
W I S S E N i m W e r d e n

Naturwissenschaftliche Blätter

Herausgegeben von
Univ. Prof. Dr. Dr. Karl SAPPER, Graz, Prof. Dr. Stjepan
MOHOROVIČIĆ, Zagreb, Gotthard BARTH, Greifenstein.
Schriftleitung: G. BARTH, Burg Greifenstein/Donau, N. Österr.

Jahresabonnement [6 Hefte] S 36.--, DM 6.--

Im nächsten Heft:

Dr. Johannes HAEDICKE, Bielefeld:
Die Ursachen der Gezeiten nach Galilei.

F. S. MAIER, Wien:
Das Hebelgesetz.

Univ. Prof. Dr. Bruno THÜRING, Karlsruhe:
Raum und Zeit in der Weltraumforschung.

Bericht von der Tagung auf Burg Greifenstein, November 1958:
„Die Krise der Relativitätstheorie“

Buchbesprechungen.

Österr. Postscheckkonto Nr. 176.562, G. Barth, U. Tullnerbach.
Eigentümer, Verleger, verantw. Redakteur: Gotth. Barth, Unter Tullnerbach,
Sagberg 49. Druck: Barth, Greifenstein/Donau.

Die Relativitätstheorie

Die Rehabilitierung der Gleichzeitigkeit.

Von Dr. Karl VOGTHERR, München.

Die spezielle Relativitätstheorie Einsteins befaßt sich, von der physikalischen Seite her gesehen, mit dem Problem der Lichtausbreitung. Es hatte sich herausgestellt, daß die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle ist (J. Stark, de Sitter), wie dies die ungestörte Ausbildung des Dopplereffekts bei den Komponenten eines Doppelsterns deutlich beweist. Andererseits hatte das negative Ergebnis des Michelsonversuchs und anderer Versuche, eine Bewegung der Erde zum Lorentzischen Lichtäther mittels optischer und elektromagnetischer Experimente nachzuweisen, es nahelegt, das Relativitätsprinzip, das bereits für die mechanischen Vorgänge galt, auf alle Vorgänge, auch die elektrischen und magnetischen auszudehnen. Einstein nahm also an, daß es allgemein und für alle Vorgänge zutrifft, und daß in allen Inertialsystemen die gleichen Naturgesetze gelten.

Dem schien allerdings der Satz, daß die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle ist, zu widersprechen. Denn dies schien mit zwingender Notwendigkeit auf ein Medium der Lichtfortpflanzung, einen „Äther“, hinzuweisen, der doch andererseits sich bei der Erdbewegung als „Ätherwind“ auf keine Weise nachweisen ließ. Ist die Bewegung gegen den in sich unbewegten, den Raum gleichmäßig erfüllenden Äther,

wie ihn H. A. Lorentz sich dachte, auf keinerlei Weise nachzuweisen, so war dieser Äther nicht verifizierbar und der Begriff mußte als inhaltsleer fallen gelassen werden. Andererseits konnte man sich unmöglich vorstellen, wie derselbe Lichtvorgang mit der gleichen Geschwindigkeit sich in jedem der gegen einander bewegten Inertialsysteme nach allen Richtungen ausbreiten kann, wie es das Relativitätsprinzip zu fordern schien. Hier lag also ein scheinbar unlösbares Problem vor, der Satz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und das Relativitätsprinzip, beide durch Experimente hinreichend belegt, schienen unvereinbar zu sein. Wie brachte es Einstein fertig, diesen Widerspruch zu lösen?

Es gelang ihm angeblich durch eine tief durchdachte Analyse der Begriffe von Raum und Zeit, wie sie der messenden Physik zu Grunde zu legen sind.

Es handelt sich hier in erster Linie um eine Erörterung des Begriffs der Gleichzeitigkeit. Gleich in § 1 der ersten und grundlegenden Abhandlung zur Relativitätstheorie (Ann. d. Physik Bd. 17, 1905) kommt Einstein darauf zu sprechen und er gelangt zu dem Ergebnis, daß man Gleichzeitigkeit nicht feststellen, sondern nur festsetzen kann. Es heißt dort: „Wir haben bisher keine für A und B gemeinsame ‚Zeit‘ definiert. Die letztere Zeit kann nun definiert werden, indem man durch Definition festsetzt, daß die ‚Zeit‘, welche das Licht braucht, um von A nach B zu gelangen, gleich ist der ‚Zeit‘, welche es braucht, um von B nach A zu gelangen.“ In „Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie“, 16. Auflage 1954 (und ebenso in allen früheren Auflagen) heißt es S. 13: „Eine Prüfung dieser Voraussetzung (daß das Licht sich mit der gleichen Geschwindigkeit auf der Strecke AM wie auf der Strecke BM fortpflanzt), wäre nur dann möglich, wenn man über die Mittel der Zeitmessung

bereits verfügte. Man scheint sich also hier in einem logischen Zirkel zu bewegen“ (M ist der Mittelpunkt der Strecke AB) — und auf S. 14: „Daß das Licht zum Durchlaufen des Weges AM und zum Durchlaufen der Strecke BM dieselbe Zeit brauche, ist in Wahrheit keine Voraussetzung oder Hypothese über die physikalische Natur des Lichts, sondern eine Festsetzung, die ich nach freiem Ermessen treffen kann, um zu einer Definition der Gleichzeitigkeit zu gelangen.“ Diese Festsetzung wird als „praktisch“ bezeichnet. In Einsteins Abhandlung „Raum, Äther und Feld in der Physik“ (Forum Philosophicum Vol. I, Nr. 2, Leipz. 1930) heißt es: „Man erkannte, daß dem Inbegriff gleichzeitiger Ereignisse nichts Reales entspreche.“

Ebenso sagt M. Planck, daß „der Frage nach der Zeit, die in Wirklichkeit zwischen zwei Ereignissen an verschiedenen Orten verstreicht, in keinerlei Weise ein physikalischer Sinn zugeschrieben werden kann“. 1) M. Born meint: „Für den messenden Physiker hat der Satz, ein Ereignis bei A und ein Ereignis bei B seien gleichzeitig, schlechthin keinen Sinn, denn er besitzt kein Mittel, um über die Richtigkeit oder Falschheit der Behauptung zu entscheiden“ 2). Und W. Heisenberg sagt: „Das Zentrum der speziellen Relativitätstheorie ist die Feststellung, daß die Gleichzeitigkeit an verschiedenen Orten ein problematischer Begriff ist.... Die Frage nach der wirklichen Gleichzeitigkeit ist ein Scheinproblem, eine Frage, auf die es keine Antwort gibt, weil sie falsch gestellt ist“ 3).

Es sei also grundsätzlich unmöglich, Gleichzeitigkeit an verschiedenen Orten festzustellen und zwar nicht nur die übereinstimmende Synchronstellung von Uhren in den gegen einander bewegten Systemen (absolute Zeit), sondern auch die Synchronstellung der Uhren eines einzelnen

Systems. Als Begründung für diese prinzipielle Nichtfeststellbarkeit wird angeführt, daß man, um Gleichzeitigkeit in A und B festzustellen, ein Signal von unendlich großer Geschwindigkeit benötigte oder zuvor die Geschwindigkeit des Signals kennen müßte. Ersteres sei nicht realisierbar und letzteres schon logisch unmöglich, da zur Kenntnis einer Signalgeschwindigkeit von A nach B die konstatierbare Gleichzeitigkeit in A und B Voraussetzung wäre. So sagt Einstein: „Die Zeit des Ereignisses können wir nur dann bestimmen, wenn wir die Zeitdauer kennen, welche das Signal unterwegs war“⁴). Ebenso sagt H. Reichenbach: „Um die Gleichzeitigkeit entfernter Ereignisse festzustellen, brauchen wir die Kenntnis einer Geschwindigkeit. Um eine Geschwindigkeit zu messen, brauchen wir die Kenntnis der Gleichzeitigkeit entfernter Ereignisse. Das Auftreten dieses Zirkels beweist, daß die Erkenntnis der Gleichzeitigkeit prinzipiell unmöglich ist“⁵). J. Jeans meint: „Um eine vollkommene Übereinstimmung der Zeit (an verschiedenen Orten) zu erzielen, müßte man die genaue Zeit kennen, die das Signal zu seiner Reise braucht“⁶). A. S. Eddington: „Als wir versuchten genaue Anleitungen (zur Beobachtung der Gleichzeitigkeit) zu formulieren, fanden wir, daß sie einen Zirkelschluß enthalten, da sie ein Wissen von einer Sache voraussetzen, die ihrerseits ein Wissen von verschiedenortiger Gleichzeitigkeit voraussetzt... Die Unbeobachtbarkeit der Gleichzeitigkeit stellt sich als eine rein erkenntnistheoretische Schlußfolgerung heraus“⁷). Louis de Broglie sagt: „Einstein bewies, daß die Nichtexistenz von Signalen, die sich mit unendlicher Geschwindigkeit weiter bewegen, die Unmöglichkeit im Gefolge hat, die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse zu verifizieren, die sich an weit von einander entfernten Stellen befinden“⁸).

Wenn sich Gleichzeitigkeit grundsätzlich nicht feststellen läßt, so bleibt, da dieser Begriff für die messende

Physik unentbehrlich ist — jede Geschwindigkeit als bestimmte Größe Weg/Zeit setzt ihn bereits voraus — nichts anderes übrig, als eine zweckmäßige Festsetzung zu treffen, was als gleichzeitig gelten soll. H. Poincaré hatte bereits 1898 darauf hingewiesen. Er sagt: „Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse oder die Ordnung ihrer Aufeinanderfolge und die Gleichheit zweier Zeitdauern müssen so definiert werden, daß der Ausspruch der Naturgesetze möglichst einfach wird; mit anderen Worten: alle diese Regeln und Definitionen sind nur die Frucht eines unbewußten Opportunismus... Wir wählen diese Regeln nicht weil sie wahr, sondern weil sie bequem sind“⁹).

Auch für Einstein erwies sich eine zweckmäßige Festsetzung der Gleichzeitigkeit als bequem, denn sie gab ihm die Lösung des Problems der Vereinbarkeit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit mit dem Relativitätsprinzip in die Hand. Wenn Gleichzeitigkeit keine reale Geltung hat, so konnten ja Uhren in den gegen einander bewegten Systemen (in Gedanken) so eingestellt und synchronisiert werden, daß mit ihnen gemessen die Lichtgeschwindigkeit in jedem der Systeme auf dem Hinweg und Rückweg als gleich und gleich c herauskommt. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit war mit dem Relativitätsprinzip vereinbar geworden und c im Vacuum galt von nun ab als universelle Konstante. Freilich mußte man Vorsorge treffen, daß die wirklichen Uhren und Maßstäbe in gegen einander bewegten Systemen mit dieser Festsetzung nicht in Konflikt geraten. Man ergänzte sie daher durch die Hypothese, daß gleiche Maßstäbe und gleiche Uhren in den gegen einander bewegten Systemen S und S' , die man sich „hinübergereicht“ dachte, sich „von selbst“ so einstellen, daß mit ihnen gemessen, nachdem die Uhren nach Einsteins Vorschrift synchronisiert sind, die Lichtgeschwindigkeit in allen Systemen als konstant herauskommt¹⁰).

Diese als zutreffend vorausgesetzte Hypothese gestattete die Lorentztransformation zu berechnen d.h. die Umrechnungsformeln zwischen den Raum- und Zeitkoordinaten x, y, z, t eines Ereignisses, gemessen in S , und den Koordinaten desselben Ereignisses x', y', z', t' , gemessen von S' aus.

Auch sollen Experimente das Zutreffen der Lorentztransformation indirekt bestätigt haben. Die Massenveränderung von Elektronen und Protonen bei hohen Geschwindigkeiten und der sogenannte „transversale Doppereffekt“ an Wasserstoffkanalstrahlen zeigten Übereinstimmung mit den aus der Lorentztransformation abgeleiteten Formeln. Man spricht daher von der realen Bedeutung der Lorentztransformation.

Freilich mußte man es bei alledem in Kauf nehmen, daß die gleichen Ereignisse im System S als gleichzeitig, im System S' dagegen als nicht gleichzeitig sich darstellen. Auch stellt sich nun heraus, daß, wenn zwei Körper gleicher „Ruhmasse“ m_A und m_B sich gegen einander bewegen, nach den Formeln m_A größer und auch kleiner wird als m_B , und Entsprechendes gilt von der Gangverlangsamung gegen einander bewegter Uhren und der Verkürzung gegen einander bewegter Maßstäbe. Die Feststellungen an denselben Körpern und Vorgängen, von verschiedenen bewegten Systemen aus gewonnen, decken sich nicht und sind ebenso wie ihre Bewegung reziprok. Mit der Lorentztransformation wird die Allgemeingültigkeit der räumlichen und zeitlichen Beziehungen aufgehoben, sie werden relativ und vom „Bezugskörper“ abhängig. Andererseits aber erfordert der Begriff der Realität der Außenwelt die Eindeutigkeit aller ihre Dinge, Zustände und Vorgänge betreffenden Erkenntnisse. Demnach wäre der Begriff einer erkennbaren Wirklichkeit (im Sinne der empirischen, nichtmetaphysischen Realität) in der

Relativitätstheorie aufgehoben? Wo man mit praktischen Festsetzungen zur Ergänzung der Messungen operiert, lassen sich in der Außenwelt metrische Beziehungen nicht mehr objektiv erkennen und die mathematischen „Naturgesetze“ werden zu zweckmäßigen Erfindungen.

Gegen diese positivistisch - konventionalistische Auffassung wird der Relativitätstheoretiker, sofern er sich zur realistischen Naturauffassung bekennt — und Einstein selbst und seine prominenten Anhänger Planck, Heisenberg, Eddington, Born u.a. sind dazu zu zählen — nachdrücklich Einspruch erheben. Er wird darauf hinweisen, daß er über die Formeln einer eindeutigen Darstellung sehr wohl verfügt. An die Stelle der getrennten und mehrdeutigen, gegenseitig umrechenbaren Raumgrößen und Zeitgrößen, wie sie in den gegeneinander bewegten Systemen auftreten, sei deren Vereinigung in dem vierdimensionalen Kontinuum der „Raumzeitunion“ zu setzen, entsprechend der Formel $s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2}$. Dieses s , bz. Δs , der Raumzeitabstand oder das „Intervall“ zweier Ereignisse ist eine Größe, die von allen Systemen aus übereinstimmend ermittelt werden kann, wie sich durch Einsetzen der Lorentztransformation ohne weiteres ergibt, also eine eindeutige, vom Koordinatensystem unabhängige Größe. In dem vierdimensionalen Kontinuum der „Welt“ Minkowskis mit ihren Weltpunkten und Weltlinien ist alle Mehrdeutigkeit der Messungsergebnisse in den Systemen verschwunden, alle Größen sind „invariant“ geworden, sie können somit als das Symbol der realen Welt gelten. So sagt A. S. Eddington: „Die vierdimensionale Welt ist keine bloße Erläuterung, sie ist die wirkliche Welt der Physik, zu der man auf den allgemein anerkannten Wegen gelangt ist, auf denen die Physik stets nach der Wirklichkeit gestrebt hat..., in diese absolute Welt muß man eindringen, wenn

man nach der Wahrheit über die Natur strebt“ ... „Die Relativitätstheorie erhebt den Anspruch, zu einem klaren und tieferen Verständnis der physikalischen Welt zu führen, als es früher möglich war“¹¹). Ebenso sagt M. Born: „Die Frage nach der Wirklichkeit mit Bezug auf die makroskopische Materie erfährt von diesem Standpunkt (der vierdimensionalen „Welt“) aus eine klare und einfache Antwort“¹²).

Somit scheint nach erregenden Schwierigkeiten die Ordnung wiederhergestellt zu sein. Mit größter Sorgfalt angestellte Experimente und Beobachtungen führten, wie es schien, auf ein widersprechendes Ergebnis, das nur mit dem Aufwand bewundernswerten Scharfsinns, der ganz neue Aspekte der physikalischen Welt eröffnete, sich lösen ließ. Man hat auch unter dem Eindruck, daß hier die Forschung etwas Weltumstürzendes vollbracht hat, dies mit Worten, die der Größe der Tat angemessen schienen, gefeiert. So sagt Max Planck: Diese neue Auffassung des Zeitbegriffs „übertrifft an Kühnheit wohl alles, was bisher in der spekulativen Naturforschung, ja in der philosophischen Erkenntnistheorie geleistet wurde... Mit der durch das Relativitätsprinzip im Bereich der physikalischen Weltanschauung hervorgerufenen Umwälzung ist an Ausdehnung und Tiefe wohl nur die durch die Einführung des Kopernikanischen Weltsystems bedingte zu vergleichen“¹³). Auch Moritz Schlick stimmt in den Hymnus ein: „Der Begriff der Gleichzeitigkeit ist der Angelpunkt der speziellen Relativitätstheorie, seine erkenntnistheoretische Klärung das Bedeutendste der Leistung Einsteins. Durch eine scharfsinnige Analyse dieses fundamentalen Begriffs werden alte hartnäckige Rätsel der Physik gelöst, der Weg zur Relativität von Raum und Zeit gebahnt und Gipfel der Erkenntnis erreicht, frei von metaphysischer Bewölkung, die einen tiefen Einblick in den Zusammenhang

des Universums gewähren“¹⁴). Hermann Weyl sagt: „Die Relativitätstheorie mutet uns zu, den Glauben an die objektive Bedeutung der Gleichzeitigkeit abzulegen; in der Befreiung von diesem Dogma liegt die große erkenntnistheoretische Tat Einsteins, die seinen Namen neben den des Kopernikus rückt“¹⁵). Und H. Reichenbach meint: „Hier (in der Festsetzung der Gleichzeitigkeit nach freiem Ermessen) liegt einer der tiefsten Gedanken der Relativitätstheorie“¹⁶).

Wenn der Begriff der Gleichzeitigkeit „der Angelpunkt der speziellen Relativitätstheorie“ ist (M. Schlick) und er zusammen mit dem Relativitätsprinzip das Fundament bildet, auf dem der ganze Bau ruht, so gibt dies dem Kritiker Anlaß, sich über ihn besonders eingehend Gedanken zu machen. Dem Begriff der objektiven Gleichzeitigkeit kann nur dann ein Sinn beigelegt werden, wenn eine Antwort auf die Frage: sind diese beiden Ereignisse an den Orten A und B gleichzeitig oder nicht? gegeben werden kann; das heißt, wenn sich wenigstens im Prinzip die Methode angeben läßt, deren Beachtung eine Antwort auf die Frage ermöglicht. Hierin müssen wir Einstein beipflichten¹⁷). Die Frage nach dem Sinn der Gleichzeitigkeit ist — sofern es sich um physische Realität und Physik handelt — gleichbedeutend mit deren Verifizierbarkeit, zum mindesten einer grundsätzlichen, die nicht schon logisch ausgeschlossen ist.

Wie steht es damit? Läßt sich in der Tat die Gleichzeitigkeit an verschiedenen Orten nicht nachweisen — oder läßt sich, wenn man es sich genauer überlegt, doch vielleicht eine Methode angeben, welche die Gleichzeitigkeit beobachtbar macht und sie verifiziert? — Wir denken uns folgende Vorrichtung: In einem System, in welchem der Trägheitssatz gilt (Inertialsystem, Basiskörper)

— mit genügender Näherung kann dafür in horizontalen Richtungen der Raum der Erdoberfläche gelten — sei die Strecke AB mit dem Mittelpunkt M abgemessen. Wir lassen nun Bewegungs- oder Fortpflanzungsvorgänge gleicher Art vom Mittelpunkt M gleichzeitig ausgehen und als Signale nach A und B verlaufen. Sind die Bewegungs- und Fortpflanzungsbedingungen beiderseits von M gleich, so sind auch die Signalgeschwindigkeiten gleich und es treffen die Signale in A und B gleichzeitig ein, nach dem Grundsatz, daß unter gleichen Bedingungen Gleiches geschieht, d. h. nach der allgemeinen und einheitlichen Naturgesetzmäßigkeit. Man kann so Uhren in A und B synchron stellen und ebenso beliebig postierte Uhren längs AB, da man nun auch die Geschwindigkeit eines Signals AB feststellen kann.

Es seien z. B. in einem homogenen Gravitationsfeld an einer senkrechten Ebene (Brett, Mauer) in A und B zwei gleiche Rollen mit zu dieser Ebene senkrechten Achsen in gleicher Höhe angebracht und ein homogener horizontal verlaufender Faden über diese Rollen gelegt, der an seinen in A und B herabhängenden Enden durch gleiche Gewichte in Spannung gehalten wird. Wird dann der Faden in der Mitte bei M durchtrennt, so beginnen die Gewichte gleichzeitig zu fallen. Oder: Schallsignale, von M gleichzeitig abgesandt, erreichen in homogener ruhender Luft A und B gleichzeitig. Es sei ferner AB die waagrechte Basislinie eines gleichschenkeligen Dreiecks AMB, mit der Spitze M nach oben gerichtet. Läßt man dann von M gleiche Kugeln gleichzeitig los und längs Rinnen MA und MB herabrollen, so treffen sie in A und B gleichzeitig ein. Die mechanischen Beispiele ließen sich beliebig vermehren. — Aber auch elektrische und Lichtsignale lassen sich verwenden. Dies geht schon daraus hervor, daß sie, um einen gewissen Betrag später

in M abgesandt, mit den mechanischen Signalen in A und B gleichzeitig eintreffen. Sind die Fortpflanzungsbedingungen längs der Strecken MA und MB, die man sich auf einem festen Basiskörper abgemessen denken muß, gleich, so treffen alle Signale in A und B gleichzeitig ein.

Wäre nun in der Tat die Gleichzeitigkeit in A und B nicht feststellbar, so müßte gezeigt werden, daß sich die Gleichheit der Umstände für die Signalfortpflanzung längs MA und MB auf keine Weise feststellen läßt. Aber dieser Nachweis läßt sich nicht führen. Denken wir zunächst an die skalaren Faktoren im Beobachtungsfeld wie Temperatur, Luftdruck usw., so bestehen keine Schwierigkeiten. Die Gleichheit dieser Faktoren läßt sich durch Beobachtung mit Thermometern und Barometern längs AB feststellen. Ebenso kann die (hinreichende) Homogenität des Gravitationsfeldes mit Gravimetern festgestellt werden. Können vielleicht verborgene Vektoren im Beobachtungsraum (Kräfte, Geschwindigkeiten, Strömungen) Schwierigkeiten machen? Als ein solcher Einfluß, der sich nicht abschirmen läßt, käme vielleicht der Bewegungszustand des Trägers der elektromagnetischen Felder und Schwingungen, ein bis jetzt verborgener „Ätherwind“ in Frage. Nach der Relativitätstheorie ist ein derartiger Äther nicht vorhanden, diese Komplikation fällt daher für sie weg. Ist er aber vorhanden und stört er die Symmetrie der Bedingungen, so muß die Ätherbewegung — nach dem Grundsatz der Verifizierbarkeit — in denkbaren künftigen Experimenten auch prinzipiell beobachtbar sein. Dabei genügt es durchaus, die Homogenität dieses Vektors längs AB nach Größe und Richtung festzustellen, ohne daß sein quantitativer Betrag bekannt zu sein braucht. Wie wir die Homogenität einer dauernden Luftströmung durch Aufstellen von Windfahnen und Windstärkemessern längs AB ermitteln könnten, ohne daß die Größe der Windgeschwindigkeit

bekannt zu sein braucht (wozu die Kenntnis der Gleichzeitigkeit allerdings Voraussetzung wäre), so auch im Falle einer Ätherbewegung die Homogenität dieses Vektorfeldes mittels längs AB aufgestellter Interferometer, Bolometer, Galvanometer etc., ohne daß wir die Größe der Ätherwindgeschwindigkeit zu kennen brauchen. Orientieren wir dann die Strecke AB so, daß sie senkrecht zur Gravitation und Ätherbewegung steht, so ist die Gleichheit der Umstände wieder hergestellt und die Gleichzeitigkeitsermittlung trotz Ätherwind nach dem Symmetrieprinzip durchführbar. Von Wichtigkeit ist sich klar zu machen, daß bei alledem weder die Größe einer Geschwindigkeit noch ein Additionstheorem von Geschwindigkeiten und also auch nicht die Kenntnis der Gleichzeitigkeit vorausgesetzt wird.

Ist auf diese Weise die Gleichheit der Umstände für die Signalfortpflanzung längs MA und MB auf einem Basiskörper festgestellt, so läßt sich auch die Gleichzeitigkeit feststellen und eine abweichende „Festsetzung“ derselben ist nicht nur unpraktisch sondern unmöglich geworden. Werden z. B. zwei gleiche Massen durch gleichen Impuls (etwa Entspannung einer Spiralfeder) von M aus nach A und B getrieben, so haben sie an diesen Stellen gegenüber dem Basiskörper gleiche kinetische Energien, die sich in gleiche andere Energiebeträge (der Wärmemenge, elastischen oder Lageenergie) umsetzen können. Diese umgesetzten Energiebeträge sind meßbar gleich, also sind es auch die kinetischen Energien und die Endgeschwindigkeiten der Massen in A und B. Das Gleiche gilt für beliebige gleichweit von M entfernte Punktepaare. Es ist also nicht nur unpraktisch, sondern unmöglich, diese Endgeschwindigkeiten gegenüber dem Basiskörper als ungleich festzusetzen.

Die behauptete Willkür (das „freie Ermessen“) in der Gleichzeitigkeitsdefinition führt zum Widerspruch mit

dem Kausal- und Energieprinzip und die Auffassung der Gleichzeitigkeit, wie sie Poincaré und Einstein in die Physik einführen, ist damit als Irrtum nachgewiesen.

Auf einem Basiskörper gibt es symmetrische Vorgänge und gilt das Symmetrieprinzip 18).

Die von jener Seite vorgebrachte Begründung der Nichtfeststellbarkeit der Gleichzeitigkeit erweist sich also als unzulänglich. Gewiß kann man mit einem Signal AB Gleichzeitigkeit in A und B nicht ermitteln, ohne die Kenntnis der Geschwindigkeit des Signals vorauszusetzen. Aber ist damit alles darüber gesagt? Gibt es keine anderen Möglichkeiten zu erwägen, eine andere Methode, bei der nach dem Zahlenwert der Signalgeschwindigkeit nicht gefragt ist? Hier steckt der Fehler in den Überlegungen der anderen Seite; es ist der so häufige Denkfehler einer vor-eiligen Verallgemeinerung: weil es mit einem Signal AB nicht geht, darum geht es überhaupt nicht 19).

Es läßt sich also zeigen, daß die Gleichzeitigkeit an verschiedenen Orten eines Basiskörpers sich mit beliebigen Signalen willkürfrei feststellen läßt, da es symmetrische Vorgänge in den Systemen (trotz deren gegenseitiger Bewegung) gibt. Es ist damit dargetan, daß die Zeit wie die Geschwindigkeit ein realer Faktor ist, daß ihr objektive Bedeutung zukommt. Die Synchronstellung der Uhren erfolgt auf Grund des Symmetrieprinzips, allgemeiner der Gesetzmäßigkeit der Naturvorgänge, die gleichzeitigen Ereignisse stehen in einem denkbaren allgemeinen Kausalzusammenhang, sie sind als solche durch das Kausal- und Energieprinzip garantiert. Es zeugt daher von völliger Verkennung der Bedeutung von Gleichzeitigkeit, wenn M. Schlick meint: „bekanntlich sprechen wir bei ‚gleichzeitigen‘, koexistierenden Ereignissen nicht von

Kausalität, der Begriff des Wirkens findet dort keine Anwendung²⁰⁾. Gerade das Gegenteil trifft zu. Alle Geschwindigkeiten sind kausal determiniert und gleiche Geschwindigkeiten auf gleich langen Wegen führen unter gleichen Umständen unweigerlich auf Gleichzeitigkeit. Wer die Möglichkeit einer auf Messungen beruhenden Naturerkenntnis bejaht, muß auch die Feststellbarkeit von Gleichzeitigkeit zugeben.

Diese gleichen Geschwindigkeiten beziehen sich zunächst auf einen Basiskörper. Ist darum die Gleichzeitigkeit auch auf den Basiskörper zu beziehen und vom System abhängig? Kann sie feststellbar und zugleich relativ sein?

Die Relativitätstheorie steht und fällt mit der Lorentztransformation und mit der Gültigkeit der „Welt“ der Raumzeitunion. Es ergibt sich also die für sie entscheidende Frage: ist die Feststellbarkeit der Gleichzeitigkeit, die sich nicht mehr leugnen läßt, damit vereinbar?

Über diese Frage wurden an anderen Stellen eingehende Untersuchungen angestellt, auf die hier verwiesen sei²¹⁾. Wir können uns daher kurz fassen.

Denken wir uns zwei gegen einander wie üblich bewegte Systeme S und S' und in jedem derselben die Gleichzeitigkeit nach der angegebenen Methode ermittelt und Uhren synchron gestellt. Die Lorentztransformation verlangt dann, daß die Angaben der Uhren über die Gleichzeitigkeit oder den Zeitabstand derselben zwei Ereignisse nicht übereinstimmen, zwei in S gleichzeitige Ereignisse sind von S' aus beobachtet nicht gleichzeitig, und wir wollen ex hypothesi annehmen, daß die Beobachtung dies bestätigt. Da dies nun aber Feststellungen sind, so betrifft es die reale feststellbare Metrik und es müßte daher dieses Nichtzusammenstimmen auch in der Metrik der realen Welt, welche ja die der Raumzeitunion sein soll, sich zeigen. Diese müßte also verschiedene gegen einan-

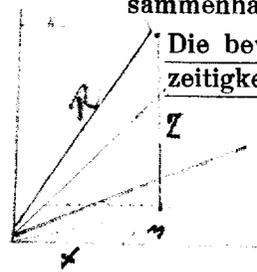
der gedrehte Zeitachsen für S und S', nicht etwa als willkürlich eingeführt, sondern als ihr selbst zugehörig aufweisen. Sie verliert aber dadurch ihre Invarianz und repräsentiert selbst die „in Raum und Zeit zerfallten“ relativen Welten der Systeme, d. h. sie löst sich in Widerspruch auf. Läßt sich, wie bewiesen, der Raumabstand und der Zeitabstand in den Systemen objektiv feststellen, so kann man nicht mehr behaupten, daß „der Zerlegung in Zeit und Raum keine objektive Bedeutung zukomme“ (Einstein)²²⁾. Ist der Zeitpunkt der Ereignisse im Ablauf der Zeit prinzipiell feststellbar und kausal determiniert, so muß er in der wirklichen Ordnung der Welt seinen Platz haben.

Ganz klar geht dies auch aus der Formel für das Quadrat des Raumzeitabstandes s zweier Ereignisse

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = r^2 - (ct)^2$$

hervor. Denn der Raumzeitabstand s, wie er in der „Welt“ der Raumzeitunion allein vorliegt, kann nicht mehr in den räumlichen Abstand s und den zeitlichen Abstand t getrennt werden, weil, gleichgültig ob s² als Differenz oder (mittels der Substitution $l = ict$) als Summe aufgefaßt wird, eine Summe oder eine Differenz die Glieder, aus der sie gebildet ist, unbestimmt läßt. Dagegen ist der zeitliche und der räumliche Abstand der beiden Ereignisse nach den Messungen und Feststellungen in den Systemen sehr wohl jeder für sich bestimmt und determiniert, wenn er auch — ex hypothesi — in S und S' sich als verschiedenen herausstellen würde. Die Größen r und t blieben also von der „Welt“ her unbestimmt und sind doch andererseits kausal bestimmt und in den allgemeinen Naturzusammenhang eingeordnet. Mit anderen Worten:

Die bewiesene prinzipielle Feststellbarkeit der Gleichzeitigkeit nimmt der „Welt“ der Raumzeitunion die ihr



$$x = ct$$

$$y = \frac{ct}{\gamma}$$

$$z = \frac{ct}{\gamma^2}$$

$$R = \frac{ct}{\gamma^2}$$

139

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2 = 2z^2$$

$$= c^2 \left(\frac{t}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{ct}{\gamma^2} \right)^2$$

zugewiesene Bedeutung als metrisches Symbol des realen Seins.

Was bleibt nun von der speziellen Relativitätstheorie noch übrig, wenn die „Welt“ Minkowskis, die ihre Paradoxa auflösen sollte, keine Geltung mehr beanspruchen kann? Diese „Paradoxien“ bleiben nun inhaltlich in voller Schärfe bestehen, werden aber aus scheinbaren zu tatsächlichen Widersprüchen.

Da sich die räumlichen und zeitlichen Abstände prinzipiell feststellen lassen, so muß es nun — wenn die Lorentztransformation gültig bleiben soll — auch als prinzipiell beobachtbar gedacht werden, daß von zwei in Ruhe neben einander gleich langen Maßstäben bei gegenseitiger Bewegung der eine sowohl kürzer wie auch länger wird als der andere, daß von zwei gleichen gegen einander bewegten Uhren, die eine sowohl rascher wie auch langsamer geht als die andere und daß von zwei gleichen „Ruh“-Massen, die sich gegen einander bewegen, die eine schwerer und auch leichter ist als die andere. Alles dies soll sich prinzipiell in geeigneten Experimenten von S und S' aus z. B. an Photogrammen feststellen lassen, denn der Lorentztransformation soll reale Bedeutung zukommen. Würden diese Photogramme dem nicht entsprechen und anders ausfallen, so wäre die Relativitätstheorie experimentell widerlegt. Derartige Experimente, von verschiedenen Bezugskörpern aus die reziproken Effekte festzustellen, wären entscheidend, sind jedoch praktisch nicht ausführbar. Ebenso ist es bis jetzt experimentell nicht bewiesen worden, da die verfügbaren Geschwindigkeiten bei weitem nicht ausreichen, daß das Licht in allen im gleichen Raum gegen einander bewegten Inertialsystemen (z. B. Zug - Bahndamm) die gleiche Geschwindigkeit nach allen Richtungen hat. Alle zur Relativitätstheorie einschlägigen Experimente wurden mit zur Erdoberfläche ruhenden Apparaten durchgeführt.

Kann man sich dabei beruhigen, daß die Relativitätstheorie eine noch nicht hinreichend gesicherte Hypothese ist, oder muß man dagegen Einspruch erheben, daß diese Hypothese mit dem uns gegebenen Wirklichkeitsbegriff unvereinbar ist? Was als objektiv existierend, als naturwahrlich gedacht wird, ist zum Teil erkennbar — dies ist das erste Axiom jeder Naturwissenschaft und ihre Voraussetzung; aber dieses erkennbare Naturwirkliche kann nicht sich widersprechende Merkmale haben. Es ist nicht zu erwarten, daß künftige einwandfreie Beobachtungen von größerer Genauigkeit auf nicht weiter korrigierbare, sich widersprechende Ergebnisse führen und das erste Axiom der Naturwissenschaft aufheben werden. Die relativen Wirklichkeiten — für jedes Bezugssystem eine andere — wie sie aus der Feststellbarkeit der Gleichzeitigkeit zusammen mit dem Festhalten an der Lorentztransformation notwendig folgen würden, sind abzulehnen.

Es gibt andere mögliche Erklärungen der einschlägigen Beobachtungen. Wenn der in sich ruhende Weltäther von Lorentz nicht verifizierbar ist, so liegt es nahe, an den mit den Weltkörpern mitbewegten Äther zu denken. Daß diese Hypothese durchführbar ist, ohne uns den Verzicht auf die Gesetze des Denkens zuzumuten, wurde an anderen Stellen, auf die hier verwiesen sei, genau ausgeführt²³⁾.

ANMERKUNGEN

- 1) Physikal. Rundblicke 1922, S. 54.
- 2) Die Relativitätstheorie Einsteins 1920, S. 166.
- 3) Wandlungen in den Grundlagen der exakten Naturwissensch. 3. Aufl. 1942, S. 44.
- 4) Kultur der Gegenwart, Bd. Physik S. 789.
- 5) Philosophie der Raum - Zeitlehre 1928, S. 150.
- 6) Die neuen Grundlagen der Naturerkenntnis 1934, S. 113.

- 7) Philosophie der Naturwissenschaft 1949, S. 38, 59.
- 8) Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, herausg. von P. A. Schilp. Stuttg. 1951, S. 46.
- 9) Revue de metaphys. et de morale 1898, S. 6. Übersetzt in Wissenschaft und Hypothese 1904, S. 92.
- 10) Vgl. H. THIRRING in Handb. der Physik von Geiger u. Scheel Bd. IV, 1929, S. 157.
- 11) Raum, Zeit und Schwere 1923, S. 184 und Relativitätstheorie in mathematischer Darstellung 1925, Einleitung.
- 12) Physikal. Blätter 1954, Heft 2.
- 13) Acht Vorlesungen über theoret. Physik 1910, S. 117.
- 14) Raum und Zeit, Berlin 1919, S. 51.
- 15) Raum, Zeit und Materie, 1. Aufl. S. 136.
- 16) Von Kopernikus bis Einstein, Ullstein Verl. Berlin 1927, S. 108.
- 17) Über die spez. und allg. Relativitätstheorie, Braunschweig 1956, 17. Aufl. S. 13.
- 18) Ausführlich dargestellt in „Die Ermittlung der Gleichzeitigkeit“, Methodos 1955, S. 309 ff.
- 19.) A. S. EDDINGTON hat wohl an andere Möglichkeiten gedacht, aber, da er sich nicht genügend umgetan hat, ohne Ergebnis. Er sagt: „Wir müssen jedoch dem Einwand begegnen, daß die Anleitungen (zur Ermittlung der Gleichzeitigkeit), wenn sie von vernünftigeren Leuten aufgestellt worden wären, keinen Zirkelschluß enthalten hätten. Unsere Antwort ist, daß die vernünftigeren Leute nun dreißig Jahre Zeit hatten, um sich zu melden; aber niemand ist mit Anleitungen hervorgetreten, die von einem Zirkelschluß frei wären. Wir würden uns jede Mühe geben, sie zu verstehen, • so unvollkommen ihr Sinn ausgedrückt sein mag. Aber es ist nicht bloße Tadelsucht, wenn wir uns weigern, den Fortschritt der Physik dadurch aufzuhalten, daß wir endlos nach einem Sinn dort suchen, wo kein Grund vorliegt anzunehmen, daß ein Sinn vorliegt“ (Philosophie der Naturwissenschaft, Wien 1949). Eddington hätte aber in meiner Abhandlung „Gleichzeitigkeit und Relativitätstheorie“ (Zeitschrift für Physik Bd. 94, 1935, S. 785 ff) finden können, was er suchte, wenn auch noch etwas unvollkommen dargestellt. Ausführlicher und völlig schlüssig habe ich dann die Feststellbarkeit der Gleichzeitigkeit abgeleitet in „Das Dilemma der Relativitätstheorie“, Zeitschr. f. d. ges. Naturwiss. 1944, H. 4/6. Ferner in „Relat. Theorie und Naturerkenntnis“ und „Raum, Zeit u. Wirklichkeit“,

Monatsschrift „Die Pforte“, Esslingen, 35, 63/65 und Methodos Vol. VII, Heft 27, 1955.

20) Gesammelte Aufsätze, Wien 1938, S. 46.

21) Siehe Zeitschrift für Physik Bd. 94 S. 261 u. 785, Bd. 95 S. 227 1935; ferner Zeitschr. f. d. ges. Naturw. 1937 S. 145, 1941 S. 193 und 1944 S. 41, sowie Monatsschrift „Die Pforte“ 1952 Heft 35/36 u. 1955 Heft 63, 64, 65. Auch Philosophia Naturalis Bd. II, S. 501.

22) „Evolution der Physik“, Wien 1951 S. 248.

23) Siehe Lehrbuch der Physik von GRIMSEHL - TOMASCHEK, Bd. III 9. Aufl. 1939, S. 413 ff. Ferner sei auf Astron. Nachr. Bd. 268, 1939 u. Zeitschr. f. d. ges. Naturw. 1941, S. 193 verwiesen, sowie auf K. VOGTHERR „Das Problem der Bewegung“, Verl. A. Hain, Meisenheim 1956, S. 50 f. Die Fixsternaberration findet eine befriedigende Erklärung, die Behauptung, daß sie bei mitbewegtem Äther nicht auftreten könne, beruht auf falschen Voraussetzungen.

Eingelangt 21. Mai 1958.

München 27, Buschingstr. 22/II.