

## Über die physikalischen Konsequenzen der relativistischen Axiomatik.

Von **Hans Reichenbach** in Stuttgart.

Mit einer Abbildung. (Eingegangen am 28. Juli 1925.)

I. Welches sind die eigentlich physikalischen Aussagen der Relativitätstheorie, losgelöst aus dem theoretischen Gesamtbild? — II. Beantwortung einiger Einwände. — III. Die experimentell noch nicht geprüften Annahmen der Einsteinschen Raum-Zeit-Lehre. — IV. Lorentz-Verkürzung und Einstein-Verkürzung, und ihre Verwechslung.

I. Nachdem der Aufbau der Relativitätstheorie von mir in einer längeren Darstellung<sup>1)</sup> axiomatisch durchgeführt wurde, möchte ich an dieser Stelle diejenigen Konsequenzen dieser Untersuchung entwickeln, die gerade für die Physik wichtig sind. Wenn auch der Zweck der Arbeit ursprünglich ein erkenntnistheoretischer ist und ihre eigentliche Bedeutung nur auf diesem Gebiet gefunden werden kann, so ergeben sich dabei doch einige für die experimentelle Grundlegung der Relativitätstheorie wichtige Folgerungen.

Man kann eine physikalische Axiomatik in zweierlei Richtung durchführen. Treibt man *deduktive Axiomatik*, so stellt man einen möglichst allgemeinen Satz, etwa ein Variationsprinzip, an die Spitze und leitet dann daraus alle Einzelheiten ab; erst diese gefolgerten Einzelheiten sind dann dem Experiment zugänglich, und wenn sie sich bestätigen, darf das abstrakte Axiom mit mehr oder weniger großer Wahrscheinlichkeit als wahr bezeichnet werden. Anders geht die *konstruktive Axiomatik* vor. Sie stellt als Axiome nur solche Sätze auf, die selbst direkt dem Experiment zugänglich sind; aus ihnen leitet sie die gesamte Theorie ab, indem sie noch gewisse begriffliche Elemente, die Definitionen, hinzufügt. Die Definitionen sind willkürlich und können deshalb nichts Falsches in die Theorie hineinbringen. Diese Form der Axiomatik hat für die Physik den großen Vorzug, daß sie die *Tragweite jedes experimentellen Resultats* unmittelbar erkennen läßt. Nicht jeder Satz der Theorie setzt *alle* Axiome voraus, und man kann deshalb, sowie ein solcher Aufbau durchgeführt vorliegt, sofort erkennen, ob ein Satz durch gut bestätigte Axiome fundiert ist, oder ob er noch unsichere Axiome voraussetzt.

---

<sup>1)</sup> Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre, Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., 1924. Im folgenden stets als A. bezeichnet.

Es ist gelegentlich Anstoß daran genommen worden, daß ich einen durch Erfahrung zu bestätigenden Satz Axiom nenne. Aber diese Bezeichnung ist berechtigt, weil es mit den sonst in der Physik Axiom genannten Sätzen nicht anders steht. Ein Satz heißt Axiom einer physikalischen Theorie, wenn er für diese Theorie als logischer Obersatz dient; aber damit ist er zugleich der Erfahrungskritik unterstellt. *Axiom heißt in der Physik „oberster Erfahrungssatz“*. Für die logische Stellung der Definitionen muß ich auf § 2 in A. verweisen, wo der eigenartige Charakter der physikalischen Definitionen als *Zuordnungsdefinitionen* dargestellt ist.

Da meine Axiomatik konstruktiv in diesem Sinne ist, bietet sie dem Physiker den weittragenden Vorteil, daß er aus ihr die experimentelle Sicherstellung der einzelnen Sätze der Relativitätstheorie unmittelbar erkennen kann. Die Notwendigkeit eines solchen strengen Aufbaus ist leider noch wenig anerkannt. Auf seiten der Physiker scheint ein eigentümliches Vertrauen üblich geworden zu sein: nachdem gewisse theoretische Überlegungen für den Urheber der Theorie der Ausgangspunkt gewisser beobachtbarer Effekte waren, glaubt man, daß mit diesen Effekten nunmehr auch die ursprünglichen Überlegungen selbst bestätigt worden sind. Aber der vorurteilslose Kritiker darf sich mit einem solchen sozusagen historischen Beweis nicht begnügen, er fragt nach den logischen Zusammenhängen, die zwischen den beobachtbaren Daten und den theoretischen Grundlagen bestehen. Aus diesem Grunde hat eine solche Darstellung nicht nur für die Philosophie, sondern gerade auch für die Physik eine unmittelbare Bedeutung. Denn wenn es sich um die Einführung so grundlegender Veränderungen in das physikalische Weltbild handelt, kann der Physiker in seinen Schlüssen gar nicht vorsichtig genug sein. Er wird dabei zugleich den Erfolg haben, eine streng richtige und darum erst wirklich begreifliche Darstellung der Theorie zu finden, die sein Gewissen von den mancherlei Sprüngen befreit, mit denen es sonst über logische Untiefen in der Begründung der Theorie hinwegsetzt.

Der Aufbau der Axiomatik vollzieht sich in folgender Weise. Wir denken uns den Raum erfüllt mit Massenpunkten, die ähnlich wie die Moleküle eines Gases durcheinanderschwirren; auf jedem Massenpunkt sitzt ein Beobachter. Die Beobachter können sich durch Lichtsignale verständigen. Es entsteht für sie die Aufgabe, ein System von solchen Massenpunkten auszuwählen, die man auf Grund gewisser Auszeichnungen als „zueinander ruhend“ bezeichnen darf, und in diesem „starrten“ System eine raumzeitliche Metrik zu definieren. Diejenigen Tatsachen der Lichtbewegung, die dabei vorausgesetzt werden, heißen *Lichtaxiome*; diese Axiome, die sich übrigens alle ohne Benutzung des Gleichzeitigkeitsbegriffs formulieren lassen, enthalten noch keinerlei Aus-

sagen über materielle Gebilde wie Maßstäbe und Uhren. Bei der Lösung der Aufgabe zeigt sich, daß eine *Lichtgeometrie* vollständig durchführbar ist, indem zu den Lichtaxiomen die Definitionen der Gleichzeitigkeit, der Gleichheit aufeinander folgender Zeitstrecken, der gegenseitigen Ruhe von Punkten, der Gleichheit von Raumstrecken usw. hinzutreten. Diese Lichtgeometrie ist *innerhalb* eines jeden Punktsystems *eindeutig*, aber sie legt die Schar  $J$  der Inertialsysteme noch nicht eindeutig fest, sondern die etwas allgemeinere Schar  $S$  derjenigen Systeme, die durch eine vierdimensionale Ähnlichkeitstransformation miteinander verbunden sind.  $S$  enthält  $J$  als Untergruppe. Will man diese Untergruppe definieren, so nimmt man noch die starren Körper oder die natürlichen Uhren hinzu; nur die Systeme  $J$  haben die Eigenschaft, daß ihre Raumpunkte durch starre Stäbe verbunden werden können, oder daß die aus zwei Punkten gebildete Lichtuhr dasselbe Zeitmaß liefert wie die natürliche Uhr.

In diesem Zusammenhang befindet sich in A. ein Fehler, der zwar für den Aufbau als Ganzes nicht wesentlich ist, den ich aber bei dieser Gelegenheit richtigstellen möchte. Zwar wird dort die Unterscheidung der Klassen  $S$  und  $J$  richtig durchgeführt; aber es wird dort infolge eines mathematischen Fehlers mehr aus der Lichtgeometrie herausgeholt, als sie tatsächlich leistet. Nennen wir die Klasse der nicht zu  $J$  gehörigen Systeme  $S$  etwa  $T$ , also symbolisch geschrieben  $J + T = S$ . In A. wird nun die Auffassung vertreten: ein System  $J$  und ein System  $T$  können nicht *dauernd* einen Raumpunkt gemeinsam haben. Aber dieser Satz ist falsch.

Er führt sofort zu folgender These: Wählt man einen beliebigen Punkt  $A$  als Ausgangspunkt, und konstruiert man um ihn nach den Regeln der Lichtgeometrie ein System  $S$ , so ist dieses System *eindeutig* festgelegt; man kann nur entweder ein System  $J$  oder ein System  $T$  erhalten, je nach dem Bewegungszustand von  $A$ . In dieser Form wird der Satz bei mir bewiesen, aber dieser Beweis enthält einen Fehler, für dessen Aufdeckung ich Herrn Hans v. Neumann, Zürich, zu großem Dank verpflichtet bin. Gleichung (21) auf S. 45, in A. ist falsch, weil in ihr der Koeffizient des Gliedes zweiter Ordnung ausgewertet wird, während (19) nur in der ersten Ordnung gilt. Der Beweis wird dadurch falsch. Ebenso enthält der zweite Beweis des Theorems, den Herr K. Fladt gegeben hat, einen Fehler (A., S. 47): die auf (31) folgende Form ist falsch, hier brauchen Zähler und Nenner des rechtsstehenden Bruches einzeln nicht von  $\eta_1$  unabhängig zu sein. Wegen dieser Fehler ist die allgemeine Lösung des Theorems der Fig. 7 in A nicht die lineare Funktion  $A\tau + B$ , sondern die gebrochen rationale Funktion  $\frac{A\tau + B}{C\tau + D}$ ; ein Beweis dafür wurde von Herrn v. Neumann unter Verbesserung des Fehlers durch entsprechende Fortführung des Fladtschen Beweises entwickelt. Infolgedessen muß an dieser Stelle bereits der Standpunkt des § 16 meiner dortigen Darstellung einsetzen, in welchem die Systeme  $T$  berücksichtigt werden. Es gilt also, im Widerspruch zu der in A. auf S. 62 unten stehenden Behauptung, daß auch bei Festhaltung des Ausgangspunktes sich mehr als ein System um ihn konstruieren läßt, in dem die Lichtaxiome gelten.

Wegen der eingehenden Definitionen ist die entstehende Lichtgeometrie *willkürlich*. Je nachdem man die Definitionen wählt, läßt sich die relativistische oder die klassische Lichtgeometrie erhalten. Die Lichtaxiome können für beide dieselben sein. Die relativistische Lichtgeometrie unterscheidet sich also nur definatorisch von der klassischen, und neben der Lorentztransformation läßt sich auch die Galileitransformation definieren. Als neu behauptet die Relativitätstheorie unter den Lichtaxiomen nur die Grenzstellung der Lichtgeschwindigkeit; aber auch wenn dieses Axiom gilt, läßt sich noch die Galileitransformation definieren. (Für Geschwindigkeiten  $> c$  ist sie dann allerdings nicht mehr durch „reale Systeme“ realisierbar.)

Auf die Lichtaxiome folgt eine zweite Axiomklasse, die *Körperaxiome*, welche sich auf Uhren und Maßstäbe beziehen. Zunächst müssen die Begriffe „starrer Körper“ und „natürliche Uhr“ definiert werden, und zwar ohne Zuhilfenahme der durch sie entstehenden Geometrie. Es ist gelegentlich eingewandt worden, daß der starre Körper nur durch die euklidische Geometrie definiert sei: dies ist jedoch nicht zutreffend. Er läßt sich auch ohne sie, mit Zuhilfenahme der Unterscheidung metrischer und physikalischer Kräfte, definieren; ich muß hierfür auf § 18 in A verweisen.

Der Inhalt der Körperaxiome läßt sich nun folgendermaßen zusammenfassen: *die materiellen Gebilde stellen sich auf die relativistische Lichtgeometrie ein*. Messe ich mit starren Stäben Strecken aus, die lichtgeometrisch gleich sind, so ergibt sich, daß sie ebenfalls als gleich groß befunden werden. Vergleiche ich den Zeitablauf, der lichtgeometrisch als gleichförmig definiert ist, mit einer natürlichen Uhr, so ergibt sich Übereinstimmung. Weiter gehören hierher Aussagen über den Transport von Uhren und Stäben in bewegte Systeme; auch hier ergibt sich Übereinstimmung, wenn man sie mit Einheiten vergleicht, die lichtgeometrisch auf ein bewegtes System übertragen worden sind. Natürlich müssen hierbei die Definitionen der relativistischen Lichtgeometrie benutzt werden, nicht die der klassischen. Man kann die Behauptung Einsteins geradezu dahin aussprechen, daß sich die materiellen Gebilde nicht auf die klassische, sondern auf die relativistische Lichtgeometrie einstellen.

Hier sind wir an dem Punkt, wo wir das physikalisch Neue der Relativitätstheorie vor uns haben. Während die Lichtaxiome alle in der klassischen Optik bereits gelten und die Relativitätstheorie hier nur die Behauptung hinzufügt, daß die Lichtgeschwindigkeit die obere Grenze

aller Signalgeschwindigkeiten ist, bedeuten die Körperaxiome eine Abweichung von der klassischen Theorie. Sie enthalten die Behauptung, daß die Lorentz-Transformation, die sich lichtgeometrisch nur *definitiv* von der Galileitransformation unterscheidet, zugleich die Transformation der Maßstäbe und Uhren ist. Diese Behauptung enthält deshalb den experimentell nachzuprüfenden Teil der relativistischen Raum-Zeit-Lehre. Und nur diese Behauptung kann überhaupt physikalisch diskutiert werden. Es hat keinen Sinn, daß immer wieder die philosophischen Prinzipien der Relativitätstheorie umstritten werden, denn diese sind jetzt über allen Zweifel sichergestellt. Es hat auch keinen Sinn, in dem System der relativistischen Behauptungen Widersprüche zu suchen; denn daß das System der Axiome und Definitionen *logisch möglich* ist, geht aus dem axiomatischen Aufbau deutlich hervor. Jedes einzelne Axiom bedeutet einen anschaulich vorstellbaren Tatbestand, in dem weiter gar nichts Geheimnisvolles oder Unvorstellbares steckt. Aber ob die Axiome *wahr* sind, genau in dem Sinne wahr, wie jeder andere physikalische Satz, also ob sie mit der Erfahrung übereinstimmen, das steht noch zur Untersuchung. Während eine Anzahl der Axiome bereits bestätigt ist, steht für andere die Bestätigung noch aus. Wir werden auf diese unbestätigten Axiome in III. näher eingehen.

Mit Hilfe der Axiomatik gelingt es also, die Behauptungen der Relativitätstheorie streng zu formulieren; ohne die Einkleidung in die komplexen Prinzipien „Relativitätsprinzip“ und „Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ werden einfach die Tatsachen hingestellt, die hier behauptet werden. Während die Begründung der Theorie auf diese beiden Prinzipien durch Einstein natürlich überaus fruchtbar war, solange es sich noch um den physikalischen Ausbau der Theorie handelte — denn damals handelte es sich darum, den Grundgedanken so allgemein zu fassen, daß man aus ihm gleichsam die verborgenen Absichten der Natur erraten konnte —, kommt es jetzt, für die logische Durchforschung der Theorie, darauf an, möglichst enge und möglichst aufgespaltene Einzelbehauptungen an die Spitze zu stellen. Zugleich gelingt es damit, den Anteil, den die Erfahrung an der Theorie hat, zu trennen von den Begriffsbildungen, die zu ihrem Ausbau hinzugefügt werden müssen. Durch unsere Trennung von Axiom und Definition können wir diejenigen Aussagen über die Lichtbewegung, welche ihren physikalischen Charakter beschreiben, unterscheiden von willkürlichen Zutaten, wie dem Gleichzeitigkeitsbegriff; und wir sind in der Lage, das Verhalten der materiellen Gebilde ohne alle mehrdeutigen Hilfsbegriffe wie „Verkürzung“

oder „Verlängerung“ eindeutig zu beschreiben. Wir können also auf Grund unserer axiomatischen Darstellung endlich das herauschälen, *was von der relativistischen Raum-Zeit-Lehre über die Wirklichkeit behauptet wird*. In der Aufdeckung dieser Behauptungen aus dem mathematisch glänzenden, aber erkenntnistheoretisch undurchsichtigen Gebilde der weltgeometrisch formulierten Relativitätstheorie sehe ich die eigentliche Leistung dieser Axiomatik.

II. Die geschilderte Absicht meiner Untersuchung ist leider von mancher Seite verkannt worden. So hat Herr Weyl die Auffassung vertreten, daß der Zweck einer solchen Untersuchung wesentlich ein mathematischer sei; er schreibt: „Zur Hauptsache enthält die Schrift aber nicht eine philosophische, sondern eine rein mathematische Untersuchung, und sie muß sich daher auch eine Beurteilung nach mathematischen Gesichtspunkten gefallen lassen. In dieser Hinsicht aber ist sie wenig befriedigend, zu umständlich und zu undurchsichtig. Das eigentliche Wertvolle: die Aufstellung der Axiome a, b, c (der Lichtaxiome) und der Übergang von ihnen zur Raum-Zeit-Messung, zum Koordinatenraum und damit zur Möbiusschen Geometrie, ließe sich bequem auf ein paar Seiten durchführen, wobei die Klarheit und Verständlichkeit nur gewinnen würde“<sup>1)</sup>. Ich muß meine Axiomatik gegen eine solche Kritik auf das entschiedenste verteidigen. Von mathematischer Seite ist über meine Untersuchungen kein anderes Urteil erlaubt als das Urteil „richtig“ oder „falsch“. Um mathematische Eleganz ist es mir hier nicht zu tun — die hat in der Relativitätstheorie genug Gelegenheit gehabt, sich auszuleben, und hat jedenfalls für die erkenntnistheoretische Klärung nur beschränkte Bedeutung gehabt. In den ersten Seiten seines Referates gibt Herr Weyl eine Darstellung meiner Axiomatik, die vermutlich ein Beispiel dafür sein soll, wie ich es „bequem auf ein paar Seiten“ hätte besser machen können; ich überlasse es sehr gern dem Urteil der Leser, welche von beiden Darstellungen sie weniger „umständlich und undurchsichtig“ finden. Ich für mein Teil habe noch immer die Klarheit eines stufenweisen Aufbaus, der mit möglichst einfachen logischen Operationen auskommt, einem schillernden mathematischen Nebel vorgezogen, mit dem mancher seine Gedanken zu umgeben vorzieht. Der Plan meiner Untersuchung ist durch die Absicht diktiert, die Resultate der physikalischen Erfahrung möglichst deutlich aufzudecken und aus jedem neuen Erfahrungssatz so viel an ableitbaren Folgerungen heraus-

1) Deutsche Literaturzeitung 1924, Nov., 2122.

zuholen, als irgend angeht. Wenn man mit einem Minimum von Begriffen arbeitet, wird dabei mancher Schritt umständlicher werden, als wenn man von vornherein mit der Gesamtheit aller verfügbaren Hilfsmittel beginnt. Ich halte es aber für sehr bedauerlich, wenn ein Mathematiker von Herrn Weyls Rang den Zweck einer solchen erkenntnistheoretisch-logischen Untersuchung derart verkennt und mit seiner Autorität den Versuch zu unterdrücken sucht, der mathematisch und physikalisch so fruchtbar ausgebauten Relativitätstheorie jetzt endlich auch den logischen Unterbau zu geben, der letzten Endes allein die Gewähr ihrer Gültigkeit tragen kann.

Was von mathematischer Seite in axiomatischer Richtung zu tun war, ist in vollendeter Weise durch Herrn Carathéodory<sup>1)</sup> ausgeführt worden, dessen Darstellung ohne Kenntnis meiner (in einer Übersicht schon 1921 veröffentlichten) Untersuchung geschrieben wurde. In der Tatsache, daß hier in rein mathematischer Absicht im wesentlichen derselbe Weg eingeschlagen wurde, den ich benutze, sehe ich eine wertvolle Stütze für die logische Berechtigung des von mir aus erkenntnistheoretischen Gründen gegebenen Aufbaus.

In diesem Zusammenhang muß ich noch kurz auf die Kritik eingehen, die Herr A. Müller über mein Buch geschrieben hat<sup>2)</sup>. Er nennt meine Lehre von den Definitionen „wenig durchdacht“ und will aus meinem Buch die Meinung herauslesen, daß ich der Relativitätstheorie jeden Wahrheitscharakter abspreche. Ich muß gegen ein so weittragendes Mißverständnis, für das meine Darstellung jede Schuld ablehnen muß, Verwahrung einlegen. Wenn auch die einzelne Zuordnungsdefinition weder wahr noch falsch ist, so macht doch die Relativitätstheorie als die Lehre von der Willkür dieser Definitionen einen entschiedenen Anspruch auf Wahrheit. Diesen einfachen logischen Unterschied kann jeder in meiner Darstellung deutlich erkennen. Auf weitere Einwände Herrn Müllers gehe ich an anderer Stelle ein.

III. Ich gehe jetzt auf diejenigen Axiome näher ein, die noch experimentell ungesichert sind.

Die Lichtaxiome (I bis V in A.) dürfen als gut bestätigt angesehen werden. Unter ihnen erscheint als neue Tatsache nur die Grenzstellung der Lichtgeschwindigkeit, welche wohl keinem ernstern Zweifel mehr unterliegt.

---

<sup>1)</sup> Zur Axiomatik der speziellen Relativitätstheorie. Sitzungsber. d. Berl. Akad. 1924.

<sup>2)</sup> Phys. ZS. 25, 463, 1924.

Unter den Körperaxiomen enthalten VI und VII nur alte Aussagen über starre Körper und Uhren, die schon in der klassischen Theorie gelten. Axiom VIII formuliert den Michelsonversuch; dieses Axiom konnte deshalb bisher als gut bestätigt angesehen werden. Auch hat der Versuch kürzlich durch die von Lenard angeregten Versuche Tomascheks die lange gewünschte Bestätigung bei Verwendung von Sternenlicht erfahren<sup>1)</sup>. Neuerdings sind dagegen Zweifel erhoben worden durch Dayton C. Miller<sup>2)</sup>, der auf dem Mount Wilson einen positiven Effekt erhält; es wird noch aufzuklären sein, woher dieser Effekt rührt, bzw. was man aus ihm schließen kann. In diesem Zusammenhang erweist sich die Axiomatik als äußerst nützlich, weil sie erkennen läßt, welche Rolle der Michelsonversuch in der Theorie überhaupt spielt, was aus ihm gefolgert wird und was von ihm unabhängig ist. Wegen der Wichtigkeit dieses Versuchs werden wir ihn in IV besonders betrachten.

Wir kommen nun zu denjenigen Körperaxiomen, die experimentell noch niemals geprüft wurden. Es sind die folgenden:

*Axiom X. Die Zeiteinheit der natürlichen Uhren ist stets derart, daß die mit ihnen in A gemessene Zeit  $\overline{ABA}$  eines Lichtsignals in allen Inertialsystemen gleich ist, wenn AB in starren Stäben gemessen gleich ist.*

*Axiom IX. Die durch starre Stäbe von einem Inertialsystem K in ein anderes K' transportierte Einheit hat folgende Eigenschaft: die Länge der in K ruhenden Einheit, gemessen in K', ist gleich der Länge der in K' ruhenden Einheit, gemessen in K. Und zwar gilt dies, wenn sowohl in K als auch in K' die Gleichzeitigkeit nach der Einsteinschen Definition eingestellt ist.*

*Axiom D. Eine gleichförmig mit der Geschwindigkeit v gegen ein gewisses System K, in dem die Einsteinsche Gleichzeitigkeit durchgeführt ist, bewegte Uhr erfährt eine Verzögerung im Betrage  $\beta = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .*

Diese drei Axiome sind nicht unabhängig von einander. Es würde genügen, zwei von ihnen zu bestätigen, dann wird das dritte zu einer Folgerung, sowie man das System der bestätigten Axiome hinzunimmt. Wir wollen diese drei Axiome einzeln besprechen.

Axiom X ist ein wichtiger Teil des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Dieses Prinzip beruht auf mehreren Axiomen und einer Definition, der Gleichzeitigkeitsdefinition. Es kann in drei Bedeutungen aufgefaßt werden. Nimmt man nur die Lichtaxiome an, so

<sup>1)</sup> Ann. d. Phys. **73**, 105, 1924.

<sup>2)</sup> Proc. Nat. Acad. **11**, 306, 1925, Nr. 6.



besagt das Prinzip, daß man die Lichtgeometrie so einrichten kann, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant wird. Nimmt man noch den Michelsonversuch hinzu (und Axiom VI und VII), so erhält man die weitergehende Aussage, daß die Lichtgeschwindigkeit auch dann noch eine Konstante ist, wenn man die Raumstrecken mit starren Stäben mißt. Die dritte und weiteste Bedeutung erhält man aber erst mit Axiom X, welches besagt, daß diese Konstante für alle Inertialsysteme *denselben Zahlwert* hat, wenn man überall natürliche Uhren und Maßstäbe von gleicher Ruheinheit zur Messung benutzt.

Jedoch sind Versuche zur Bestätigung dieses Axioms bisher nicht gemacht worden. Der Michelsonversuch beweist hierfür nichts. Dies ergibt sich daraus, daß sich das System der Axiome I bis VIII, welches den Michelsonversuch enthält, auch mit dem Gegenteil von X zu einem widerspruchsfreien System verbinden läßt (§ 23 in A.).

Axiom X erhält eine anschauliche Bedeutung, wenn man als Uhr das Licht emittierende Atom betrachtet. Dann besagt es nämlich, daß der Zusammenhang zwischen Lichtfrequenz, Lichtgeschwindigkeit und Meterstab für alle Inertialsysteme derselbe ist. Nun befindet sich die Erde auf den verschiedenen Punkten ihrer Ellipsenbahn in verschiedenen Inertialsystemen; deshalb besagt dieses Axiom, daß die Wellenlänge einer bestimmten Spektrallinie zu allen Jahreszeiten dieselbe ist.

Um dies zu verstehen, bedarf es noch einer Einschaltung. Wellenlänge ist ein Begriff, der die Definition der Gleichzeitigkeit voraussetzt, denn Wellenlänge heißt der Abstand gleicher Phasen zur gleichen Zeit; sie hängt darum auch von der Geschwindigkeit in *einem* Richtungssinn ab. Deshalb bedarf es hier noch des Zusatzes, daß bei der Messung der Wellenlänge in den verschiedenen Inertialsystemen stets die Einsteinsche Definition der Gleichzeitigkeit benutzt wird. Aber wir brauchen diesen Zusatz praktisch nicht besonders zu beachten, denn er ist von selbst erfüllt, sowie man die Messung an *stehenden* Wellen ausführt. Die Länge der stehenden Welle ist von der Gleichzeitigkeitsdefinition unabhängig. Es möge ein Lichtstrahl von  $A$  nach  $B$  und, von dort reflektiert, zurück nach  $A$  gehen. Beziffere ich die Zeit seines Eintreffens in  $B$  nach Einstein als Mittelwert der in  $A$  gemessenen Gesamtzeit  $\overline{ABA}$ , so ist die Wellenlänge in beiden Richtungen gleich groß und gleich der der stehenden Welle. Beziffere ich die Zeit in  $B$  anders, indem ich ihr einen anderen Wert aus dem Intervall  $\overline{ABA}$  beilege, so wird die Wellenlänge für beide Richtungen verschieden, aber zugleich auch die Geschwindigkeit; und die durch Interferenz entstehende stehende Welle bekommt, wie man leicht sieht, wieder die Wellenlänge wie bei der ersten Definition. Die Länge der stehenden Welle hängt also von der Gleichzeitigkeitsdefinition nicht ab; ihre Knotenpunkte stellen ja auch etwas objektiv Erkennbares dar, und ihr Abstand kann ohne Gleichzeitigkeitsdefinition gemessen werden.

Demnach ließe sich Axiom X dadurch bestätigen, daß die Wellenlänge einer bestimmten Spektrallinie zu den verschiedenen Jahreszeiten

sehr genau gemessen wird. Leider reicht die bisherige Genauigkeit nicht aus. Es wäre für die Prüfung eine Genauigkeit von mindestens  $10^{-8}$  in der Wellenlänge erforderlich, während bisher nur rund  $2 \cdot 10^{-7}$  erreicht wurde (Michelson).

Wir kommen jetzt zu Axiom IX. Dieses Axiom bedeutet eine bestimmte Auszeichnung der Einsteinschen Gleichzeitigkeit; es besagt die Symmetrie zweier Systeme mit Einsteinscher Gleichzeitigkeit in bezug auf die Längenmessung und kann die Forderung der „Relativität der Längenmessung“ genannt werden. Es ist mit der Annahme äquivalent, daß sich in der Lorentztransformation die Koordinaten senkrecht zur Bewegungsrichtung identisch transformieren; es läßt sich aus dieser Annahme ableiten, wenn man die bestätigten Axiome I bis VIII hinzunimmt. (Umgekehrt läßt sich aus Axiom IX auch diese Annahme ableiten.) Wegen dieses Zusammenhangs ist das Axiom natürlich sehr plausibel. Aber es scheint vorerst keinen Weg zu geben, das Axiom direkt zu prüfen.

Sehr viel günstiger steht es dagegen mit Axiom D. Auch dieses Axiom zeichnet die Einsteinsche Gleichzeitigkeit aus, weil die Geschwindigkeit  $v$  des Verzögerungsfaktors erst definiert ist, wenn in  $K$  eine Gleichzeitigkeit definiert ist. Weiterhin scheint es ein System  $K$  auszuzeichnen; dies ist jedoch nur scheinbar, weil es sich zeigen läßt, daß derselbe Verzögerungsfaktor in bezug auf *jedes* Inertialsystem gilt, wenn er nur für *eines* gilt. (Dies ist eine Folgerung der Axiome I bis VIII und D; vgl. A., S. 87.) Infolgedessen ist Axiom D einem Axiom E äquivalent, welches die „Relativität der Zeitmessung“ analog zu Axiom IX formuliert. Wir wählen trotzdem die weniger elegante Form des Axioms D, weil dieses Axiom einem unmittelbar zu kontrollierenden Tatbestand entspricht: es formuliert nämlich den *transversalen Dopplereffekt*.

Der Betrag des Dopplereffekts berechnet sich nach Einstein etwas anders als in der klassischen Kinematik, weil sich dem klassischen Dopplereffekt bei Einstein noch die Uhrenverzögerung der Lorentztransformation überlagert. Aber dieser Unterschied ist nicht meßbar, weil er immer auf den Betrag der Geschwindigkeit der Quelle abgeschoben werden kann und dieser nicht so genau direkt zu messen ist. Dagegen entsteht ein gerade noch meßbarer Unterschied, wenn sich die Quelle quer bewegt, d. h. senkrecht zur Verbindungslinie Quelle-Beobachter. Nach Einstein entsteht auch dann ein (zwar sehr kleiner) Dopplereffekt im Sinne einer Verlangsamung der Frequenz, während er nach der klassischen Kinematik in diesem Falle gleich Null ist. Dieser *transversale Dopplereffekt* ist identisch mit der Uhrenverzögerung der Lorentztransformation, wie wir sie in Axiom D formuliert haben.

Der Effekt fällt gerade noch in den Bereich des Meßbaren, wenn man Kanalstrahlteilchen als Licht aussendende Uhren benutzt. Man braucht dann nicht so sehr ihre Geschwindigkeit als ihre *Richtung* genau zu messen. Die Nullstelle  $N$  des Dopplereffekts (d. h. gleiche Frequenz für ruhendes und bewegtes Gasteilchen) liegt dann nicht im Winkel von  $90^\circ$  zur Bewegungsrichtung (vgl. die Fig. 1, in der  $O$  die Stelle des Licht aussendenden Teilchens bezeichnet), sondern im Sinne der Bewegungsrichtung um den Winkel  $\delta$  verschoben, an der Stelle nämlich, wo sich die Einsteinsche Uhrenverzögerung mit einem schwachen die Frequenz erhöhenden Dopplereffekt kompensiert. Diese Verschiebung berechnet sich zu  $\delta = \frac{1}{2} \frac{v}{c}$ , wenn  $v$  die Geschwindigkeit der Kanalstrahlen und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet<sup>1)</sup>. Hiernach wird  $\delta = 11\frac{1}{2}$  Bogenminuten, wenn man die Geschwindigkeit der Kanalstrahlen zu  $v = 2 \cdot 10^8$  cm/sec annimmt.

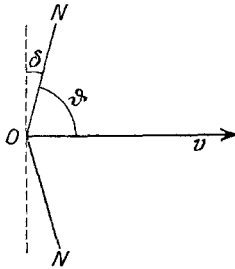


Fig. 1.  
Zum transversalen  
Dopplereffekt.

Man wird die Verschiebung am sichersten messen können, wenn man die Nullstellen auf beiden Seiten der Bewegungsrichtung beobachtet und die Abweichung  $2\delta$  des Winkels  $2\vartheta$  von  $180^\circ$  mißt. Auch eine nur *qualitative* Bestätigung der Abweichung von  $180^\circ$  wäre schon ein Gewinn, denn wenn dann auch Axiom D noch nicht bestätigt wäre, so wäre doch bereits die *absolute Transportzeit* widerlegt, welche die Uhrenverzögerung überhaupt bestreitet.

Bisher sind jedoch keine derartigen Versuche ausgeführt; sie wären im Interesse der Relativitätstheorie sehr erwünscht.

Zusammenfassend können wir sagen: Von den drei unbestätigten Axiomen X, IX, D hat D die meiste Aussicht auf baldige experimentelle

1) Elementare Ableitung: Der Uhrenverzögerungsfaktor ist  $= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , näherungsweise  $= 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$ ; die Einheitsdifferenz zwischen bewegter und ruhender Uhr ist also  $= \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$ . Sie wird kompensiert durch einen Dopplereffekt, der durch die Komponente  $v \cdot \sin \delta$  der Geschwindigkeit hervorgerufen wird, also  $\frac{v \cdot \sin \delta}{c}$  beträgt. Aus der Gleichsetzung beider Ausdrücke und Ersatz von  $\sin \delta$  durch  $\delta$  folgt der obige Wert. — Die strenge Theorie ergibt für kleines  $\frac{v}{c}$  das gleiche.

Nachprüfung, IX die wenigste. Mit der Bestätigung von D wäre zwar noch nicht die Lorentztransformation, aber eine nur wenig allgemeinere Transformation sichergestellt (die Transformation 75 in A., S. 87). Nach der Bestätigung von D würde ein gewisser allgemeiner Gesichtspunkt für IX sprechen. Denn wie schon ausgeführt wurde, läßt es sich zeigen, daß die Relativität der Zeitstrecken von dieser allgemeineren Transformation bereits erfüllt wäre; und man darf wohl vermuten, daß sie dann auch für Raumstrecken gilt. Bis auf die Sicherheit dieser Vermutung wäre dann die ganze Lorentztransformation sichergestellt, denn mit D und IX wird X und damit die ganze Lorentztransformation zur Folgerung, wenn man die bestätigten Axiome I bis VIII hinzunimmt.

Man möge nun keineswegs den Sinn dieser Darlegungen darin suchen, daß ich die Bestätigung dieser Axiome für unwahrscheinlich halte. Im Gegenteil scheinen sie mir bei dem gegenwärtigen Stande viel wahrscheinlicher als die Axiome der absoluten Transportzeit<sup>1)</sup>; denn sie fügen sich dem System der schon bestätigten Axiome viel besser ein als die Axiome der absoluten Zeit, welche vor allem mit Axiom VIII, dem Resultat des Michelsonversuchs, physikalisch nicht recht zusammenpassen. Aber es scheint mir doch wichtig, das Augenmerk der experimentellen Physiker auf diese Lücken in der Relativitätstheorie zu richten, in der Hoffnung, daß Versuche zu ihrer Ausfüllung nicht mehr zu lange auf sich warten lassen.

IV. Zum Schluß soll noch auf einen eigentümlichen Irrtum eingegangen werden, der sich in die Auffassung der Relativitätstheorie eingeschlichen hat. Er betrifft das Problem der Lorentzkontraktion und führt uns damit zugleich zum Michelsonversuch.

Man hört oft die Meinung ausgesprochen, in der Lorentzschen Erklärung des Michelsonversuchs sei die Kontraktion des einen Apparatarms eine „ad hoc ersonnene Hypothese“, während sie bei Einstein auf die natürlichste Weise erklärt sei, nämlich als Folge der Relativierung des Gleichzeitigkeitsbegriffs. Aber dies ist falsch. Die Relativität der Gleichzeitigkeit hat mit der Stabkontraktion des Michelsonversuchs nichts zu tun, und die Einsteinsche Theorie gibt hierfür ebensowenig eine Erklärung wie die Lorentzsche.

Daß die genannte Meinung falsch ist, erhellt schon daraus, daß die Kontraktion des einen Apparatarms gerade für das mitbewegte System

<sup>1)</sup> Über eine Möglichkeit, diese Zeit durch astronomische Messungen der Lichtgeschwindigkeit zu widerlegen, vgl. Reichenbach, Planetenuhr und Einsteinsche Gleichzeitigkeit, ZS. f. Phys. **33**, 628, 1925.

eintritt, in dem der Apparat ruht. Die „Einsteinsche Kontraktion“ würde nur erklären, daß der Arm verkürzt wird, wenn er von einem anderen System gemessen wird. Aber das würde zur Erklärung des Michelsonversuchs nicht genügen. Denn dieser beweist, daß der in der Längsrichtung der Bewegung liegende Stab, *im Ruhssystem gemessen*, kürzer ist, als er nach der klassischen Theorie sein sollte. Würde es ein ausgezeichnetes Inertialsystem  $J$  geben, und hätte man hierin zwei gleich lange starre Stäbe, von denen der eine sich nach der klassischen Theorie, der andere nach der Einsteinschen richten würde, so wären diese beiden Stäbe, in ein Inertialsystem  $S$  gebracht, nicht mehr gleich lang, wenn sie dort in der Längsrichtung der Bewegung liegen; der Einsteinsche Stab wäre kürzer. Und zwar würde dieser Unterschied sowohl in  $S$  als Unterschied der „Ruhlänge“, als auch von jedem anderen Inertialsystem aus als Unterschied in der „Länge der bewegten Stäbe“ gemessen werden. Es wird also in der Einsteinschen Theorie, genau so wie in der Lorentzschen, ein meßbar anderes Verhalten der starren Stäbe als in der klassischen Theorie behauptet, das mit der Gleichzeitigkeitsdefinition gar nichts zu tun hat.

Man hat oft die Begriffe *real* und *scheinbar* hier hineingebracht und die Einsteinsche Kontraktion eine scheinbare genannt im Gegensatz zur echten Lorentzkontraktion, die eine reale sei. Diese Begriffe sind ja verwirrend, aber sie treffen einen anzuerkennenden Unterschied, der nur richtig formuliert werden muß. Damit verhält es sich folgendermaßen. Die aus der Gleichzeitigkeit resultierende Einsteinsche Verkürzung bezieht sich auf den Vergleich zweier *verschiedener Größen*, die *derselben Theorie* angehören. Die „Länge eines bewegten Stabes“ ist eben etwas anderes als die „Länge eines ruhenden Stabes“, so wie etwa der „Gesichtswinkel eines Objekts aus 10 Meter Entfernung“ etwas anderes ist als der „Gesichtswinkel eines Objekts aus 100 Meter Entfernung“; beide Längenbegriffe gehen auf verschiedene Größen, und es ist weiter kein Wunder, daß sie zu verschiedenen Zahlwerten führen. Man kann diese Verschiedenheit einen *disjunktiven Unterschied* nennen; er betrifft verschiedene nebeneinander stehende Objekte. Was diesen Sachverhalt verdunkelt, ist, daß diese Objekte als verschiedene logische Funktionen desselben Arguments (nämlich des Stabes) aufgefaßt werden können; aber es sind eben doch *verschiedene* Funktionen, und sie stehen gleichberechtigt nebeneinander. Das wird ja sehr deutlich, wenn man die beiden Längenbegriffe als verschieden gerichtete Schnitte durch den Weltstreifen des Stabes in der Minkowskiwelt deutet; und es

gilt ja auch in gleicher Weise für das genannte Beispiel der Gesichtswinkel.

Anders aber liegt es mit der echten Lorentzverkürzung. Diese vergleicht die Verhaltensweisen *derselben Größe*, wie sie sich nach *verschiedenen Theorien* ergeben. Hier geht es also auf einen Unterschied im *Wahrheitsanspruch*; die beiden Behauptungen schließen einander aus, *derselbe* starre Stab verhält sich bei *derselben* Art der Längenmessung anders, wenn die Lorentzsche oder Einsteinsche Theorie Recht hat, als wenn die klassische Theorie Recht hat. Wir sprechen deshalb hier von einem *alternativen Unterschied*; in ihm wird das *wirkliche* Verhalten der Dinge mit einem *möglichen* verglichen. Man erkennt: es sind nicht die Begriffe real und scheinbar, die hier heranzuziehen sind, sondern die Begriffe alternativ und disjunktiv. Und der alternative Unterschied besteht in der Erklärung des Michelsonversuchs genau so zwischen der Einsteinschen und der klassischen Theorie, wie zwischen der Lorentzschens und der klassischen Theorie, während zwischen Lorentzschers und Einsteinscher Theorie hier kein Unterschied besteht; beide behaupten nämlich den in A. als Axiom VIII (S. 69) formulierten Tatbestand, während die klassische Theorie hier einen andern Tatbestand behauptet. In diesem Tatbestand kommt der Gleichzeitigkeitsbegriff überhaupt nicht vor.

Man sollte deshalb die beiden „Verkürzungen“ gar nicht mit demselben Namen bezeichnen. Es gibt eine Einsteinsche Verkürzung, welche aus der Relativität der Gleichzeitigkeit resultiert und die Länge des bewegten Stabes mit der des ruhenden Stabes vergleicht. Und es gibt eine Lorentzverkürzung, welche die Länge eines starren Stabes nach dem im Michelsonversuch beobachteten Tatbestand vergleicht mit der Länge des Stabes in der klassischen Theorie. Diese beiden Verkürzungen haben zufällig denselben Maßfaktor  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , und dies ist wohl der Grund, warum man sie immer verwechselt hat. Sie bedeuten beide etwas völlig Verschiedenes. Auch in der Einsteinschen Theorie kommt, außer der Einsteinschen Verkürzung, die „Lorentzverkürzung“ vor, und sie wird dort ebensowenig „erklärt“ wie in der Lorentzschens Theorie, sondern einfach axiomatisch angenommen.

Wenn wir sagen, daß die beiden Maßfaktoren „zufällig“ gleich sind, so soll dies heißen, daß ihre Gleichheit von gewissen Voraussetzungen abhängt; aber es besteht natürlich ein theoretischer Zusammenhang zwischen beiden Faktoren. Es läßt sich zeigen, daß sie unter der Voraussetzung der *Linearität der Transformation* immer gleich sein müssen, aber auch nur unter dieser Voraussetzung.

Beweis: Sei  $l$  ein Stab, der der Lorentz'schen bzw. Einsteinschen Theorie folgt, dagegen  $L$  ein Stab, der der klassischen Theorie folgt; ihre Ruhlängen in  $K$  seien gleich, also  $l_{K'}^K = L_{K'}^K$  (der obere Index bezeichnet das System, in dem gemessen wird, der untere das System, in dem der Stab ruht). Die Lorentzverkürzung bezieht sich auf das Verhältnis

$$l_{K'}^{K'} : L_{K'}^{K'} \quad (1)$$

Die Einsteinsche Verkürzung betrifft aber das Verhältnis

$$l_{K'}^K : l_K^K \quad (2)$$

Nun ist nach der klassischen Theorie  $L_{K'}^K = L_K^K$  (in diesem Vergleich wird nur die Gleichzeitigkeit von  $K$  benutzt, auf die von  $K'$  kommt es gar nicht an), also ist wegen der erstgenannten Gleichheit auch  $L_{K'}^K = l_K^K$ . Deshalb wird (2) gleich dem Verhältnis

$$l_{K'}^K : L_{K'}^K \quad (3)$$

Wegen der Linearität der Transformation (und nur für diese) ist aber (3) dasselbe Verhältnis wie (1), also ergibt auch (2) dasselbe Verhältnis wie (1).

Wenn wir jetzt aber auf die Frage der hier zu fordernden *Erklärung* näher eingehen wollen, so müssen wir zuvor darauf hinweisen, daß das Problem außerordentlich verdunkelt wird durch die Verwendung des Wortes „Verkürzung“. Denn dieses Wort verführt zu einer falschen Anwendung der Kausalforderung. Man sucht nach einer *Ursache der Verkürzung*, man glaubt also, eine Ursache für den *Unterschied* der verglichenen Größen finden zu müssen. Diese Vorstellung hat große Verwirrung angerichtet. Sie bewirkt, daß man die eine Theorie, die klassische, für bevorzugt hält; ihre Gesetze sollen die Dinge ohne Ursache befolgen, und erst für die *Abweichung* von diesem Verhalten will man eine Ursache verantwortlich machen. Aber es ist offensichtlich, daß es das gleiche Kausalproblem darstellt, ob sich die Maßstäbe und Uhren auf die klassische oder auf die relativistische Transformation einstellen. Das Wort *Einstellung*, von Weyl zum erstenmal in diesem Zusammenhang gebraucht, charakterisiert das Problem sehr gut. Daß zwei Maßstäbe, an jedem Orte benachbart verglichen, gleich groß sind, kann kein Zufall sein; es muß als *Einstellung auf das Feld* erklärt werden, in dem die Maßstäbe wie Probekörper gebettet sind. Wie die Magnetnadel sich auf das magnetische Feld ihrer unmittelbaren Umgebung einstellt, freilich nur in ihrer *Richtung*, stellen sich Maßstäbe und Uhren mit ihren *Einheitslängen* auf das *metrische Feld* ein. Alle metrischen Beziehungen zwischen materiellen Gebilden müssen so erklärt werden, also auch der im Michelsonversuch beobachtete Tatbestand, wonach sich starre Stäbe in bestimmter Weise auf die Lichtbewegung einstellen. Die Antwort kann natürlich nur eine ausgeführte Theorie der

Materie geben, von der wir noch nicht die leiseste Vorstellung besitzen; sie muß erklären, warum die Anhäufung gewisser Feldstellen besonderer Dichte, der Elektronen, gerade die Metrik des umgebenden Feldes in einfacher Weise zum Ausdruck bringt. Das Wort Einstellung deutet hier also nur auf eine *Aufgabe* hin, ohne selbst eine *Antwort* zu sein; der vorliegende *Tatbestand* ist ohne Benutzung des Wortes Einstellung in den Körperaxiomen streng formuliert. Wenn wir diese Theorie der Materie einmal besitzen, können wir das metrische Verhalten der materiellen Gebilde erklären; vorerst aber kann von einer Erklärung in der Einsteinschen Theorie so wenig die Rede sein wie in der Lorentzschen oder der klassischen.

Welches ist denn der Vorzug der Einsteinschen Theorie vor der Lorentzschen? Er liegt nicht etwa darin, daß Einstein eine Erklärung des Michelsonversuchs gäbe; das geschieht gar nicht, sondern der Michelsonversuch wird einfach als Axiom in die Theorie aufgenommen. Sondern er liegt darin, daß hier auf eine Erklärung des Michelsonversuchs durch eine „Verkürzung“ *verzichtet* wird. Eben diese „Erklärung“ der Lorentzschen Theorie ist ihr Fehler; sie setzt die klassischen Beziehungen als „von selbst gültig“ voraus und stellt die falsche Kausalforderung, die die Abweichung hiervon als durch eine Ursache bewirkt auffaßt.

Jetzt können wir auch die Frage beantworten, was sich in der Relativitätstheorie ändern würde, wenn die Versuche Millers als Beweis angesehen werden müßten, daß der bisherige negative Ausfall des Michelsonversuchs nicht prinzipiell festgehalten werden darf. *Nicht* ändern würde sich die Einsteinsche *Zeitlehre*, sie hat mit dem Michelsonversuch gar nichts zu tun. *Nicht* ändern würde sich auch die *Lichtgeometrie*; sie bleibt auf jeden Fall eine mögliche Definition der raumzeitlichen Metrik, und wahrscheinlich eine viel bessere und genauere als die Geometrie der starren Stäbe und natürlichen Uhren. Ändern aber würde sich unser Wissen über die Einstellung der materiellen Gebilde auf die Lichtgeometrie. Von den Körperaxiomen, soweit sie sich von denen der klassischen Theorie unterscheiden, ist der Michelsonversuch bisher als einziges bestätigt. Fällt dieses, so wird man sich über den Zusammenhang der materiellen Gebilde mit der Lichtgeometrie eine verwickeltere Auffassung bilden müssen.

Das würde aber die relativistische Physik nicht so sehr erschüttern. Es ist von vornherein eigentlich sehr unwahrscheinlich, daß die Körperaxiome völlig streng erfüllt sein sollen. Das Licht ist ein physikalisch



sehr viel einfacheres Gebilde als ein materieller Stab, und wenn man einen Zusammenhang zwischen beiden sucht, sollte man zunächst annehmen, daß er nicht einem so idealen Schema entspricht, wie es die Körperaxiome behaupten. Vielleicht haben die Körperaxiome nur die Geltung einer ersten Annäherung, etwa wie die idealen Gasgesetze, die sich bei größerer Genauigkeit auch nicht aufrecht halten lassen. Eine schärfere Übereinstimmung läßt sich nur bei den Uhren erwarten, aber auch nicht für mechanische Uhren oder rotierende Planeten, sondern nur für die *Atomuhren*; denn Lichtfrequenz und Lichtgeschwindigkeit sind verwandte Phänomene und könnten wohl in einfacher Beziehung stehen. Hierfür spricht ja auch die jetzt immer deutlicher heraustretende Rotverschiebung der Spektrallinien, die allerdings der allgemeinen Relativitätstheorie angehört und deshalb hier nicht erwähnt worden ist. (§ 42 in A.)

Was beweisen denn aber die bekannten elektrodynamischen Versuche von Wilson, Trouton-Noble usw.? Sie beweisen, daß für die Elektrodynamik die Lichtgeometrie viel wichtiger ist als die Geometrie der starren Stäbe und Uhren. Sie bedürfen zu ihrer Erklärung nicht der Körperaxiome. Es ist im Gegenteil viel wahrscheinlicher, daß sich die Gesetze der Elektrodynamik auf die Metrik des *Lichtes* beziehen, und nicht auf die Metrik der materiellen Gebilde. So erscheint denn eine Entwicklung durchaus möglich — zu der ja auch schon Ansätze vorliegen —, bei der die Definition der Metrik durch Stäbe und Uhren (abgesehen von den Atomuhren) aufgegeben wird, weil diese Gebilde zu komplizierte und daher ungenaue Mechanismen darstellen. Daß damit nicht alles Messen überhaupt entfällt, ja daß das Messen damit im Gegenteil nur genauer fundiert wird, ist durch die Konstruktion der Lichtgeometrie gezeigt, welche die Relativitätstheorie von den Körperaxiomen unabhängig macht.

Auch der Michelsonversuch bedeutet also nur einen einzelnen Stein im Bauwerk der Relativitätstheorie, und wenn er historisch auch einer der Grundpfeiler war, so bedeutet er im logischen System doch nur die Verknüpfung der lichtgeometrischen Grundlage mit der Theorie der materiellen Gebilde. Wieweit aber diese Verknüpfung von der Theorie zutreffend vermutet wird, kann nur die zukünftige Erfahrung lehren.

---