

Der heutige Stand der Relativitätstheorie.

1.

Die erste Anregung zu den Gedankengängen, die heute unter dem Namen „Relativitätstheorie“ eine so allgemeine Beachtung finden, gaben Versuche über die Ausbreitung des Lichtes, die Michelson im Jahre 1881 anstellte. Zum Verständnis der ganzen ungeheuren Entwicklung ist es durchaus notwendig, sich über den Wert und die Bedeutung dieser Versuche, wenn auch nicht in den technischen Einzelheiten, eine klare Einsicht zu verschaffen. Dazu sei es gestattet, die Versuche vorerst so zu beschreiben, als ob es sich um die Ausbreitung des Schalls und nicht des Lichtes gehandelt hätte, da die Geschwindigkeit des Lichtes so über alle Vorstellung groß ist, daß dem weniger geübten Leser dadurch das Verständnis erschwert werden könnte.

Angenommen, von einem Kirchturm wird Punkt 12 Uhr ein Glockenzeichen gegeben. Der Schall pflanzt sich gleichmäßig nach allen Richtungen fort und wird nach 10 Sekunden an allen Orten, die ringsum auf einem Kreis von 3,3 km Halbmesser gelegen sind, zu gleicher Zeit gehört werden. Den Mittelpunkt des Kreises bildet der Kirchturm. Am folgenden Tage kommt ein Luftschiff in voller Fahrt von 180 km in der Stunde über den Ort geflogen. Gerade 12 Uhr, als das Glockenzeichen ertönt, steht es in geringer Höhe senkrecht über dem Turm. Aber während der 10 Sekunden, die der Schall braucht, um die Kreislinie zu erreichen, hat das Luftschiff sich bereits 500 m von dem Turm, dem Mittelpunkt des Kreises, entfernt. Es ist also in diesem Augenblick in seiner Fahrtrichtung nur mehr 2,8 km von der Front der Schallwelle entfernt, während es in entgegengesetzter Richtung jetzt 3,8 km Abstand hat. Gesezt daher, das Luftschiff wäre über seinen Bewegungszustand in Unkenntnis — man denke etwa an einen Freiballon im Nebel —, es hätte 12 Uhr gerade unter sich das Signal gehört und es erfähre, welchen Abstand es 12 Uhr 10 Sekunden von den verschiedenen Punkten der Schallwellenfront hatte, so könnte es daraus die Richtung und Geschwindigkeit seiner Bewegung im Luftraum erschließen. Nehmen wir aber an, das Luftschiff wisse gar nichts von

seiner Bewegung, nicht einmal, daß es beweglich ist, auch der Kirchturm existiere nicht und das Signal sei im dichten Nebel mit einer Glocke im Luftschiff selbst gegeben, dann würde man schließen, der Schall pflanzt sich in den verschiedenen Richtungen verschieden schnell fort, in der einen Richtung macht er 2,8 km, in der entgegengesetzten 3,8 km in 10 Sekunden.

Ein solcher Freiballon im Äthermeer ist unsere Erde, oder richtiger gesagt, unser ganzes Sonnensystem. Wir wissen nicht, in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit es sich darin bewegt. Das könnten wir aber erfahren, wenn wir den oben beschriebenen Versuch mit einem Lichtsignal machten, also wenn wir die scheinbar verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in den verschiedenen Richtungen bestimmten. Das hat Michelson versucht. Das Ergebnis war vollständig negativ, die Entfernung der Erde von der Wellenfront war in allen Richtungen dieselbe. Das würde also besagen, daß unser Sonnensystem sich gar nicht durch den Weltenraum hindurchbewegt. Nun bewegt sich aber die Erde sicher um die Sonne, ihre Geschwindigkeit dabei beträgt in tangentialer Richtung rund 30 km in der Sekunde. Folglich muß der Abstand der Erde von der Lichtwellenfront 1 Sekunde nach Aussenden eines Lichtblitzes in der Richtung der Tangente 30 km weniger betragen als in der Richtung zur Sonne hin. Trotzdem war das Resultat des Versuches ein gänzlich negatives. Die Erde ist der Wellenfront nach allen Richtungen gleich nahe, es zeigt sich kein Unterschied nach irgendeiner Richtung. Um das ganz Unbegreifliche dieses Ergebnisses nachzuempfinden, denke man an den Schallversuch zurück. Man stelle sich vor, das Luftschiff ist am hellen Tag über den Kirchturm weggefahren, es hat Häuser und Fälder unter sich fortziehen gesehen, und bei der Messung ergibt sich, es befindet sich dennoch im Zentrum der Kugelwelle, von allen Punkten der Front gleich weit entfernt. Michelson wiederholte seine Versuche mit verfeinerten Apparaten, er überzeugte sich schließlich, daß seine Instrumente schon $\frac{1}{100}$ des zu erwartenden Effekts anzeigen würden; er zog andere Physiker hinzu, man legte eine genaue Beschreibung der Versuche der ganzen Öffentlichkeit vor, die hervorragendsten Physiker prüften alles nach: das Resultat blieb dasselbe. „Es ist mit den Lichtsignalen nicht möglich, die Bewegung eines Körpers durch das Äthermeer nachzuweisen.“

Die Bewegung eines Körpers gegen den Äther kann man im weiteren Sinn als eine absolute Bewegung auffassen. Nicht im strengen Sinn,

da man erst nachfragen müßte, ob denn der Äther im Raum sich bewegt oder ruht. Aber diese Frage hat offenbar für uns gar kein Interesse, da sich diese Bewegung niemals durch irgendeine Äußerung offenbaren kann. Nennen wir also die Bewegung gegen den Äther die absolute Bewegung, so hätte uns der Versuch von Michelson die absolute Bewegung unseres Sonnensystems verraten sollen; aber das Ergebnis war: der Versuch zeigt uns keine absolute Bewegung an, ja er zeigt uns auch sicher vorhandene Bewegung nicht an.

Bekanntlich können wir mit den Hilfsmitteln der Mechanik, wie schon Newton erkannte, niemals die absolute, sondern nur die relative Bewegung eines Körpers gegen den andern nachweisen. Wir müssen also dieses Gesetz jetzt dahin erweitern, daß es auch mit Hilfe der Lichtwellen nicht möglich ist. Und um das gleich an dieser Stelle anzuschließen, nachdem man erkannt hatte, daß die Lichtwellen mit den elektrischen Wellen identisch sind, hat man eine ganze Reihe von Versuchen auf dem Gebiete der Elektrizität ausgedacht, die hier nicht im einzelnen beschrieben werden können; das Resultat war ausnahmslos dasselbe: wir können nur relative Bewegung der Körper gegeneinander erkennen.

So befriedigend es bei oberflächlicher Betrachtung erscheinen könnte, daß die Gesetze der Mechanik sich auch in den übrigen Gebieten der Physik bestätigt finden, so bleibt es bei näherer Überlegung doch ein gänzlich unbegreifliches Resultat. Die Mechanik ist ja nicht in der Lage, uns irgend etwas im Raume Festliegendes zu bezeichnen, worauf wir die Bewegungen beziehen könnten. Hier aber haben wir etwas absolut Ruhendes, oder wenigstens glauben wir es zu haben in dem alles erfüllenden Äther, und die Bewegung des beobachtenden Physikers gegen den Äther mußte sich in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in ganz ähnlicher Weise zeigen, wie die Bewegung des Luftschiffes gegen die ruhend gedachte Luft in der scheinbaren Verschiedenheit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles zutage tritt.

Man könnte also auf den Gedanken kommen, daß die Erde sich gar nicht gegen den Äther bewegt, sondern diesen bei ihrer Bewegung mitreißt, ähnlich wie sie die ganze Atmosphäre mit sich führt oder wie ein geschlossener D-Zug die eingeschlossene Luft mitnimmt. Dann wird die Kugelwelle als Ganzes mitgenommen, und die Schallquelle, etwa eine Glocke im Zuge, bleibt trotz der Bewegung im Mittelpunkt der Welle. Allein mit dieser Annahme stößt man auf neue Schwierigkeiten.

Schon 1859 hatte Fizeau untersucht, ob der Äther bei der Bewegung der Körper mitgerissen wird, oder an seinem Orte bleibt. Er bestimmte die Geschwindigkeit des Lichtes in Wasser, das sich in langen Röhren befand und in den Röhren mit großer Geschwindigkeit fortbewegt wurde. Indem das Licht nun einmal mit dem Strom und einmal gegen den Strom ging, ging es auch mit oder gegen den Äther, falls derselbe vom Wasser mitgeführt wurde. Dieselben Versuche in bewegter Luft ergaben das unzweifelhafte, mehrfach nachgeprüfte Resultat, daß der Äther von der bewegten Luft nicht mitgenommen wird. Somit blieb das Ergebnis der Versuche Michelsons, als Tatsache unantastbar, aber im Zusammenhang mit allen unsern Kenntnissen über die Ausbreitung des Lichtes vollständig unbegreifbar, seitdem als ungelöstes Rätsel bestehen, und aus den recht sonderbar, fast verzweifelt anmutenden Lösungsversuchen mag der Nichtfachmann ermessen, wie schwer sich dieser Zug dem Gesamtbild, das man sich in jahrhundertelanger ernster Arbeit von den großen Naturerscheinungen gemacht hatte, einfügen wollte.

2.

Der erste von den Physikern sehr ernst aufgenommene und viel bewunderte Lösungsversuch stammt von dem holländischen Physiker H. A. Lorentz in Leiden (1895), und dieser Lösungsversuch bedeutet den ersten vorsichtigen Schritt auf dem Wege, den bald nachher Einstein rücksichtslos bis zu Ende verfolgte, mochte er ihn auch in bisher ganz unbekanntes Land führen. Wir wollen uns die Lösung von Lorentz zuerst wieder an dem Schallversuch anschaulich machen. Angenommen, man wolle die Entfernung des Luftschiffes von den verschiedenen Stellen der Wellenfront dadurch messen, daß man eine in Metern abgeteilte Eisenstange aus dem Luftschiff herauschiebt. Man sollte also erwarten, daß bei 2,8 km die Wellenfront erreicht wäre. Bei dem Versuche von Michelson ist das aber nicht der Fall, man braucht 3,3 km. Das erklärt nun Lorentz, indem er die Annahme macht, der Eisenstab sei durch die Bewegung des Luftschiffes in sich zusammengedrückt, verkürzt, sobald er in die Fahrtrichtung gebracht wird. Deshalb muß man ein weiteres Stück herausstrecken, um die Wellenfront zu erreichen.

Man wird vielleicht einwenden, dann müßten ja die Teilungen auf dem Maßstab jetzt weniger als 1 m voneinander abstehen, und man brauche nur ein Metermaß daneben zu halten, um alsbald feststellen zu können, ob das der Fall ist.

Darauf antwortet Lorenz: Das Metermaß und alle Dinge, die man zum Vergleich daneben halten mag, sind ebenso verkürzt wie die Teilungen auf der Stange; deshalb wird man die Verkürzung nicht bemerken können und ganz ruhig und sicher das Urteil fällen, die Entfernung vom fahrenden Luftschiff bis zur Wellenfront beträgt nach allen Richtungen 3,3 km, solange man die Messung vom bewegten Luftschiff aus vornimmt. Von der Erde aus würde man die Verkürzung allerdings bemerken können. Man brauchte nur etwa in 10 m Abstand zwei Pfähle in die Erde zu schlagen und dann aus dem Luftschiff ebenfalls in 10 m Abstand zwei Stangen abwärts zu führen. Während dann die Marken des fahrenden Luftschiffes gerade an den Pfählen vorüberfliegen, wird eine Momentphotographie gemacht, auf welcher dann die Verkürzung der 10 m des bewegten Schiffes zu sehen sein müßte.

Rehren wir aber nun vom Vergleich zur Wirklichkeit zurück, so war also die Lösung von Lorenz diese. Michelson befand sich bei seinen Messungen auf der Erde im Äthermeer eben in der Lage wie ein Flugzeug im Luftmeer. Er bestimmte tatsächlich alle Längen durch Maßstäbe, die er aus seinem bewegten Luftschiff, der Erde, herausstreckte. Wenn man nun annimmt, daß alle Dinge und alle Maßstäbe im Verhältnis der Geschwindigkeit kürzer werden, falls sie in der Bewegungsrichtung liegen, so mußte er zu dem Urteil kommen, daß der Weg zur Front der Lichtwelle nach vorn gerade so weit sei wie seitwärts. Nur die Feststellung, daß der bewegte Maßstab verkürzt ist gegen einen unbewegten, konnte er nicht machen, weil alles, was er dazu hätte heranziehen können, sich selber im Luftschiff befand, will sagen, mit der Erde mitbewegt wurde. Es fehlte ihm außerhalb seines Luftschiffes der unbewegte feste Boden, wo er die zwei Vergleichspfähle hätte einschlagen können.

Die Größe der Verkürzung ist übrigens für alle auf der Erde vorkommenden Geschwindigkeiten ganz unmeßbar klein, und auch für die ungeheure Geschwindigkeit von 30 km in der Sekunde, mit welcher sich die Erde um die Sonne bewegt, mußte Lorenz nur annehmen, daß das Meter sich um den zweihunderttausendsten Teil eines Millimeters verkürze. Dann sind die paradoxen Resultate der Versuche von Michelson erklärt. Lorenz versuchte auch einen physikalisch verständlichen Grund anzugeben für die Verkürzung, indem er annahm, daß der Ätherwind, der bei der Bewegung der Körper durch den ruhenden Äther notwendig entstehen muß, auf die Elektronen, aus denen zum großen Teil die Körper bestehen, einwirke und

dadurch die Verkürzung nach Maßgabe der Körpergeschwindigkeit hervorrufe. Indes mag das hier unerörtert bleiben.

3.

Das war der Stand der Dinge, als 1905 der damals sechsundzwanzigjährige Berner Privatdozent Albert Einstein sich dem Problem zuwandte.

Den Ausgangspunkt Einsteins bilden die paradoxen Resultate der soeben besprochenen Versuche Michelsons und Fizeaus. Da nach dem Versuche Fizeaus der Äther sich mit den hindurchbewegten Körpern nicht mitbewegt, nach dem Versuche von Michelson aber sich mitbewegen mußte, so folgert Einstein zunächst, daß es überhaupt keinen Äther gibt.

Sodann gewinnt er aus den Versuchen von Michelson und andern zwei Grundprinzipien, auf denen seine ganze Theorie beruht, und mit denen sie steht und fällt. — Nach dem Obigen war es nicht gelungen, einen Unterschied in der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes festzustellen, wenn man sie einmal von einem ruhenden und einmal von einem bewegten Standpunkt aus bestimmte. Aber aus der einfachen Beobachtungstatsache machte Einstein ein Naturgesetz; aus dem „Es ist bisher nicht gelungen“ machte er ein „Es kann niemals gelingen“. Mit andern Worten: Gestützt auf die bisherigen Fälle, wo sich die Lichtgeschwindigkeit von dem Bewegungszustand des Beobachters unabhängig gezeigt hatte, macht Einstein die Hypothese, daß das immer so sein müsse, daß es ein ganz ausnahmslos gültiges Naturgesetz sei.

In derselben Weise gewinnt er das zweite Prinzip. Nach allen bisher gemachten Anstrengungen war es nicht gelungen, eine andere als Relativbewegung nachzuweisen. Daraus schließt Einstein: „Es kann auch nicht gelingen. Es ist ein durchgreifendes Naturgesetz, daß wir absolute Bewegung nicht erkennen können.“ Da sich die absolute Bewegung dadurch zeigen mußte, daß irgendein Vorgang sich irgendwie änderte, je nachdem er sich auf einem bewegten oder auf einem ruhenden Körper abspielte, so können wir das Gesetz auch so ausdrücken: „Jedes Naturgeschehen vollzieht sich genau nach denselben allgemeinen Gesetzen, mag es sich auf einem ruhenden oder bewegten Körper abspielen.“ Und da wir die quantitativen Beziehungen der Körper zueinander durch mathematische Formeln festlegen, so kann man auch sagen: „Die mathematischen Formeln, welche der quantitative Ausdruck sind für die Naturgesetze, müssen genau dieselben sein, ob sie von einem bewegten oder unbewegten Standpunkt aus aufgestellt sind.“

Anfangs fügte Einstein dem letzten Satz noch die Einschränkung hinzu, daß die Bewegung eine gleichmäßige, d. h. von konstanter Richtung und Geschwindigkeit sein müsse. Eine plötzlich eintretende Beschleunigung, z. B. beim Anfahren eines Eisenbahnzuges, in einem Freiballon, der plötzlich vom Winde erfaßt wird, können wir wahrnehmen durch den Ruck, mit welchem unser Körper gegen die Wand geschleudert wird. Auch auf einem rotierenden System, das ebenfalls zu den beschleunigten gerechnet werden muß, nur daß die Beschleunigung stets zum Rotationszentrum gerichtet ist, macht sich die rotierende Bewegung durch die Zentrifugalkraft bemerkbar. Später, 1915, ließ er diese Einschränkung fallen und verlangte, daß die Naturgesetze auch für beschleunigte und kreisende Systeme den Gesetzen für ruhende Systeme gleich sein sollen. Dieses letztere nannte er das allgemeine Relativitätsprinzip, und im Gegensatz dazu das eingeschränkte das spezielle Relativitätsprinzip.

Dann faßte Einstein beide Gesetze in mathematische Formeln, und aus diesen Formeln konnte er durch rein mathematische Ableitungen eine große Anzahl der wichtigsten Folgerungen ziehen. Diese Ableitungen bilden die Hauptleistung Einsteins, bei der er das ganze schwere Rüstzeug der modernen höheren Mathematik mit Meisterschaft handhabt, mit unerbittlicher Konsequenz die Folgerungen aus seinen Voraussetzungen zieht und sich mit bewundernswerter Kühnheit zu diesen Folgerungen bekennt, mögen sie dem gesunden Menschenverstand noch so ungereimt erscheinen. Es muß einer gemeinverständlichen Darstellung versagt bleiben, Einstein auf diesem Wege für mathematische Hochtouristen zu folgen, was um so mehr geschehen kann, als Einwendungen gegen diese mathematische Seite der Arbeiten Einsteins, so weit mir bekannt, bisher nicht vorgebracht worden sind. Daher mag es hier genügen, einige der wichtigsten Folgerungen kurz anzuführen.

Die oben besprochene, von Lorentz mittels einer eigenen Hypothese eingeführte Verkürzung aller Körper in der Bewegungsrichtung ergibt sich bei Einstein als erste Folgerung aus seinen Grundannahmen.

Zugleich aber folgt, daß auch die Zeit auf einem bewegten System langsamer verläuft als auf einem relativ zum Beobachter ruhenden.

Man kann die Geschwindigkeiten nicht mehr, wie es bisher in der Mechanik geschah, nach dem Parallelogrammsatz addieren, sondern dafür gibt es ein verwickelteres Gesetz. Selbst wenn beide Geschwindigkeiten genau die gleiche Richtung haben, z. B. wenn der Schaffner im fahrenden Eisenbahnzug vom letzten Wagen zum ersten sich bewegt, so ist seine Gesamt-

geschwindigkeit kleiner als die Summe der Geschwindigkeit des Zuges und seiner eigenen im Zug.

Die höchste Geschwindigkeit, die ein Körper annehmen kann, ist die Geschwindigkeit des Lichtes $V = 300\,000$ km in der Sekunde.

Wenn ein Körper sich mit Lichtgeschwindigkeit voranbewegt, und es kommt noch eine beliebige andere Geschwindigkeit dazu (oder auch davon), so wird die Gesamtgeschwindigkeit dadurch weder vergrößert noch verkleinert. Sie bleibt gleich der Lichtgeschwindigkeit.

Die Energie kann ohne einen materiellen Träger für sich selbst bestehen. Aber die Energie besitzt selbst eine Trägheitsmasse. Diese Trägheitsmasse der Energie kommt zu der gewöhnlichen Masse eines Körpers hinzu, wenn er die Energie aufnimmt, z. B. wenn er heißer wird.

4.

Wir gehen nun gleich zu der Frage über, welche unsere Leser vor allem beantwortet sehen möchten: „Was ist von der ganzen Theorie zu halten? Ist das tiefgründige Weisheit, ist es ein drolliger Scherz, ist es eine große Geistesverwirrung?“

Jedenfalls dem Urheber der Theorie, einem auch sonst durch hervorragende Leistungen bekannten Physiker, ist es damit bitterer Ernst. Zwar mag er anfangs seine Arbeit aufgefaßt haben als einen Versuch, die bisherigen physikalischen Kenntnisse von einem einheitlichen Gesichtspunkte aus zu erfassen, von dem man nicht mehr zu verlangen brauche, als daß die Theorie in sich widerspruchsfrei sei, — er wolle es lieber „schön“ als „richtig“ nennen; später aber, seit er sich um die experimentellen Befestigungen bemüht, hat er offenbar sein Ziel höher gesteckt und meint, daß die Welt wirklich nach seiner Theorie eingerichtet sei.

Seine zahlreichen Freunde und Anhänger aber glauben in Einsteins Theorie die höchste Weisheit zu schauen, zu welcher sich je der Menscheng Geist emporgerungen. Sie werden nicht müde, in halbwissenschaftlichen Zeitschriften so gut wie in den Tagesblättern ihren Helden zu feiern und die „weltumwälzende“ Bedeutung seiner Leistungen nicht bloß für die Physik und Astronomie, sondern für die gesamte Philosophie zu betonen.

Da braucht es uns nicht zu wundern, wenn es ihnen selbst in wissenschaftlichen Zeitschriften zuweilen in Tönen zurückschallt, die für eine sachliche Erörterung so schwieriger Fragen nicht die geeignetsten sind. Schon aus der Tatsache, daß die Meinungsäußerung beiderseits teilweise scharfe

Formen angenommen hat, kann man den Schluß ziehen, daß ein abschließendes Urteil heute noch nicht möglich ist. Um aber unsern Lesern einigermaßen ein Urteil zu ermöglichen, bis zu welchem Grade die Einsteinsche Theorie als erwiesen betrachtet werden kann, wird es zweckmäßig sein, den ganzen Aufbau der Theorie unter diesem Gesichtspunkt noch einmal an uns vorüberziehen zu lassen.

Den Ausgangspunkt bilden die paradoxen Resultate der Versuche von Michelson. Nach dem oben Gesagten müßte man diese für zweifellos sicher ansehen, und das ist auch seit vierzig Jahren geschehen. Heute allerdings muß man hinzufügen, daß der ausgezeichnete italienische Physiker A. Righi seit etwa einem Jahre in der Theorie des Versuches einen Fehler entdeckt haben will, indem ein kleines aber ausschlaggebendes Glied höherer Ordnung vernachlässigt sei. Und noch in der Nacht seines am 8. Juni 1920 erfolgten Todes schrieb er einen Zusatz zu diesen Arbeiten, in welchem er den Hauptinhalt kurz zusammenfaßt und schließt, daß die Ergebnisse der Versuche von Michelson noch nicht als endgültig betrachtet werden können, daß man sie im Lichte seiner Darlegungen erneuern müsse, um endgültig zu entscheiden, ob die ganze Relativitätstheorie auf einer sichern experimentellen Grundlage beruhe.

Aus den Versuchen Michelsons und den ebenfalls oben besprochenen von Fizeau schließt Einstein zuerst auf die Nichtexistenz des Äthers. Auf der Naturforscherversammlung zu Salzburg im Jahre 1909 sagte er: „Heute müssen wir wohl die Ätherhypothese als einen überwundenen Standpunkt ansehen.“¹ Manche Physiker sind ihm darin gefolgt. Aber wenn die Sache in populären Abhandlungen so dargestellt wird, als ob das eine ausgemachte Sache wäre, so entspricht eine solche Darstellung nicht den Tatsachen; auch zahlreiche Physiker von anerkanntem Ruf sprechen sich noch täglich für den Äther aus. Da es nicht wohl möglich ist, alle Leser dieser Zeitschrift so weit einzuführen, daß sie sich selber ein Urteil bilden können, so mögen statt dessen einige Belege aus der Literatur hier angeführt werden. Michelson² selbst sagte 1919: „Einstein meint, es gebe kein solches Ding wie den Äther. Er macht keinen Versuch, von der Fortpflanzung des Lichtes Rechenschaft zu geben, sondern hält dafür, daß der Äther über Bord geworfen werden soll.“ Zu gleicher Zeit entwickeln der Amerikaner Professor See³ und

¹ Phys. Zeitschr. X (1909) 817.

² Astronom. Nachrichten 5044 (1920) 50.

³ Eb. 5044 5048 (1920).

der deutsche Göttinger Professor Wiechert¹ vollständige Theorien des Äthers. Ähnlich, um nur einige Nobelpreisträger der letzten Jahre zu nennen, Benard², Lorenz³, Nernst⁴. Solchen Gewährsmännern gegenüber will es nicht viel bedeuten, wenn die große Masse schon den Äther für überlebt erklärt. Wir müssen hier dem amerikanischen Astronomen See recht geben, wenn er schreibt⁵: „Die Geschichte der Naturwissenschaften zeigt, daß die Wahrheit nicht von Volkstümlichkeit abhängt, und Entdeckungen nicht durch Majoritätsbeschlüsse zustande kommen, sondern von den wenigen Persönlichkeiten gemacht werden, die einsam in der Stille nachdenken und dabei einen tieferen Einblick in die verborgenen Geheimnisse der Natur erlangen.“ Es ist demnach unrichtig, zu behaupten, daß die Annahme eines Äthers von den Physikern allgemein oder zum größten Teil fallen gelassen sei. Das letzte Wort über den Äther ist noch nicht gesprochen.

Wir kommen zu den beiden Grundprinzipien, auf welche alles Weitere aufgebaut ist. Auch wenn man die Versuche Michelsons als vollkommen richtig annimmt, so geht doch Einstein über diese Versuche hinaus, indem er die Hypothese macht, daß sich in diesen Versuchen ein allgemeines Naturgesetz offenbare. Und wenn noch so oft wiederholt wird, Einstein habe die zwei Gesetze als Axiome oder Postulate an die Spitze seiner Theorie gestellt, so bleiben es doch Hypothesen. Gewiß hat Einstein als Synthetiker das Recht, die Grundgesetze für seine Theorie zu wählen, aber wenn er seine Theorie nachher als der Wirklichkeit entsprechend anerkannt haben will, und das ist bei Einstein zweifellos der Fall, so haben seine Folgerungen keine höhere Gewißheit als seine Voraussetzungen. Die Philosophie hat sich bisher nur selten und mit einer gewissen Vorsicht an die Besprechung der Relativitätstheorie herangewagt, vielleicht weil die streng mathematische Beweisführung sie abschreckte und den Eindruck hervorrief, als ob all die paradoxen Folgerungen mit mathematischer Sicherheit bewiesen seien. Das ist nicht der Fall, die Sicherheit der Folgerungen kann über die Sicherheit der Voraussetzungen nicht hinausgehen. Darum wäre eine eingehende kritische Nachprüfung der Grundprinzipien Einsteins durch die Philosophie dringend notwendig. Physikalische und mathematische

¹ Nachrichten der Ges. der Wissensch. (Göttingen 1920) 101—108.

² Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik (1918) 117—136.

³ Versuch einer Theorie u. (Leipzig 1906).

⁴ Verhandlungen d. deutschen Physik. Gesellschaft (Berlin 1916) 83—116.

⁵ Astronom. Nachrichten 5048 (1920) 139.

Kenntnisse sind dazu zwar unentbehrlich, aber doch nicht in dem Maße, daß man auch allen späteren mathematischen Erörterungen mißte folgen können. Der Kern der Einsteinschen Theorie liegt in diesen Grundhypothesen, das spätere sind paradoxe Folgerungen aus paradoxen Grundannahmen. Wir werden uns nicht eher über den Wert oder Unwert der Theorie ein endgültiges Urteil bilden können, als wir entweder das Paradoxe dieser Grundannahmen aufgeklärt oder ihre innere Unhaltbarkeit erkannt haben.

Damit soll nicht behauptet werden, daß nicht auch die befremdlichen Folgerungen der Kritik zugänglich seien. Gerade weil sie so eng und mathematisch fest mit den Voraussetzungen verbunden sind, wird sich auch hier ergeben, daß die ganze Theorie aufzugeben ist, wenn eine ihrer Hauptfolgerungen als sicher unrichtig erwiesen wird. Immerhin dürfte es nicht leicht sein, durch allgemeine philosophische Beweisführungen die Frage so zur Entscheidung zu bringen, daß auch die Vertreter der gegenteiligen Ansicht sich dabei beruhigen.

Viel eher wird das geschehen durch solche Folgerungen, die eine Bestätigung durch den Versuch zulassen. Darum hat Einstein von Anfang an darauf hingearbeitet, solche Punkte zu finden, und er hat bis jetzt dreinamhaft gemacht. Bevor wir das im einzelnen besprechen, wollen wir uns an die Bedeutung dieser Bestätigungen erinnern.

Wenn auch nur eine von diesen Folgerungen als nicht zutreffend sicher nachgewiesen wird, so ist die ganze Theorie unhaltbar.

Wenn alle sich bestätigen, so kann die Theorie richtig sein, sie muß es aber noch nicht. Denn vielleicht gibt es noch andere Theorien, die ebenfalls mit den Erscheinungen im Einklang stehen.

Ist das auch nicht der Fall, so muß allerdings zugegeben werden, daß alsdann die Beweiskraft für die Einsteinsche Theorie in den gleich zu besprechenden Fällen, wo es sich zum Teil um bisher ganz unbekannte Erscheinungen handelt, die Einstein nach Maß und Zahl vorhergesagt hat, eine sehr beträchtliche, aber keine absolute wäre.

5.

Die drei experimentell zu prüfenden Folgerungen aus der Einsteinschen Theorie sind: die Perihelbewegung des Merkurs, die Ablenkung der Lichtstrahlen in der Nähe der Sonne, die Verschiebung der Spektrallinien im Sonnenspektrum nach dem roten Ende.

Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz bewegen sich die Planeten auf elliptischen Bahnen um die Sonne. Die Achsen dieser Ellipsen haben aber keine unabänderlich feste Richtung gegen das Fixsternsystem, sie drehen sich unter dem Einfluß der übrigen Planeten. Nur die Bewegung des sonnen-nächsten unserer Planeten, des Merkurs, läßt sich durch diese Einflüsse nicht reiflos deuten. Es bleibt eine unerklärte Drehung von etwas mehr als dem hundertsten Teil eines Grades in 100 Jahren. (Das eine Ende der großen Ellipsenachse fällt mit dem Perihel, d. i. dem Punkte der Bahn zusammen, an welchem der Stern der Sonne am nächsten ist, weshalb man auch kurz von „Perihelbewegung“ spricht.)

Von dieser Tatsache, die seit etwa 60 Jahren bekannt ist, konnte die einfache Newtonsche Gravitationstheorie keine Rechenschaft geben, während Einstein nach seiner Theorie diese Verschiebung des Merkurperihels herausrechnete, zwar zuerst mit einem bedeutenden Fehler, aber dann doch von dem verlangten Betrag. Trotzdem kann man darin keinen Beweis für die Richtigkeit der Relativitätstheorie erblicken, weil wir jetzt sogar eine ganze Reihe von Theorien besitzen, welche ebenfalls die Erscheinung erklären, aber ohne die Annahme so gewagter Folgerungen zu verlangen.

Seeliger¹ erklärte die Merkurbewegung ganz auf Grund der Newtonschen Gravitationstheorie, indem er nur annahm, daß sich noch andere ganz geringe Massen in der Nähe der Sonne befinden, Massen, die sich uns sonst durch die Erzeugung des Tierkreislichtes ebenfalls zu erkennen geben.

Sehr beachtenswert ist die neuere Erklärung des amerikanischen Astronomen See², der einmal für die Gravitation eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich derjenigen des Lichtes annimmt und außerdem voraussetzt, daß die anziehende Wirkung eines Körpers auf einen andern durch Dazwischentreten eines dritten Körpers teilweise abgeschirmt wird. Diese Voraussetzung ist deshalb so beachtenswert, weil sie auch die Unregelmäßigkeiten der Bewegung unseres Mondes zur Zeit einer Mondfinsternis erklären würde.

Endlich folgert auch Wiechert³ aus seiner Äthertheorie die Bewegung des Merkurperihels.

Darum kann man aus Einsteins Erklärung der Perihelbewegung des Merkurs keinen Schluß machen auf die Richtigkeit seiner Theorie.

¹ Sitzungsber. der Königl. akad. Ges. zu München 36 (1907) 595—622.

² Astronom. Nachrichten 5048 (1920).

³ Nachrichten der Ges. der Wissensch. (Göttingen 1920) 101 ff.

Die zweite Tatsache ist die seit einem Jahre viel besprochene Krümmung der Lichtstrahlen in der Nähe der Sonne. Einstein hatte diese Ablenkung des Lichtes ebenfalls als Folgerung aus seiner Theorie vorhergesagt. Diese Vorhersage zu prüfen bietet sich Gelegenheit bei einer totalen Sonnenfinsternis, weil man alsdann die Sterne, die nahe bei der Sonne zu stehen scheinen, deren Licht also nahe an der Sonne vorbeigegangen ist, photographieren kann. Die an verschiedenen Seiten der Sonne stehenden Sterne müssen dann einen etwas andern Abstand voneinander haben, als wenn dieselben Sterne mit ganz denselben Apparaten photographiert werden zu einer Zeit, wo die Sonne nicht zwischen ihnen steht. Die Aufnahmen, welche eine zu diesem Zweck ausgesandte Expedition bei Gelegenheit der totalen Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 in Brasilien machte, zeigen in der Tat eine kleine Änderung der Sternenabstände in dem erwarteten Sinn. Da jedoch die Richtung der Änderung zum Teil sehr bedeutend von der errechneten abweicht, so muß man schließen, daß hier noch andere Umstände mitgespielt haben; dann aber kann man auch nicht mehr behaupten, daß die Größenordnung der Verschiebung die von Einstein vorausberechnete sei. Namentlich machte Courboisier¹ von der Sternwarte Babelsberg bei Berlin aufmerksam auf die sog. jährliche Refraktion, welche möglicherweise Sternverschiebungen von ähnlichem Betrage auf den photographischen Platten erzeugen würde.

Endlich ist nicht zu übersehen, daß auch die bereits genannten Äthertheorien von See und von Wiechert Ablenkungen des Sternenlichtes verlangen. Darum können auch die Ergebnisse der Sonnenfinsternis vorläufig nicht als Beweise für die Richtigkeit der Einsteinschen Theorie herangezogen werden.

Drittens folgerte Einstein aus seiner Theorie, daß die Wellenlänge des Lichtes, welches etwa ein Wasserstoffteilchen auf der Sonne aussendet, infolge der stärkeren Anziehungskraft der Sonne etwas länger ist, als wenn das Teilchen sich auf der Erde befindet, wodurch uns das Sonnenlicht etwas mehr rot erscheint. Der Betrag der Verkürzung ist außerordentlich gering, von der Größenordnung des tausendmillionsten Teils von 1 mm, und es sind nur die allerbesten optischen Instrumente zur Messung der Wellenlänge des Lichtes imstande, so kleine Größen überhaupt sichtbar zu

¹ Astronom. Nachrichten 5056 (1920).

machen. Man braucht sich deshalb nicht zu wundern, wenn die Versuche, die in Deutschland, England, Amerika gemacht wurden, keine übereinstimmenden Resultate ergeben haben. Die Behauptung der Bonner Forscher Grebe und Bachem, die Verschiebung der Spektrallinien auch um den Betrag, den Einstein angegeben hat, beobachtet zu haben, steht bis jetzt ganz vereinzelt da, und namentlich die Versuche auf dem Mount Wilson in Amerika, die mit einem bedeutend leistungsfähigeren Instrument angestellt waren, haben die Einsteinsche Theorie nicht bestätigen können. Da aber die Arbeiten mit allen Mitteln eifrig fortgesetzt werden, so darf man hoffen, in nicht zu ferner Zeit diese Frage durch den Versuch entschieden zu sehen. Inzwischen kann man nur sagen, daß sich die Einsteinsche Folgerung in diesem Punkte bisher nicht bestätigt hat, und wenn die Versuche der nächsten Zeit nicht wesentlich andere Ergebnisse zutage fördern als fast alle bisherigen, so wird die Theorie an dieser Stelle einen tödlichen Stoß bekommen.

6.

Endlich die Bedeutung der Relativitätstheorie für die Philosophie. Nach dem bisher Gesagten dürften unsere Leser sich wohl dem Urteil anschließen, zu dem auch weitaus die größte Mehrzahl der Fachphysiker sich bekennen, daß es zurzeit noch unmöglich ist, zu sagen, wie weit die Relativitätstheorie zum dauernden Bestand unserer physikalischen Kenntnisse gehören wird. Natürlich hängt davon die Bedeutung der Theorie für die Philosophie ganz wesentlich ab, und objektiv hätte der wohl recht, der diese ganze Frage als verfrüht zurückweisen möchte. Da aber diese Angelegenheit die Gemüter weiter Reize mit „Hoffnungen“ oder „Befürchtungen“ — je nach den philosophischen Anschauungen der einzelnen — erfüllt hat, so wollen wir uns hier einmal für den Augenblick auf den äußersten Standpunkt stellen und annehmen, daß die Relativitätstheorie, so wie sie jetzt von Einstein und seinen Freunden verkündet wird, durch alle Versuche bestätigt in der physikalischen Wissenschaft Aufnahme finde. Was wird dann ihre Bedeutung für die Philosophie sein? Diese Frage ausführlich im einzelnen zu beantworten, würden weiter ausholende Untersuchungen notwendig sein und ist jedenfalls im Rahmen eines kleinen Aufsatzes unmöglich; daher sollen nur noch einige häufig gehörte Fragen in möglichster Kürze, und soweit das im Augenblick möglich scheint, beantwortet werden.

Vor allem hat der Ausdruck „relativ“ zu einer häufigen Verwechslung Anlaß gegeben. Man spricht auch in der Philosophie von „relativer

Wahrheit" und meint damit jene senile, verzichtsfeilige Richtung, die nichts für unbedingt sicher behaupten will, weil alles, was uns heute als wahr erscheint, zu andern Zeiten und unter andern Verhältnissen unwahr sein könne. Diese Richtung findet in der physikalischen Relativitätstheorie keine Eideshelfer. Wenn Einstein sagt, daß eine Länge, eine Zeitspanne (nach seiner Theorie) „relative Größen“ seien, so sagt er doch bestimmt und genau, wovon die Größe abhängt, nämlich von dem relativen Bewegungszustand. Das ist gerade so wenig unbestimmt, als wenn wir sagen, daß die Länge eines Eisenstabes von seiner Temperatur abhängt. Wer sich also für solche im philosophischen Sinn relativistische Anschauungen auf die physikalische Relativitätstheorie berufen will, der hat von ihr eine ganz unrichtige Vorstellung.

Einer andern irrigen Auffassung über die Bedeutung der Relativitätstheorie begegnet man nicht selten in populären Darstellungen auch bei Verfassern, denen die Theorie an sich sonst wohl bekannt ist, wir meinen die Behauptung, daß die Begriffe von Raum und Zeit nun von Grund auf umgestürzt seien. Da ist aber sehr zu beachten, daß der Zeitbegriff (und ganz analog der Raumbegriff) des Physikers sich keineswegs vollkommen deckt mit dem Zeitbegriff des Philosophen. Den Physiker interessiert die Zeit, nur insoweit er sie durch Maß und Zahl messen kann. Er wählt sich einen ohne Unterbrechung in genau gleicher Weise sich wiederholenden Vorgang, etwa die Bewegungen eines Pendels, die Schwingungen einer Stimmgabel, und mißt daran die Dauer eines Vorgangs, indem er mittelst eines Zählwerkes, der Uhr, beobachtet, wie oft das Pendel (die Stimmgabel) seinen Weg macht, während der zu messende Vorgang sich abspielt. Nach Einsteins Theorie ist die Bewegung der Uhr und aller Vorgänge in der Welt vom Geschwindigkeitszustand abhängig; daraus ergibt sich, daß man nach seiner Theorie bei der Zeitbestimmung auf den Bewegungszustand des Systems, auf welchem das zu messende Ereignis stattfindet, achten muß. Da dieses quantitative Element der einzige Inhalt des physikalischen Zeitbegriffes ist, so mag der Physiker mit einem gewissen Recht sagen, daß Einstein den Begriff (richtiger „seinen“ Begriff) der Zeit geändert habe. Die Änderung bezieht sich nur auf die Zeitmessung. Was die Erkenntnislehre und Psychologie außerdem noch von Raum und Zeit lehren, wird dadurch nicht berührt. Darum wird auch in physikalischen Abhandlungen diese philosophische Seite oft mit Bewußtsein abgewiesen, z. B. von

A. Pflüger¹: „Sie (die Physik) überläßt das den Philosophen zur freundlichen Begutachtung.“ Noch häufiger wird die philosophische Frage stillschweigend übergangen. Für den Leser solcher Abhandlungen ergibt sich aber daraus um so mehr die Notwendigkeit, sich den Unterschied der Begriffe von Zeit und Raum in der Philosophie einerseits und andererseits in der Physik gegenwärtig zu halten. Er darf nicht eine Aussage, die sich auf den physikalischen Zeitbegriff bezieht, ohne weiteres auf den philosophischen übertragen.

„Einstein hat bewiesen, daß es nichts Absolutes gibt, keine absolute Bewegung, keine absolute Geschwindigkeit.“

Einstein hat nur behauptet, daß wir absolute Bewegungen nicht nachweisen können. Wir haben es in der Tat nie gekonnt, d. h. es gibt bis zur Stunde keinen physikalischen Vorgang in unserer Welt, bei welchem eine absolute Bewegung irgendwie in die Erscheinung träte. Andererseits zeigt die Physik auch nicht, daß es keine absolute Bewegung gibt. Die Philosophie lehrt uns aber mit aller Bestimmtheit, daß es absolute Bewegung gibt. Sobald zwei Körper sich relativ zueinander bewegen, gibt es eine absolute Bewegung. Denn wenn beide in absoluter Ruhe beharrten, könnten sie sich auch nicht relativ zueinander bewegen. Wohl ist zuzugeben, daß hier in physikalischen Abhandlungen oft gefehlt wird. Ausdrücke wie: „Was ich nicht messen kann, das existiert nicht“, kann man häufig finden. Hin und wieder sind sie allerdings durch den Zusatz gemildert: „Das existiert für mich nicht.“ Da gilt etwas Ähnliches, wie soeben gesagt wurde. Der Physiker will damit, mehr kurz als genau, zum Ausdruck bringen, daß etwas ihn nicht interessiere, daß es in seiner Welt, in seinem Ideenzirkel keine Rolle spiele. Tatsächlich spielt die absolute Bewegung in der Physik keine Rolle. Wenn wirklich jemand aus dem Satz: „Das sehe ich nicht“, folgern wollte: „also existiert es nicht“, so macht er eben einen Trugschluß.

Noch eine Behauptung kann man nicht selten lesen: „Einstein hat gezeigt, daß zwischen Raum und Zeit gar kein Unterschied mehr besteht.“ Das ist in der Tat ein Punkt, in welchem man Einstein entschieden widersprechen muß, und in welchem er auch schon von den verschiedensten Seiten Widerspruch gefunden hat, nicht nur bei den Philosophen, sondern auch bei Fachphysikern. Es würde zu weit führen, das hier im einzelnen zu

¹ Das Einsteinsche Relativitätsprinzip (Bonn 1920) 29 Anm.

belegen. Der Unterschied von Raum und Zeit ist unabhängig von allen subjektiven Elementen so allseitig, so fundamental, daß er durch mathematische Formeln nicht aus der Welt geschafft werden kann. Denn nur das ist es, was Einstein, richtiger schon vor ihm Minkowski, geleistet hat: In unsern mathematischen Formeln, welche z. B. die Bahn eines Punktes bezeichnen, haben wir Beziehungen zwischen den Raum- und den Zeitkoordinaten. Die Gleichung soll uns ja angeben, an welchem Ort sich der Punkt zu irgendeiner Zeit befindet. Es sind also im Höchstfall drei räumliche Koordinaten, gewöhnlich x , y , z , und die Zeitkoordinate t darin enthalten. Minkowski hat nun gezeigt, wie man die Gleichungen umgestalten kann, so daß die vier veränderlichen Größen alle formell in der gleichen Weise darin auftreten. So sagt Einstein¹ wörtlich: „... Minkowskis wichtige Entdeckung . . . liegt vielmehr in der Erkenntnis, daß das vierdimensionale, zeiträumliche Kontinuum der Relativitätstheorie in seinen maßgebenden formalen Eigenschaften die weitgehendste Verwandtschaft zeigt zu dem dreidimensionalen Kontinuum des Euklidischen geometrischen Raumes.“

Im vorliegenden habe ich mich bemüht, den wiederholten Bitten der Redaktion nachkommend, eine vorurteilsfreie Darstellung des heutigen Standes der Relativitätstheorie zu geben. Um dahin zu gelangen, mußte angesichts der zahlreichen Veröffentlichungen, in denen Einstein über alle Maße gefeiert wird, hier häufiger auf die Schatten des Bildes hingewiesen werden. Es geschah auch das in der aufrichtigen Meinung, dadurch der Wahrheit näher zu kommen.

Nach dem Dargelegten könnte man den heutigen Stand der Relativitätstheorie kurz dahin zusammenfassen:

Bei aller Anerkennung der wahrhaft genialen Leistungen Einsteins kann man sich doch der Erkenntnis nicht verschließen, daß die Theorie noch große physikalische Schwierigkeiten und große Denkschwierigkeiten in sich birgt, und es läßt sich nicht vorhersagen, in welcher Richtung sie ihre Lösung finden werden. Die Theorie wird darum auch von den besten Fachgenossen Einsteins sehr verschieden beurteilt.

Eine unzweifelhafte, ohne Widerspruch gebliebene Befestigung durch Tatsachen hat sie bis jetzt nicht gefunden, ebensowenig liegt bis jetzt eine entscheidende Widerlegung durch Tatsachen vor.

¹ Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, gemeinverständlich (Sammlung Bieweg), 38.