Transformation der Zeit, was natürlich schwer vorstellbar ist. Daraus ergibt sich als weitere Folgerung, daß es auch kein absolutes Längenmaß geben kann, weil ein Stab, für den ruhenden Beobachter von bestimmter Länge, einem dazu bewegten Beobachter verkürzt erscheint. So würde beispielsweise der Meterstab des irdischen Beobachters für einen Beobachter auf der Sonne, der gegen den irdischen bewegt ist,

um 0,000 005 mm verkürzt sein. Die Ursache liegt natürlich nicht in einer physikalischen Wirkung des Äthers, wie Lorentz annahm, sondern in der kinematischen Tatsache der Relativbewegung, die auch für den negativen Ausgang des Michelson-Versuches verantwortlich ist.

Das Problem der Gleichzeitigkeit erhielt aber erst durch die in der R. Th. vollzogene Leugnung des Äthers als Bezugssystem der Lichtbewegung einen richtigen Sinn; denn die Lichtausbreitung ist in jedem gleichförmig bewegten Bezugssystem nach allen Seiten konstant. Freilich macht die R.-Th. zur Bedingung, daß die Lichtgeschwindigkeit c von keiner natürlichen Geschwindigkeit übertroffen werden kann. Mit dieser wichtigen Voraussetzung steht und fällt die Theorie. Die Geschwindigkeiten lassen sich nicht unendlich steigern, wenn die Zeit einen Sinn behalten soll. Es ist vorstellbar, daß ein Signal c , das um $12^h 0^m$ A verläßt und um $12^h 4^m$ wieder aufgefangen wird, inzwischen in B reflektiert wurde. Der Moment der Reflexion ist aber nicht meßbar, sondern nach der R.-Th. nur festsetzbar; sicherlich wird dies aber $12^h 2^m$ geschehen sein. Unmöglich und unvorstellbar ist aber ein Signal v , das zum Durchmessen der Strecke AB 3^m weniger gebraucht als c . Wenn nämlich dann c und v um $12^h 0^m$ A verlassen, so wäre c $12^h 2^m$ in B, während v schon 3^m früher, also $11^h 59^m$ dort einträte. Hier liegt eine große logische Schwierigkeit; man darf v nicht zulassen, sondern muß c zu einer Universalgröße in der Natur erheben und in ihr eine Konstante des leeren Raumes, unabhängig von allen Stoffen, sehen.

Mit dieser Behauptung greift die R.-Th. in das sog. Additionstheorem der Mechanik ein. Wenn ich z. B. am Bahndamm stehe und der Expreszug vorüberdonnert, so ist seine Geschwindigkeit $= v$. Wirft aber ein Passagier dieses Zuges einen Ball in Fahrtrichtung durch den Wagen, so ist die Geschwindigkeit des Balls relativ zum Zuge $= V$ und die Gesamtgeschwindigkeit w des Balles relativ zu mir $w = v + V$. So lehrt die Mechanik. Setzt man nun für v und V je 0.75 Lichtgeschwindigkeit (c), so würde $w = 1,5 c$ sein. Dieses Resultat hat Einstein in seiner speziellen R.-Th. bestritten und mathematisch widerlegt. Einstein setzte an die Stelle des alten Additionstheorems der Geschwindigkeiten eine neue Auslegung mit der Grundlage, daß auch bei Summierung zweier gleichgerichteter Geschwindigkeiten die Lichtgeschwindigkeit nie überschritten wird. Dieses Prinzip rüttelte erneut an den Grundlagen der klassischen Physik. Das zweite Newtonsche Bewegungsaxiom lehrt, die Beschleunigung einer Bewegung habe stets dieselbe Richtung wie die Kraft, die diese Beschleunigung hervorruft. Die Wirkung der Kraft ist abhängig von der Masse des beschleunigten Körpers, die in der Mechanik unveränderlich und von der Geschwindigkeit unabhängig ist. Da sich nach der R.-Th. die Geschwindigkeiten nicht unendlich steigern lassen, weil bei Erreichung der Lichtgeschwindigkeit eine Beschleunigung aufhört, so resultiert daraus, daß die Masse eines bewegten Körpers mit zunehmender Geschwindigkeit wächst und bei Lichtgeschwindigkeit unendlich groß wird; denn keine Kraft würde da ausreichen, die Beschleunigung zu steigern.

Aus der wachsenden Masse bei steigender Beschleunigung ergibt sich

aber eine weitere Konsequenz. So wie in der Mechanik eine Erhaltung und Konstanz der Masse gelehrt wurde, kannte die Wärmelehre ein Gesetz von der Erhaltung der Energie, d. h. eine einmal vorhandene Energiemenge kann nicht vernichtet werden, sondern sich nur in eine andere Form umbilden. So setzt sich z. B. die Wärmemenge des Dampfes in der Dampfmaschine in kinetische Energie der Wellen und Schwungräder um, im Dynamo entsteht aus dieser mechanischen elektrische Energie, die sich in der Glühbirne in Wärme und schließlich in Strahlungsenergie umwandelt. Die Energie wird also ständig erhalten. Diese Möglichkeit leugnet die R.-Th. ebenfalls, indem sie aussagt, daß ein Körper, dessen Energiegehalt sich ändert, auch an Masse verliert, und daß dieser Verlust äquivalent ist der Energieverminderung. Der Energiebegriff erhält damit eine materielle Bedeutung, weil sich Energie mechanisch genau so verhält wie beliebige Masse. Energie und Masse sind äquivalent und nur durch einen Proportionalitätsfaktor verschieden. Damit sind viele Zweifel der Physik überwunden worden, kannten doch die Physiker beim Zerfall radioaktiver Elemente schon Prozesse, wo ungeheure Energiemengen frei werden. Die in den Atomen aufgespeicherte Energie wird als Wärme frei. Während sich hierbei Materie nicht restlos in Energie auflöst, haben wir doch heute in der kosmischen Höhenstrahlung ein Beispiel, wo Materie scheinbar restlos in Energie aufgeht. Es handelt sich dort um sehr harte Strahlungen mit so ungeheurer Durchschlagskraft, daß man nach dem Stand der modernen Astrophysik annehmen kann, diese Strahlung entstehe bei vollständiger Auflösung der Materie und unter gewaltigen Temperaturen von Billionen von Graden im tiefsten Innern der Fixsterne.

Das ist in großen Zügen der Inhalt der speziellen R.-Th., die sich in erster Linie mit geradlinig und gleichförmig verlaufenden Bewegungen beschäftigt. Sie weist nach, daß nur Bewegung von Materie gegen Materie und nicht Materie gegen den leeren Raum einen Sinn hat. Alle Bewegungen, sofern sie geradlinig verlaufen, stellen nur gegenseitige Wirkungen von Körpern dar. Es entstand aber bald die Frage, ob die lediglich auf geradlinig-gleichförmige Bewegungszustände bezüglichen Erkenntnisse auch auf Bewegungen mit variabler Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung anwendbar seien, und ob sie somit eine allgemeine Gültigkeit hätten. Wir haben ja gesehen, daß es eine absolute Bewegung nicht gibt. Denkt man sich aber zwei Körper A und B, die nicht geradlinig gegeneinander bewegt sind: wird man da auch sagen können, Ruhe und Bewegung seien relativ? Wir haben doch gesehen, daß man in der Eisenbahn auch nicht sicher entscheiden könnte, ob sich der Zug fortbewegt oder ob die Landschaft dem Zuge entgegeneilt, wenn uns der bei An- und Abfahrt des Zuges erfolgende Ruck den Bewegungszustand des Zuges nicht zum Bewußtsein brächte. Wir können auch nicht entscheiden, ob die Erde gegen den Sternhimmel rotiert oder ob das Sternenzelt in Bewegung begriffen ist. Diesen Fragen wollen wir jetzt nähertreten.

Wenn wir den Zug besteigen und Platz genommen haben, befinden wir uns infolge unserer eigenen Schwere in Ruhe. Zieht aber die Lokomotive an, so gibt es einen Stoß rückwärts. Unser Körper widersetzt sich der Be-

wegung mit einer Kraft, die man als Trägheit bezeichnet. Die wirkende Kraft der Lokomotive ist die Beschleunigung. Wenn die Lokomotive dagegen plötzlich stark bremst, werden wir nach vorn geschleudert. Der Körper widersetzt sich abermals der auf ihn einwirkenden Kraft, seine Bewegung zu ändern, denn nach den Gesetzen der Mechanik ist jeder geradlinig-gleichförmig bewegte Körper bestrebt, seine Geschwindigkeit beizubehalten und wirkt daher der äußeren Kraft mit einer eigenen Kraft entgegen, die von seiner Masse und Beschleunigung abhängig ist. Die Bewegungsgesetze sind also bei gleichmäßig geradliniger bzw. beschleunigter Bewegung nicht dieselben. Zu den beschleunigten Bewegungen gehört auch die Rotation oder Kreisbewegung, auch dann, wenn die Geschwindigkeit konstant bleibt; denn die Richtung ändert sich ja laufend. Aber die Kreisbewegung ist geeignet, eine absolute Bewegung zu veranschaulichen.

Sobald zwei Körper umeinander rotieren, wirkt auf den schwächeren die Kraft des stärkeren ein, wodurch der schwächere zum Umlauf gezwungen wird. Die wirkende Kraft ist hierbei die Gravitation oder Schwerkraft. Da jeder bewegte Körper das Bestreben hat, geradlinig zu fliegen, aber durch die Gravitation daran gehindert wird, so entsteht zwischen beiden Kräften ein Kräftespiel, das man Zentrifugalkraft nennt, die um so größer wird, je mehr die Geschwindigkeit wächst. Der Leser wird vielleicht an der Dampfmaschine schon den Regulator gesehen haben, wo zwei rotierende Kugeln an federnden Gelenken befestigt sind. Wächst die Geschwindigkeit des Getriebes, so werden beide Gewichte infolge der Zentrifugalkraft auseinandergeschleudert und führen so eine Abdrosselung des Dampfes herbei. Man denke sich nun auf die Drehscheibe eines Karussells auf dem Jahrmarkt versetzt, das von einem festen runden und drehbaren Bau umgeben ist; einmal soll sich die Scheibe und einmal der Bau drehen. In beiden Fällen werden wir optisch dieselben Erscheinungen wahrnehmen, genau so wie beim Zugbeispiel. Mechanisch treten aber andere Wirkungen auf. Wir spüren bei drehender Scheibe eine nach außen zerrende Kraft, die Flieh- oder Zentrifugalkraft; bei gedrehten Wänden bleibt sie aus. Damit hätten wir also doch eine Möglichkeit gefunden, eine absolute Bewegung wahrzunehmen. Daß wir auf der rotierenden Erde die Fliehkraft nicht merken, liegt daran, daß sie von der Gravitation völlig überlagert wird; denn die Schwerkraft wirkt der Fliehkraft am Äquator um das dreihundertfache entgegen. Daß aber bei ruhendem und bewegtem Karussell bzw. Umbau keine genaue Umkehr beider Fälle eintritt, hatte schon der Physiker E. Mach (1838—1916) erkannt. Wenn die Scheibe rotiert, bewegt sie sich gegen das Gebäude und die Erde. Soll sich aber das Gebäude zum ruhenden Rad bewegen, so muß sich auch die Erde und mit ihr das ganze Sternall zum Karussell bewegen. Das ist freilich ein Gedankenexperiment, aber wir hätten auch dann die Wirkung der Fliehkraft zu erwarten, weil die umlaufenden Massen (Erde und Weltall) ein Zugfeld erzeugen, das auf den Beobachter im ruhenden Karussell als Kraft einwirkt. Dieses wird plausibel, wenn die beobachtbare Zentrifugalkraft aufgefaßt wird als eine Wirkung im Weltall kreisender ferner Massen.

Durch diese Auslegung der R.-Th. wurde auch der Kraftbegriff relativiert, was der Physik ein neuer Gedanke war. Wenn nämlich der Bewe-

gungszustand ein anderer wird, muß auch das Kraftfeld anders beschrieben und dadurch relativ werden. Aus diesem Grunde ist auch bei beschleunigten Bewegungen eine absolute Bewegung sinnlos. Ebenso gibt es keine absolute Kraft, sondern diese ist stets vom Bezugssystem abhängig; denn was im letzten Beispiel bei rotierendem Karussell und ruhendem Gebäude als Wirkung der Trägheit (Zentrifugalkraft) wahrgenommen wird, erscheint bei Umkehrung der Bewegung, also bei ruhendem Karussell und bewegtem Gebäude und Weltall als Gravitation. Eine Frage ist es aber, wie man sich die Gravitationswirkung kosmischer Massen vorzustellen hat. Hierin liegt die mathematisch-physikalische Bedeutung der R.-Th., das große Problem der Relativität der Bewegung in einer umfassenden Gravitationstheorie, der allgemeinen R.-Th., physikalisch zum Abschluß gebracht zu haben.

Die Relativität der Kraft hatten wir aus der Rotation gefolgert. Die R.-Th. hat diesen Begriff verallgemeinert. Der Leser denke sich einen frei im Raume schwebenden fensterlosen Kasten, in dem ein Physiker eine an der Decke befestigte und mit einem Gewichtstück beschwerte Spiralfeder beobachtet. Es fragt sich jetzt, ob der eingeschlossene Beobachter eine Bewegung des Kastens nach oben wahrnehmen kann, ohne die Außenwelt zu beobachten. Diese Frage ist in einer Hinsicht zu bejahen, denn sobald sich der Kasten in Bewegung setzt, wird sich das Gewichtstück zufolge seiner Trägheit der Mitführung durch die Kastendecke widersetzen, genau so, wie es unser Körper bei anfahrendem Zuge tut. Die Beschleunigung des Kastens hat dann eine Dehnung der Spirale zur Folge, woraus eine Bewegung hergeleitet werden kann. Es gibt jedoch für die Spannung der Feder eine zweite Erklärung. Wenn nämlich unter dem Kastenboden kosmische Massen gehäuft sind, die ein Gravitationsfeld erzeugen, so wird das Gewicht von ihnen angezogen und die Feder ebenfalls gespannt. Daher kann man aus der Federspannung mit derselben Sicherheit auf ein vorhandenes Gravitationsfeld schließen. Wird aber die Feder durch Gravitation nicht gespannt und der Beobachter im Kasten nimmt durch eine Öffnung eine Bewegung des Kastens gegen die Umwelt wahr, kann er auch dann ohne weiteres die Kastenbewegung und die Ruhe der Welt bejahen? Nein! Alle Bewegungserscheinungen sind relativ! Es gibt daher nur zwei Mittel zur Erklärung des Federeffektes. Entweder tritt eine Aufwärtsbewegung des Kastens ein, und das Gewicht spannt durch seine Trägheit die Feder stärker, oder der Kasten ist in Ruhe und die Umgebung bewegt sich zu ihm und erzeugt ein dynamisches Gravitationsfeld, wodurch das Gewicht wegen seiner Schwere angezogen und die Federspannung herbeigeführt wird.

Trägheit und Schwere sind verschiedene Begriffe. Unter Trägheit versteht man den Widerstand einer Masse gegen eine Beschleunigung, während man unter Schwere die Wirkung der Anziehung versteht. Bekanntlich zieht Materie sich gegenseitig an, wodurch Gravitationsfelder erzeugt werden. Dabei ist das Ausmaß der Körper gleichgültig. Körper von gleichem Gewicht haben auch gleiche Trägheit, und die schwere Masse ist gleich der trägen Masse. Hierauf beruht auch die von Galilei erkannte

Tatsache, daß alle Körper gleich schnell fallen. Ein schwerer Körper wird zwar stärker angezogen als ein leichter, aber dafür hat er auch eine größere Masse zu schleppen. Die Gleichwertigkeit (Äquivalenz) von schwerer und träger Masse zu erkennen und die Gravitation, die in der Mechanik abseits stand, in das Natursystem einzuordnen, ist in der R.-Th. erstmalig gelungen.

Von welcher Tragweite diese Behauptung war, erkennt man an folgendem Versuch. Durch den Mittelpunkt einer ruhenden Kamera trete ein Lichtstrahl. Er trifft an der Rückwand genau radial zur Linse auf. Hebt sich der Apparat aber, nachdem der Strahl bereits die Linse passiert hat, so wird er an der Rückwand unterhalb der radialen Richtung auf treffen. Erfährt der Kasten dann eine Beschleunigung nach oben, so trifft der Lichtstrahl noch weiter unten auf, und sein Weg wird völlig zur Kurve verzerrt. Das Experiment ist freilich praktisch nicht ausführbar, weil die Beschleunigung des Kastens gegen die Lichtgeschwindigkeit ohne Bedeutung ist. Man sieht aber als gegeben an, daß bei beschleunigter Bewegung eine Krümmung der Strahlen eintritt. Soll die R.-Th. eine unbeschränkte Gültigkeit haben, so muß die Ablenkung auch im Gravitationsfeld eintreten. Diese Forderung ist nachprüfbar. Das Licht derjenigen Sterne, die im Weltraum in der Projektion hinter der Sonne liegen, breitet sich zunächst geradlinig aus. Gelangt es aber an den Rand und damit in das Gravitationsfeld der Sonne, so muß eine Krümmung der Lichtstrahlen eintreten, d. h. der Ort der Sterne am Taghimmel (in Sonnennähe) muß um die Wirkung des Ablenkungseffektes (am Sonnenrand $1,73$ Bogen Sekunden) zum Ort am Nachthimmel, den die Sterne genau ein halbes Jahr später inne haben, verschoben erscheinen, weil Licht (=Energie=Masse) von der Sonne angezogen wird.

Ähnliche Überlegungen führten dann zu dem Schluß, daß eine im Gravitationsfeld aufgestellte Uhr eine Verzögerung erleidet, die um so größer wird, je stärker der Einfluß der Gravitation ist. Eine Uhr auf der Sonne würde eine größere Verzögerung erleiden als auf der Erde, und in den höchsten atmosphärischen Schichten der Erde würde dieser Effekt wesentlich kleiner sein als an der Erdoberfläche, weil die Anziehungskraft mit wachsendem Abstand geringer wird. Zur Messung solcher Abweichungen reichen unsere genauesten Chronometer natürlich nicht aus. Es gibt aber eine exaktere Uhr, und das sind die Atome. Der Atomkern wird von Elektronen umkreist. Die Zeit eines Elektronenumlaufs bringt die Schwingungszahl oder Frequenz des von den rotierenden Elektronen ausgesandten Lichtes zum Ausdruck, die wir in den Spektrallinien des Spektrums je nach Art der Substanz wiederfinden. So hat man sich das rote Licht mit zirka 500 Billionen und das violette Licht mit 1000 Billionen Schwingungen in der Sekunde vorzustellen. In unsern Laboratorien können wir die Frequenzen mit größter Genauigkeit messen. Dabei genügt die Feststellung ihrer Lage zwischen beiden Enden des Spektralbandes. Da wir auch die Linienfolge bestimmter Stoffe kennen, so sind uns die Spektrallinien gewissermaßen Präzisionsuhren, die in verschiedenen Gravitationsfeldern Gangunterschiede zeigen. So müssen z. B. zwei Linien, von

denen eine auf der Sonne und die zweite im irdischen Laboratorium erzeugt wurden, zueinander verschoben erscheinen, weil die Gravitation auf beiden Weltkörpern verschieden ist. Die Linien des Sonnenspektrums verschieben sich zum roten Teil des Spektrums. So lautet die Forderung der Relativitätstheorie.

Unsere bisherigen Ausführungen haben sich lediglich mit Bewegungen und Kräften auseinandergesetzt. Wie aber verhält sich die R.-Th. bei ihrer Anwendung auf den Raum? Schon die Erhebung der Lichtgeschwindigkeit als Universalgröße führte den Göttinger Mathematiker Minkowski 1907 zu der Idee von einer vierdimensionalen Welt mit einer Zeit- und drei Raumdimensionen. So wie in der Mechanik die Gravitation, hatte in der dreidimensionalen Welt die Zeit abseits gestanden. Wir messen den Raum nach Maßstäben, die Zeit aber nach einer andern Einheit. Bekanntlich dreht sich die Erde in 24 Stunden einmal um ihre Achse. Wird man diese Zeit auch als Raummaß ausdrücken können? So ohne weiteres sicherlich nicht; aber es gibt in der R.-Th. eine Größe, die Länge und Zeit auf dieselbe Basis bringt, die Lichtgeschwindigkeit. Das Licht gebraucht ja, um eine Strecke von 300 000 km zu durchmessen, eine Sekunde; für die Strecke von 1 Meter sind das 300 Milliontel Sekunden. Diese Zeit ist unendlich klein, aber darin wird der Grund liegen, weshalb diese Beziehungen so lange Zeit unerkannt blieben. Faßt man die Lichtgeschwindigkeit als eine Längeneinheit auf, so folgt daraus die vierte Dimension, wodurch die physikalische Naturbeschreibung wesentlich vereinfacht werden kann. Die Problemstellung ist freilich auch hier eine rein mathematische, die uns nicht näher beschäftigen soll.

Um eine Strecke zu messen, bedienen wir uns des geraden Maßstabes. Eine Gerade ist freilich nur der Lichtstrahl, aber trotzdem mißt man natürlich praktisch nach Stabeinheiten. Nach der R.-Th. müssen alle Messungen und Gesetze dieselben bleiben, ob der Körper ruht oder in Bewegung begriffen ist. Man stelle sich jetzt eine rotierende Scheibe vor, an deren Umdrehung unsere Instrumente nicht teilnehmen. Messen wir Umfang und Radius der Scheibe, so wird sich der Radius zum Umfang verhalten wie $2r : \pi$ [$\pi = 3,1416$]. Dieses Ergebnis hätten wir nach der Euklidischen Geometrie auch ohne Messung erhalten. Bringen wir aber die Instrumente mit dem rotierenden System in feste Verbindung, so werden wir bei Messung des Rad-Umfanges feststellen, daß er größer ist, als obige Formel ergibt und daher mit der Euklidischen Geometrie im Widerspruch steht.

Die spezielle R.-Th. hat für diese Abweichung eine Erklärung: alle Maßstäbe werden in der Bewegungsrichtung verkürzt. Der Radumfang erscheint aus diesem Grunde zum angelegten Maßstab größer als das 2π -fache. Hier entstand für Einstein eine ungeheure mathematische Schwierigkeit, zumal die Erscheinungswelt die Geometrie Euklids zu bestätigen schien. Einstein konnte jedoch diesen Widerspruch völlig überwinden. Schon vor 100 Jahren hatte der große Mathematiker Gauß geäußert, daß die Euklidische Geometrie nicht unwiderleglich sei, und daß die Summe der Winkel im Dreieck nicht immer absolut 180° sein müßte. Er hat dann

auch versucht, einen praktischen Beweis zu bringen, indem er zwischen drei Bergen (Brocken im Harz, Inselberg im Thüringer Wald und Hoherhagen bei Göttingen), deren Spitzen von jedem Standpunkt noch im Fernrohr sichtbar waren, Dreiecksmessungen anstellte. Es ergab sich aber keine merkliche Abweichung von der Winkelsumme $= 180^\circ$. Seitdem hat diese Nichteuklidische Geometrie die Mathematiker beschäftigt, doch erst Einstein hat diesen Gedanken richtig gedeutet. Wenn ich auf der Oberfläche der Erde ein Dreieck messe, so sind die Dreieckseiten keine Geraden, sondern Kreisbogen, weil die Erde Kugelgestalt hat. Aber Lichtstrahlen sind Gerade. Also müssen wir entweder den Raum planimetrisch weiter messen und an unsern Messungen die nötigen Korrekturen anbringen, die sich aus den Abweichungen zwischen Kreisbogen- und Strahlendreieck ergeben, oder an der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes festhalten und danach die geometrischen Lehrsätze formulieren. Euklidisch ist der Lichtstrahl eine Gerade, sofern er nicht durch ein Gravitationsfeld gekrümmt wird.

Die R.-Th. macht hier einen Zusatz: „Die Lichtstrahlen laufen stets auf der geradesten Bahn. Befolgen sie die Euklidische Geometrie, so ist keine Krümmung der raum-zeitlichen Welt vorhanden; die Gesetze der Geometrie der Lichtstrahlen zeigen die Krümmungsverhältnisse der raum-zeitlichen Welt an!“ Diese Welt ist natürlich der mit Materie gefüllte Raum, dessen Krümmung eben abhängig ist von seiner Materie. Durch dieses Postulat wurde die Newtonsche Dynamik der Planetenbewegung, wodurch Gravitationswirkungen mit der Materie verbunden sind, verallgemeinert. Es zeigte sich nämlich, daß die Planetenbewegung viel komplizierter ist, als man seit Newton angenommen hatte. Nach den Keplerschen Gesetzen beschreiben die Planeten elliptische Bahnen, so daß sie nach jedem Umlauf denselben Punkt ihrer Bahn wieder erreichen müssen. Für den Planeten Merkur ergab sich aber eine Abweichung von dieser Regel, für die Newton keine Erklärung hatte. Einstein behauptete nun, daß zu der elliptischen Planetenbahn noch eine Drehbewegung hinzutritt, insofern, als die Ellipse sich als Ganzes auch noch um die Sonne bewegt. Bei jedem Planeten zeigt sich diese geringe Störung, die beim Merkur den größten Wert von 43 Bogensekunden im Jahrhundert erreicht. Die R.-Th. konnte also dieses größte Rätsel des Newtonschen Gravitationsgesetzes glücklich lösen und mit der Wirklichkeit in gute Übereinstimmung bringen.

Es war von Anfang an klar, daß eine experimentelle Bestätigung der R.-Th. nur durch die Astronomie erfolgen könne. Das ist tatsächlich in mehreren Punkten geschehen. Die relativistische Lichtablenkung im Gravitationsfeld ist durch die Forschung bestätigt. Wenngleich die Potsdamer Astronomen diesen Effekt während der totalen Sonnenfinsternis vom 9. Mai 1929 etwas größer fanden, als die Theorie forderte, so ist doch an dem Dasein einer Ablenkung kein Zweifel mehr möglich. Ebenso ist die Rotverschiebung der Spektrallinien geklärt. Bekanntlich fordert die R.-Th., daß auf Körpern, wo die Schwerkraft größer ist als auf der Erde, eine Verlangsamung des periodischen Verlaufs innerhalb der Atome eintrete, so daß die Spektrallinien nach dem roten Ende hin verschoben erscheinen müssen. Der Erforschung dieser Vorgänge auf der Sonne und

andern Sternen dient besonders das Institut für Sonnenphysik am Astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam. Neuerdings ist es dem amerikanischen Astronomen John gelungen, die Rotverschiebung im Sonnenspektrum sicher festzustellen. — Für die Schwankungen der Merkurbewegung hatte man bekanntlich eine Erklärung gefunden, die sich in ihrer Auswertung mit den beobachteten Fehlern deckte.

Das Hauptgewicht der Relativitätstheorie drückt sich aber im Weltall aus. Sie hält den Raum zwar für unbegrenzt, aber dennoch endlich. So wie die Erde überall von Fläche begrenzt ist, wird der Raum von Raum begrenzt. Die Raumkrümmung wird durch die in ihm vorhandene Materie bestimmt. Der Lichtstrahl, auch wenn er eine Gerade ist, kann dieses Raumgebilde nicht verlassen, sondern nur umeilen; er kommt aus diesem gekrümmten Raum nicht hinaus. Die Nichteuklidische Geometrie bekommt dadurch einen festeren Sinn: Die Strahlen haben keine planimetrischen Eigenschaften mehr, sondern gleichen den Meridianen der Erde. Sie sind wie der Raum in sich selbst zurückgebogen. Je größer die Materie im Raume ist, um so kleiner ist der Raum und um so größer ist seine Krümmung. Ein Raum ohne Materie wäre absolut endlos. Wenn man weiß, wieviel Materie das Weltall enthält, so läßt sich daraus die Krümmung der Welt berechnen.

Ob unsere astronomischen Ergebnisse schon zu solchen Bestimmungen ausreichen, wird noch eine Frage sein. Wenn nämlich die Lichtstrahlen den Raum umwandern, so muß es in der Natur bzw. im Weltall Beispiele geben, wo wir von Himmelskörpern, deren Licht einmal direkt und einmal nach seiner Wanderung um die Welt von unsern Teleskopen aufgefangen wird, Spiegelbilder wahrnehmen. Tatsächlich scheint sich auch in diesem Punkt die R.-Th. zu bestätigen; denn wir kennen am Himmel zwei schwache Nebel, die wahrscheinlich die Spiegelbilder unserer nachbarlichen Weltsysteme im Raume (Spiralnebel in den Sternbildern Andromeda und Jagdhunde) darstellen. An solchen Spiralnebeln hat man in neuerer Zeit die spektroskopische Wahrnehmung gemacht, daß sie das Bestreben haben, sich mit ungeheurer Geschwindigkeit von unserem engeren Weltsystem zu entfernen. Ihre Bewegungen erreichen Werte bis zu 25 000 km/sek., womit fast $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit erreicht wird. Man gewinnt hier den Eindruck, als sei das Weltall in ständiger Ausdehnung begriffen. Der Radius des Weltalls ergibt sich zu 90 Milliarden Lichtjahren. Doch erst 140 Millionen Lichtjahre Raum ist uns bisher mit unsern Instrumenten zugänglich gewesen; der Weltraum wächst ins Unmeßliche!

Es liegt in der Natur der hier behandelten Materie, daß sie auf das Weltbild der Physik revolutionierend einwirken mußte, namentlich deshalb, weil sie in unsern Vorstellungen von Zeit und Raum große Verwirrungen anzurichten schien. Wenn sich aber der große Widerstand gegen die neuen Ideen in den letzten Jahren immer mehr gelegt hat und schließlich die R.-Th. ein absoluter Forschungsgegenstand der theoretischen und praktischen Physik geworden ist, so liegt das zum Teil auch daran, daß der Träger der Idee nicht mehr eine einzelne Person blieb, sondern ein

großer Personenkreis der ganzen Welt davon erfaßt wurde. Hinter dem Kollektivbegriff der R.-Th. verbirgt sich heute eine ganze Wissenschaft ohne Rücksicht auf Personen.

Wollte man den Inhalt der R.-Th. in wenigen Worten noch einmal umreißen, so würde man als die positive Grundidee der speziellen R.-Th. die „Verschmelzung von Raum und Zeit zu einem einheitlichen Begriff“ ansehen. Das soll nicht heißen, daß beide gleichartig sind, sondern so, „wie eine reelle Zahl sich mit einer imaginären Zahl zu dem einheitlichen Begriff einer komplexen Zahl verbindet“. Dagegen war das Grundmotiv der allgemeinen R.-Th. das Äquivalenzprinzip von schwerer und träger Masse bzw. die Begründung einer allgemeinen Gravitationstheorie.

Man muß sich jetzt fragen, was wäre geschehen, wenn die R.-Th. niemals aufgestellt worden wäre. Diese Frage ist nicht so leicht zu beantworten. Auf jeden Fall wäre aber die Naturbeschreibung eine viel kompliziertere geworden, und einen Schritt zur Vervollkommnung und Vereinheitlichung des physikalischen Weltbildes auf dem Boden der klassischen Physik hätte es nicht gegeben.

Freilich, die R.-Th. schöpft nicht alle Konsequenzen restlos aus, und daher gibt es auch einige Möglichkeiten zur kritischen Behandlung; aber solche Wege haben naturwissenschaftlich-physikalisch heute wenig Aussicht, gangbar gemacht zu werden. Mit dieser Tatsache muß man sich vorläufig abfinden.

Es soll hier auch nicht verschwiegen werden, daß es nicht an Versuchen gefehlt hat, die R.-Th. philosophisch als auch praktisch zu widerlegen. So ist z. B. der Michelson-Versuch häufig — noch ganz kürzlich durch Joos in Jena — wiederholt worden, allein ohne Erfolg. Dagegen glaubte aber der amerikanische Physiker Miller, ein Mitarbeiter Michelsons, kürzlich den gesuchten „Ätherwind“ bei Wiederholung des Versuchs auf höheren Bergen gefunden zu haben; aber hiermit steht Miller allein in der Front und konnte auch keine Anerkennung finden.

Ebenso hat der Berliner Astronom Courvoisier seit 10 Jahren nach astronomischen, raffiniert ausgedachten zahlreichen Methoden versucht, die Lorentzkontraktion nachzuweisen. Courvoisier glaubte aus seinem zahlreichen Material eine solche Wirkung und damit auch eine Schwankung der Gravitation und eine Relativbewegung der Erde gegen den Äther mit 600—700 km/sek. in Richtung des Sterns Capella im Fuhrmann erschließen zu können. Diese Ergebnisse haben aber auch einer neuerlichen Nachprüfung nicht trotzen können und sind auf die R.-Th. ohne Wirkung geblieben.

Eine Reihe entscheidender Fragen sind noch nicht gelöst, vor allen Dingen „das Problem der Verschmelzung der Elektrodynamik mit der Mechanik“, womit erst die Abrundung des physikalischen und auch des kopernikanischen Weltbildes vollendet wäre. Noch sind die Physiker und Astronomen nicht so weit, aber die Entwicklung führt zu dieser Krönung der klassischen Physik.