

Realismus und Idealismus in der Einsteinschen Relativitätstheorie

Von WALTER BÖHM

Die folgenden Ausführungen wollen an meine ausführliche Besprechung des Buches von H. Friedmann: „Wissenschaft und Symbol“ im „Philosophischen Jahrbuch“, 61. Band, 2. Heft, Fulda 1951, S. 229ff. anknüpfen. Es ist dort die charakteristische Betrachtungsweise aufgezeigt worden, in der Friedmann die physikalischen Theorien als Ausfluß „optischer“ oder „haptischer“ Weltansicht sieht. Er stellt dort u. a. auch die Forderung auf, daß beide Weltanschauungen nicht miteinander vermengt werden sollen und tendiert selbst auf eine rein optisch-idealistische Weiterklärung hin. Ich habe dem entgegengehalten, daß man bei vollständiger Vernachlässigung der Haptik notgedrungen die Realität der Welt zugunsten einer im Leeren schwebenden Rationalität verlieren muß und daß daher beide Anschauungsweisen nebeneinander herlaufen müssen.

Im folgenden möchte ich das Neben- und Ineinander idealistischer und realistischer Weltdeutung in der speziellen Relativitätstheorie zeigen und versuchen, diese Theorie in ihre „optischen“ und „haptischen“ Elemente, die beide in ihr enthalten sind, zuerst zu zerlegen und dann wieder das Ineinander-verschränktsein dieser Elemente aufzuzeigen. Am Ende soll dann auch noch erklärt werden, wie die weitgehende Elimination der optischen Elemente in der allgemeinen Relativitätstheorie, die schon Friedmann bemerkt hat, im einzelnen stattgefunden hat.

Es könnte sonderbar erscheinen, daß ausgerechnet die elektromagnetischen Vorgänge als reale Wellenbewegung im physikalischen Raum gelten sollen, während die Bahnen, die die Elementarkörperchen durchlaufen, sich in Wahrscheinlichkeitsfelder auflösen, also etwas Irreales sind. Den letzteren Sachverhalt hat Wenzl mit den Aristotelischen Begriffen Potenz und Akt formuliert: das Korpuskel wird als solches aktuell an diskreten Raumpunkten, im Raum dazwischen ist es nur potentiell. Das Raumfeld zwischen ihnen ist subjektiv, unwirklich und unreal.

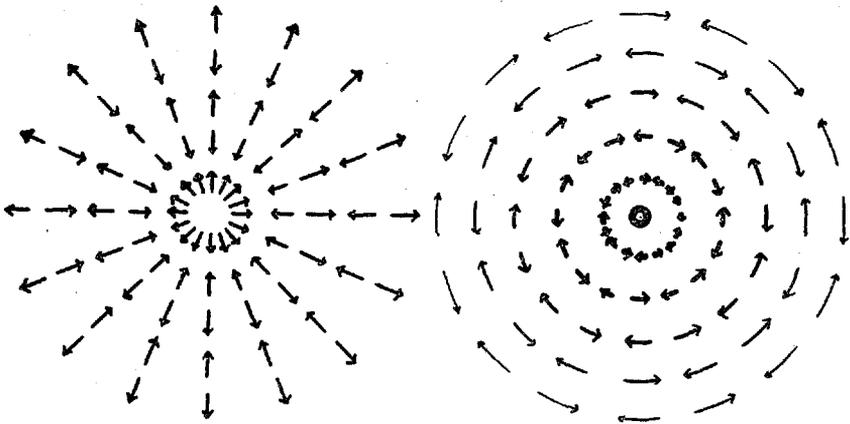
Der Unterschied zwischen einer Wahrscheinlichkeitswelle und einer Lichtwelle kann am besten mit dem Schema einer sich ausbreitenden Sphäre veranschaulicht werden (vgl. meinen Artikel: „Über die Anwendbarkeit . . .“ im 1. Heft 1951, S. 38ff., bes. S. 41). Die Wahrscheinlichkeitswellen sind mathematisch skalare Wellen wie die Schallwellen, wenn man letztere als Fortpflanzung von periodischen Druckschwankungen in der Luft auffaßt. Sie können aber auch, weil diese Druckschwankungen auf einem Hin- und Herschwingen der Luftteilchen längs der Fortpflanzungsrichtung der Welle beruhen, als Longitudinalwellen angesehen werden. Die Schwingungen vollziehen sich also in der Radialrichtung und ihre Fortpflanzung geschieht eben-

falls in der Richtung der vom Mittelpunkt (Schallzentrum) ausstrahlenden Radien. Auch die Wahrscheinlichkeitswellen gehören dem von den Strahlen erfüllten imaginären Raum von unbestimmter Dimension rings um das Zentrum an. Sie besitzen keine physikalische Realität. — Die Lichtwellen aber als reale Transversalschwingungen elektrischer und magnetischer Feldvektoren können sich nur in den realen Kugeloberflächen rings um das Zentrum selbst abspielen und ihre Fortpflanzung besteht in einer fortgesetzten, mit Lichtgeschwindigkeit erfolgenden Vergrößerung der Radien dieser Sphäre, in die sich das Zentrum gewissermaßen erweitert. Da aber reales Quellzentrum und Peripherie der potentiell unendlichen Sphäre als miteinander identisch angesehen werden müssen, so vollzieht sich der Energieaustausch ebenfalls nur in einzelnen Quanten $h\nu$ an diskreten Raumpunkten: ein Atom, das von der fortschreitenden Kugelwelle eines Lichtquants getroffen wird, absorbiert entweder den gesamten Energiebetrag der schwingenden Peripherie oder gar keinen.

Sphärische Darstellung der

Wahrscheinlichkeitswelle

Lichtwelle



Daß sich die Lichtwellen in allen gleichförmig zueinander bewegten Bezugssystemen in Form von realen Kugelwellen fortpflanzen, ist das Grundaxiom der speziellen Relativitätstheorie. Die Unmöglichkeit, sich dieses Grundaxiom anschaulich vorzustellen, entsteht dadurch, daß der Vorgang der Lichtausbreitung selbst als realer Vorgang betrachtet wird, der sich im realen Raum wirklich abspielt, daß aber die Art und Weise, wie er sich vollzieht, sein zeitlicher und räumlicher Verlauf, nach der Analogie mit dem Schvorgang verstanden werden muß.

Um das zu verstehen, muß man sich zunächst darüber klar werden, daß Einstein mit dem Michelson-Versuch eine Umdeutung vornahm, die nicht in der unmittelbaren Gegebenheit des Experiments liegt und die er allerdings später in der allgemeinen Theorie zum Teil wieder zurückgenommen hat.

Im Michelson-Versuch wird an einem bestimmten Punkt durch einen halbdurchlässigen Glasspiegel ein Lichtstrahl in zwei kohärente Strahlen aufgespalten und beide Strahlen legen dann in zueinander normalen Richtungen längs der Erdoberfläche einen bestimmten nahezu gleichen Weg zurück, werden dann durch Spiegel reflektiert, so daß sie in sich selbst zurücklaufen, und werden schließlich am Ausgangspunkt durch neuerliche Spiegelung des einen Strahls miteinander zur Interferenz gebracht. Die Interferenzstreifen werden genau beobachtet. Durch Herumklappen des ganzen Apparates um 90 Grad in seiner Ebene kann man erreichen, daß die beiden Strahlen ihre Rolle vertauschen. Würde sich das Licht in den zueinander normalen Richtungen mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen, so müßte sich nach der Drehung des Apparates eine Verschiebung der Interferenzstreifen ergeben. Da dies nicht der Fall ist, muß man schließen, daß sich das Licht in jeder Richtung längs der Erdoberfläche mit der gleichen Geschwindigkeit fortpflanzt.

Es ist anzunehmen, daß man dasselbe Ergebnis erhielte, wenn man das Experiment auf der Oberfläche des Mars anstellen könnte, der sich gegenüber der Erde bewegt, daß sich also allgemein auf jedem Himmelskörper das Licht längs seiner Oberfläche in jeder Richtung gleich schnell fortpflanzt. Für den klassischen Physiker würde das Ergebnis des Versuches zunächst besagen, daß die Erde den Lichtäther in ihrer unmittelbaren Umgebung mitnimmt, so daß sich kein Einfluß der Erdbewegung auf die Lichtausbreitung längs der Erdoberfläche ergibt. Statt dessen nahm Einstein eine Umdeutung vor, die aus dem Michelson-Versuch mehr herausliest bzw. mehr in ihn hineinliest, als eigentlich in ihm enthalten ist. Nach Einsteins Deutung in der speziellen Relativitätstheorie muß man einen Einfluß der Erde auf die Lichtbewegung überhaupt leugnen. Von der Erde oder dem besonderen Himmelskörper, auf dem das Experiment angestellt gedacht werden könnte, ist überhaupt abzusehen. Einstein sieht nur den Beobachter, der in alle Raumrichtungen Lichtsignale aussendet und feststellt, daß die sich alle mit derselben Geschwindigkeit von ihm weg bewegen. Denken wir uns also mit dem Beobachter ein Koordinatensystem S fest verbunden, dessen Ursprung mit dem Augpunkt des Beobachters zusammenfällt, dann bildet die vom Ursprung weglaufende, durch einen Lichtblitz erzeugte Kugelwelle nach einer gewissen Zeit t eine Kugeloberfläche, deren Gleichung nach den Regeln der analytischen Geometrie gegeben ist durch:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$$

(ct ist der Radius der Kugel als der vom Licht in der Zeit t bei der Ausbreitungsgeschwindigkeit c vom Ursprung aus zurückgelegte Weg).

Genau so aber, wie vom möglichen Einfluß der Erde, wird vom Einfluß irgendeines anderen Himmelskörpers abgesehen. Bewegt sich also ein zweiter

Beobachter relativ zum ersten, so kann man der rechnerischen Einfachheit wegen annehmen, daß der Ursprung des mit ihm fest verbundenen Bezugssystems S' im Augenblick, wo das Lichtsignal abgesandt wird, mit dem Ursprung des ersten Systems S zusammenfällt. Denn es wird ja davon abgesehen, daß sich die beiden Beobachter je auf verschiedenen Himmelskörpern befinden müssen und von zwei verschiedenen Lichtquellen zwei verschiedene Lichtsignale aussenden, wobei jeder Beobachter mit seiner eigenen Michelson-Apparatur feststellt, daß sich auf seinem Himmelskörper die Lichtwellen nach allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit fortpflanzen. Zwei Himmelskörper aber und die Beobachter selbst mit ihren beiden Apparaturen können sich natürlich nicht gleichzeitig an einem Punkt befinden oder sich räumlich überdecken, wie es von den beiden Koordinatensystemen S und S' angenommen wird. Aber von dieser Körperlichkeit wird abgesehen und die Bezugssysteme werden idealisiert. Und so kann man annehmen, daß die beiden Augpunkte der Beobachter und ebenso die beiden Lichtquellen in den Ursprüngen der beiden Systeme im Augenblick der Lichtaussendung zusammenfallen und daß daher statt der zwei Lichtsignale nur eines vom identischen Ursprung aus abgesandt wird.

Dabei muß man folgendes beachten: Daß der Augpunkt des Beobachters und die Lichtquelle im Ursprung zusammenfallend gedacht werden, ist im Michelson-Apparat unmittelbar gegeben und daher eine ohne Bedenken zulässige Abstraktion. Denn der Augpunkt des Beobachters wie auch die Lichtquelle liegen theoretisch in demjenigen Punkt, wo die Strahlen durch den halbdurchlässigen Spiegel geteilt werden und wo sie nach ihrer Reflexion auch wieder zusammentreffen. Daß die wirkliche Lichtquelle sich etwas abseits von diesem Punkt befindet, ist eine belanglose technische Einzelheit. Die wirkliche Lichtquelle liefert ja keine kohärenten Strahlen. Man braucht aber kohärente Strahlen, die man zur Interferenz bringen kann. Die kohärenten Strahlen aber erzeugt die ideale Lichtquelle, nämlich der halbdurchlässige Spiegel (der nur energetisch von der wirklichen Lichtquelle gespeist wird). Ebenso ist es eine belanglose technische Einzelheit, daß man die nach ihrem Wiederzusammentreffen im Spiegel interferierenden Strahlen erst durch ein Linsensystem laufen lassen muß, hinter dem sich erst das wirkliche beobachtende Auge befindet. Der eigentliche Augpunkt ist doch derjenige Punkt im halbdurchlässigen Spiegel, wo die reflektierenden Strahlen aus verschiedener Richtung zurückkehrend wieder aufeinandertreffen. Eine theoretische, von den technischen Einzelheiten abstrahierende Betrachtung des Michelson-Experimentes ergibt also, daß Augpunkt des Beobachters und Lichtquelle in einem Punkt zusammenfallen, der als Ursprung des Koordinatensystems angenommen werden kann.

Etwas anderes ist es aber mit den weiteren Abstraktionen, daß auch die beiden Augpunkte der zwei Beobachter, die sich auf verschiedenen Himmelskörpern befinden und sich zweier verschiedener Versuchapparaturen bedienen, im Augenblick der Lichtaussendung in einem Punkt zusammenfallen sollen, daß weiter auch die beiden idealen Lichtquellen in demselben Punkt zusam-

menfallen sollen und daß es sich sogar schließlich ebendeswegen nicht um zwei verschiedene Lichtausbreitungsvorgänge handeln soll, sondern beide Male um einen und denselben. Das ist eine Ausdeutung, die jedenfalls weit über das hinausgeht, was der Michelson-Versuch unmittelbar besagt.

Wir haben es also jetzt nicht mehr mit zwei, sondern nur mit einem einzigen Lichtsignal zu tun, welches auch nur eine einzige reale elektromagnetische Kugelwelle erzeugt, die sich von der einen Lichtquelle nach allen Richtungen gleichmäßig ausbreitet. Dagegen haben wir noch immer zwei Beobachter, zwei beobachtende Augen, und mit ihnen verbunden je ein Koordinatensystem. Ihre beiden Augpunkte befinden sich je im Ursprung der beiden Systeme, fallen aber im Moment der Lichtaussendung mitsamt der Lichtquelle in einem einzigen Punkt zusammen. Nach diesem Moment entfernen sie sich aber mit gleichförmiger Geschwindigkeit voneinander.

Obwohl aber nur ein einziger realer Lichtausbreitungsvorgang angenommen wird, soll dieser in beiden Bezugssystemen nach Ablauf einer beliebigen Zeit eine Kugelwelle mit dem Ursprung als Mittelpunkt bilden. Also auch im System S' soll die Wellenfläche die Gleichung

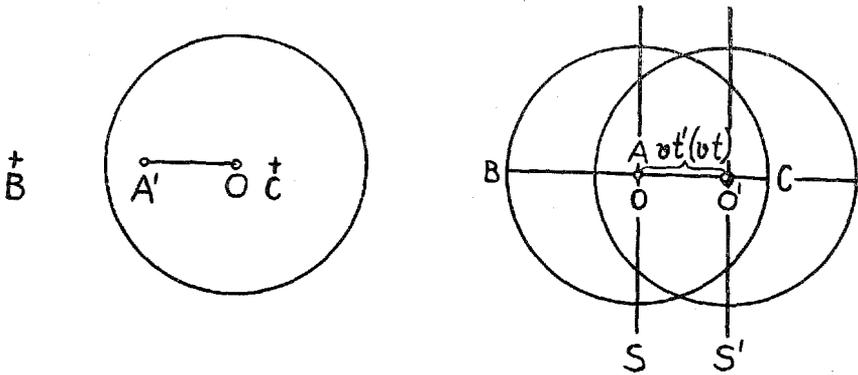
$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$$

haben. (Eine Transformation von den x, y, z auf neue Koordinaten x', y', z' die die Kugel $x^2 + y^2 + z^2 + c^2 t^2 = 0$ wieder in eine Kugel transformiert, ist mathematisch nur möglich, wenn man die Variable t mittransformiert zu einer neuen Variablen t').

Will man den Sachverhalt veranschaulichen, daß es sich um eine einzige reale Lichtwelle handeln soll, so darf man nur eine Kugel zeichnen, will man aber den anderen Sachverhalt veranschaulichen, daß die Lichtwelle für beide Beobachter als Kugelwelle erscheinen soll, so ist man doch wieder gezwungen, zwei Kugeln zu zeichnen, nämlich eine um den Ursprung von S und die andere um den von S' , der jetzt mit dem von S nicht mehr zusammenfällt, weil sich das System S' inzwischen während des Lichtausbreitungsvorganges gegen S verschoben hat.

In dieser letzteren Veranschaulichung kommt die Realität der elektromagnetischen Lichtwelle nicht mehr zum Ausdruck, denn ein und derselbe Vorgang kann nicht gleich zwei Vorgängen sein. Vielmehr geschieht die Darstellung so, als ob es sich jetzt nicht mehr um einen realen Schwingungsvorgang handelt, sondern um das Hinausschieben von Sehflächen, die jeder der beiden Beobachter von seinem Augpunkt aus in seinen subjektiven Beobachtungsraum hinein vornimmt. Daß dieses Hinausschieben der Sehphäre bei beiden Beobachtern gleich schnell geschieht, nämlich mit der Lichtgeschwindigkeit c , ist eine weitere Annahme, die sich keineswegs aus dem Michelsonversuch ergibt, sondern ein zusätzliches Axiom darstellt.

Schematische Darstellung der Lichtausbreitung

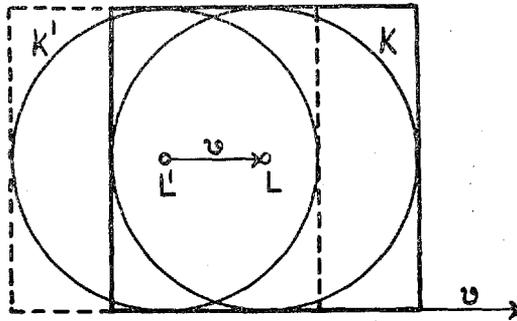


Die Lichtausbreitung wird also in der speziellen Relativitätstheorie einerseits als realer Vorgang angesehen, andererseits aber doch wieder so behandelt, als ob das Hinaussenden der Lichtstrahlen vergleichbar wäre mit dem Hinaussenden von Sehstrahlen aus dem Auge beim Schauen und das Weglaufen der Kugelwelle dem Hinausschieben der Sehfläche entspräche. Da jeder Beobachter seine eigene Sehphäre um sich besitzt und sich der Sehvorgang in allen Beobachtern in gleicher Weise vollzieht, so bemerkt jeder eine Kugel, die sich von seinem Auge als Zentrum in die Tiefe des Raumes hinein ausbreitet. Die spezielle Relativitätstheorie ist also von diesem Aspekt aus eine optische Theorie. Aus dieser Auffassung ergibt sich auch sofort sehr einleuchtend, warum das Eintreffen der Lichtwellen in den Punkten B und C , das sich für den einen Beobachter gleichzeitig vollzieht, für den anderen zu verschiedenen Zeiten stattfindet. Denn für den Beobachter in S' kann zu keiner Zeit eine Kugel konstruiert werden, auf der B und C gleichzeitig liegen. Somit sind zwei Ereignisse, die sich an zwei verschiedenen Punkten für den einen Beobachter zu gleicher Zeit abspielen, für den anderen nicht mehr gleichzeitig.

Da aber auf der anderen Seite die Lichtausbreitung für beide Beobachter einen realen elektromagnetischen Wellenvorgang bedeuten soll, und zwar ein und denselben, so kann man ihn auch von außen her gegenständlich betrachten (nicht als subjektiven Sehvorgang). Während sich die beiden Beobachter je im Ursprung ihres eigenen Systems befinden, vollzieht sich der Lichtblitz dann irgendwo draußen im Raum. Augpunkt und Lichtquelle werden also jetzt nicht mehr als im Moment der Lichtaussendung zusammenfallend angenommen. Die Lichtquelle habe im Moment der Lichtaussendung vielmehr die Ortskoordinaten x, y, z und die Zeitkoordinate t bzw. für den Beobachter in S' die Koordinaten x', y', z' und t' . Man kann z. B. annehmen, daß der eine Beobachter in einer würfelförmigen Kabine mit ringsum geschlossenen Wänden sitzt und in dieser durch den Weltraum fliegt, während

der zweite Beobachter von einem Standpunkt außerhalb beobachtet, wie die Kabine mit dem ersten Beobachter vorbeifliegt. Läßt nun der erste Beobachter genau vom Mittelpunkt seiner Kabine ein Lichtsignal abgehen, so wird er konstatieren, daß die Lichtwelle K alle Kabinenwände zu gleicher Zeit erreicht. Der zweite Beobachter außen aber, an dem die Kabine vorbeifliegt, wird seinerseits feststellen, daß das Lichtsignal in seinem System sich von seiner Quelle aus als Kugel K' ausbreitet und die Kabinenwände daher nicht gleichzeitig erreicht.

Auch hier läßt sich das wieder nur veranschaulichen, wenn man statt einer Kugelwelle zwei zeichnet, obwohl es sich um denselben Vorgang handeln soll.



Er wird aber wieder idealisiert und als Schvorgang betrachtet, der von zwei Beobachtern ausgeht, die sich in L und L' befinden. Die Lichtquellen scheinen hier als Sitz für Beobachter mit den Kugelwellen sich ebenfalls in zwei Lichtquellen L und L' aufzuspalten. Doch ist zu beachten, daß es für die Betrachtung gleichgültig ist, ob die Apparatur, die den Lichtblitz erzeugt, sich mit der Kabine mitbewegt oder nicht; es ist nur gefordert, daß sie im Augenblick der Absendung des Lichtsignals eine solche Stellung einnimmt, daß die Lichtausendung genau von der Mitte der Kabine ihren Ausgang nimmt. Dieser reale Punkt aber wird sich als Mittelpunkt der Kugelwelle für den Kabinenbeobachter mit der Kabine mitbewegen, für den Beobachter außerhalb aber nicht. Es kommt somit durch das Relativitätsprinzip zu einer Aufspaltung des realen Mittelpunktes. Für den einen Beobachter ist das Zentrum der Kugelwelle identisch mit dem Mittelpunkt der Kabine, für den anderen Beobachter aber bewegt es sich, im Raum stillstehend, aus der Kabine heraus in demselben Maße wie die Kabine sich fortbewegt. Die Beobachter betrachten also verschiedene Raumpunkte als Wellenzentrum, sind sich aber gleichzeitig darüber einig, daß deswegen die wirkliche Lichtquelle selbst (der Apparat, der das Lichtsignal aussendet) deswegen nicht verdoppelt worden ist.

Daß der Lichtvorgang trotz der idealen Auffassung in formaler Hinsicht in Wirklichkeit doch wieder einen und denselben realen Vorgang darstellen soll, hat weiter zur Folge, daß die Lichtgeschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit sein muß. Denn würde sich der zweite Beobachter mit größerer Ge-

schwindigkeit vom ersten Beobachter davonbewegen als das Licht selbst, so würde er im System des ersten Beobachters das Licht von Anfang an überholen und die Kugelwelle könnte ihn nie erreichen. Für den zweiten Beobachter könnte also überhaupt keine Welle existieren. Mathematisch ergibt sich, daß zwar eine existiert, daß sie aber imaginär ist (d. h. ihre Gleichung eine komplexe Funktion ist). Denn in der Gleichung $x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = 0$ haben jetzt die Quadrate negative Werte und die Koordinaten selbst sind imaginär (der Ausdruck unter der Wurzel $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ wird negativ).

Ähnlich wie die Wahrscheinlichkeitswellen können also auch die Lichtwellen imaginär werden, nämlich dann, wenn man zu Geschwindigkeiten gelangt, die größer sind als die Lichtgeschwindigkeit. Ähnlich wie bei den Wahrscheinlichkeitswellen könnte man also auch hier die Sache so auffassen, daß es sich bei der in den relativistischen Formeln dargestellten Lichtausbreitung um einen Vorgang handelt, der sich in einem idealen, fiktiven Raum abspielt und gar kein realer physikalischer Vorgang ist, was den optischen Charakter der Theorie zum Ausdruck bringt.

Soll aber der Lichtvorgang niemals imaginär werden, sondern für jeden möglichen Beobachter real bleiben, so muß die Lichtgeschwindigkeit für die relative Bewegung der Beobachtungssysteme gegeneinander eine Grenzgeschwindigkeit sein, die nie überschritten und nicht einmal erreicht werden darf. Wie aber ist diese Forderung, daß reine Beobachter eine bestimmte Geschwindigkeit zueinander nicht überschreiten dürfen, physikalisch überhaupt formulierbar? Offenbar nur so, daß man sich wieder daran erinnert, daß die Beobachtungssysteme ja in Wirklichkeit immer mit Körpern verbunden sind, aus deren relativistischer Dynamik es sich ergeben muß, daß sie nie bis zur Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden können. Hier kommt man wieder in beiden Hinsichten von der optischen idealen Auffassung zur realistischen zurück, nämlich 1. dadurch, daß man den Lichtvorgang unter allen Umständen doch hinterher wieder als realen Vorgang im physikalischen Raum ansieht, und 2. dadurch, daß man sich jetzt nachträglich wieder erinnert, daß die Beobachter mitsamt ihrem Bezugssystem ja immer an materielle Körper gebunden sind (Erde, Mars oder andere Körper), aus deren relativistischer Dynamik folgen muß, daß eine Beschleunigung von Körpern bis zur Lichtgeschwindigkeit unmöglich ist. Und tatsächlich: wenn man die Grundgleichungen der Mechanik für die Lorentztransformation invariant zu formulieren sucht, dann ergibt sich, daß die Masse jedes materiellen Körpers ins Unendliche anwächst, je mehr er sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Um ihn also so weit zu beschleunigen, bis die Lichtgeschwindigkeit erreicht ist, wäre eine unendlich große Kraft erforderlich. Je größer aber seine Geschwindigkeit, desto größer muß wegen der größer gewordenen Masse auch die Kraft sein, die ihn weiter beschleunigen soll. Es wächst somit mit seiner Geschwindigkeit auch sein Energieinhalt und wird unendlich groß bei Lichtgeschwindigkeit. Somit kann ein Körper die Lichtgeschwindigkeit nur asymptotisch erreichen. Sie ist eine Grenzgeschwindigkeit.

Worauf wir mit allen diesen Gedankengängen letzten Endes hinaus wollen, ist kurz gesagt zu zeigen, daß man in der speziellen Relativitätstheorie nie genau weiß, ob es sich beim Lichtausbreitungsvorgang um einen realen oder bloß idealen Vorgang handelt und ob ein Bezugssystem immer mit einem materiellen Körper oder bloß mit einem beobachtenden Auge (mit vernachlässigbarer Masse) verbunden sein soll.

Mathematisch kann man sich das ebenfalls an den relativistischen Formeln leicht klar machen: Die Transformationsformeln, die schon Lorentz vor Einstein gefunden hat und die vom System x, y, z, t auf das System x', y', z', t' transformieren (und dabei $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$

in $x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$ überführen),
lauten bekanntlich:

$$(1) \quad x = \frac{x' - ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' - \frac{u}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

und zurück:

$$(2) \quad x' = \frac{x + ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t + \frac{u}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

u bedeutet die Relativgeschwindigkeit der beiden Bezugssysteme zueinander (in den vorhergehenden Zeichnungen haben wir sie mit v bezeichnet), c ist die Lichtgeschwindigkeit = $3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

Aus den Formeln (1) ergibt sich für die Geschwindigkeit eines Körpers:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\frac{dx' - u dt'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}}{\frac{dt' - u \frac{dx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}} = \frac{dx' - u dt'}{dt' - u \frac{dx'}{c^2}}$$

und wenn man oben und unten durch dt' dividiert, erhält man:

$$v = \frac{\frac{dx'}{dt'} - u}{1 - \frac{u}{c^2} \frac{dx'}{dt'}}, \quad \text{und weil} \quad \frac{dx'}{dt'} = v',$$

$$(3) \quad v = \frac{v' - u}{1 - u \frac{v'}{c^2}}$$

Das ist das bekannte Transformationsgesetz für die Geschwindigkeit. Es zeigt, daß sich die Systemgeschwindigkeit u und die Geschwindigkeit v' , die ein Körper im gestrichenen System besitzt, durchaus nicht algebraisch (oder allgemeiner vektoriell) addieren wie bei Galileischer Transformation, sondern daß ein viel komplizierteres Gesetz gilt. Dies ist ja aus den Voraussetzungen der Theorie zu erwarten.

Interessant wird die Sache erst, wenn man nun an Hand dieser Formel gewisse Grenzbetrachtungen anstellt. Nehmen wir z. B. an, die Geschwindigkeit v' konvergiere asymptotisch gegen c , was ja nach den relativistischen Prinzipien zulässig und denkbar ist. Dann nähert sich auch v , die Geschwindigkeit des Körpers im ungestrichenen System der Geschwindigkeit c , denn für $v' \rightarrow c$ ergibt sich:

$$(4) \quad v \rightarrow \frac{c - u}{1 - u \frac{c}{c^2}} = c^2 \frac{c - u}{c^2 - u c} = \frac{c^2}{c} \times \frac{c - u}{c - u} = c.$$

Ein Körper kann ja nun die Geschwindigkeit c nie erreichen, wir wissen aber, daß das Licht diese Geschwindigkeit besitzt. Das zweite Grundpostulat der speziellen Relativitätstheorie besagt, daß es in jedem System dieselbe Geschwindigkeit c besitzen soll. Es ist in der Forderung enthalten:

$$x^2 + y^2 + z^2 - \underline{c}^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - \underline{c}^2 t'^2 = 0$$

wo c auf beiden Seiten der Gleichung denselben Wert besitzt.

Fassen wir nun den Lichtvorgang als wirkliche Fortpflanzung von Energie (Energiequanten) im physikalischen Raum, so können wir ihn ja als Grenzfall einer Körperbewegung (Fortpflanzung eines Massenenergiepakets) ansehen und dann besagt die Formel (4) eben nichts anderes, als was wir schon zu Anfang vorausgesetzt haben, nämlich daß das Licht in jedem System dieselbe Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen soll, also eine physikalische Trivialität. Metaphysisch betrachtet ist es aber keine Selbstverständlichkeit, insofern nämlich darin zum Ausdruck kommt, daß das Postulat der konstanten Lichtgeschwindigkeit c für alle Systeme gleichbedeutend ist damit, daß man den Lichtausbreitungsvorgang doch wieder als realen Vorgang, als Fortpflanzung einer physikalischen Realität im Raum betrachtet und ihn somit in den Formeln wie die Bewegung eines makroskopischen materiellen Körpers, der sich mit der Geschwindigkeit des Lichtes fortpflanzt, behandeln kann — während andererseits die Forderung, daß das Licht sich in jedem System als zentrale Kugelwelle verbreiten soll, zu ihrem anschaulichen Verständnis eine idealistische Auffassung der Lichtwellen erfordert.

Zu demselben Ergebnis, daß das Licht letzten Endes (wegen des zweiten Postulates) doch wieder als physikalische Realität betrachtet wird, kommt man, wenn man die obige Transformationsformel (3) für die Geschwindigkeit zur Deutung des Fizeauschen Versuches verwendet. Bekanntlich bekommt

man die richtige Formel, wenn man für die relative Systemgeschwindigkeit u die Strömungsgeschwindigkeit $-w$ des Wassers einsetzt, für v' aber die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung im (ruhenden) Wasser $\frac{c}{\mu}$, wenn μ den Brechungskoeffizienten des Wassers bedeutet. Dann ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit in bezug auf den ruhenden Beobachter:

$$v = \frac{\frac{c}{\mu} + w}{1 + \frac{w}{c^2} \times \frac{c}{\mu}}, \text{ oder näherungsweise:}$$

$$v = \frac{c}{\mu} + w \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right)$$

Daß ich aber für v' , welches doch ursprünglich die beobachtete Geschwindigkeit eines Körpers bedeutet, nun ohne weiteres die Lichtgeschwindigkeit im Wasser $\frac{c}{\mu}$ einsetzen kann, zeigt zum zweiten Mal, daß das Licht als etwas ebenso Wirkliches aufgefaßt wird wie ein Körper: indem die Materie des Wassers die Lichtgeschwindigkeit vermindert von c auf $\frac{c}{\mu}$, scheint sie ihm die Natur eines Körpers zu verleihen, da ich dann $\frac{c}{\mu}$ ohne weiteres für v' in die Formel einsetzen kann.

Weiter aber kommt in der möglichen Ersetzung der Systemgeschwindigkeit u durch die Strömungsgeschwindigkeit $-w$ des Wassers zum Ausdruck, daß die Beobachtungssysteme nun doch letzten Endes auch wieder mit Materie verbunden sind und nicht mit idealen Beobachtern; während in der Einsteinschen Ableitung der Lorentzformeln angenommen wird, daß sich die Systeme überdecken, so daß die sich in beiden ausbreitenden Lichtwellen zu einem einzigen Wellenvorgang zusammenfallen. Körper können sich aber nicht überdecken, sondern nur idealisierte Koordinatensysteme.

So aber wie die Auffassung des Lichtvorganges als realen Vorgangs bereits in dem Grundpostulat:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$$

mitgehalten war, nämlich in der zusätzlichen Forderung, daß auf beiden Seiten c denselben Wert haben soll, so ist auch die Auffassung der Bezugssysteme als realer Körper versteckt in der notwendigen Forderung enthalten, daß die Zeit t in t' mittransformiert werden muß. Denn das ist ja nur möglich für die physikalische Zeit, die mit Uhren, also mit materiellen Instrumenten gemessen wird, die an den verschiedenen Orten des Bezugssystems aufgestellt, also mechanisch befestigt werden müssen. Es kann sich also nur um ein materielles Bezugssystem handeln, in dem Uhren aufgestellt werden können und in dem

es überhaupt physikalische Vorgänge geben kann, die sich an Körpern abspielen.

Zusammenfassend ist also festzustellen, daß die spezielle Relativitätstheorie teils eine optische, teils eine haptische Theorie ist, also gewissermaßen eklektischen Charakter besitzt. Optisch ist das Postulat, daß in zwei zueinander bewegten Systemen ein und derselbe Lichtblitz beidemale sich als Kugelwelle ausbreiten soll. Haptisch ist das Postulat, daß die Lichtgeschwindigkeit in beiden Systemen denselben Wert c haben soll und daß dann die Zeit mittransformiert werden muß (entweder muß c oder t oder beide transformiert werden, wenn das erste Postulat möglich sein soll). So wird der Lichtvorgang einerseits als Sehvorgang angesehen, der uns Kunde gibt vom Geschehen im Weltraum und andererseits auch wieder selbst als reales räumliches Geschehen, das durch eben denselben Vorgang von außen betrachtet wird. Und ein in meinem Bezugssystem bewegter Körper trägt zugleich selbst ein Bezugssystem — obwohl sich auf dem Körper gar kein Beobachter befindet (vgl. die Deutung des Fizeauschen Versuches). Darin liegt die „Verworrenheit“, die ein bekannter Experimentalphysiker (Lenard) einmal nicht ganz mit Unrecht dieser Theorie vorgeworfen hat, freilich aus nicht ganz reinen und sachlichen Motiven.

Doch wurde die optisch-idealistische Deutung des Michelson-Versuches in der allgemeinen Relativitätstheorie wieder in anderem Sinne revidiert. Hier sind die Beobachter verschwunden, wie „weggeblasen“ (Friedmann). Es gibt nur mehr reale Bezugssysteme, die an Himmelskörpern haften, und die Lichtausbreitung ist ein physikalischer Vorgang, der sich im realen Raum abspielt, der dem Licht durch seine Metrik Bahn und Geschwindigkeit vorschreibt. Die Lichtstrahlen beschreiben geodätische Nulllinien im gekrümmten Raum-Zeit-Kontinuum. Die Raumkrümmung wird aber bestimmt von der Verteilung der Himmelsmassen und ihrer Bewegung. Das Licht ist also auf seinem Lauf durch den Weltraum letzten Endes abhängig von den Himmelskörpern. Lichtstrahlen, die knapp an einem Fixstern, z. B. an der Sonne, vorbeilaufen, werden, wie man es bei Sonnenfinsternissen tatsächlich beobachtet hat, gekrümmt wie die Bahn eines Kometen oder Meteors, der an der Sonne vorbeifliegt. Das beweist, daß in der Umgebung eines Fixsternes dieser in erster Linie selbst die Struktur des realen Raumes, der zugleich das Medium der elektromagnetischen Welle ist, bestimmt und daß also der Lichtäther von einem Himmelskörper in seiner unmittelbaren Umgebung gewissermaßen mitgenommen wird. Damit wird auch der negative Ausfall des Michelson-Versuches verständlich, ohne daß man zur idealistischen Deutung greifen muß. Wie die Schallwellen bei Windstille sich nach allen Richtungen gleich schnell ausbreiten, weil die Luft von der Erde mitgenommen wird, so auch die Lichtwellen, weil der Äther in unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche von der Erde mitgenommen wird, so daß hier kein „Ätherwind“ nachweisbar ist. (Man müßte den Michelson-Versuch in einem Flugzeug mit verschwindender Masse, das sich sehr schnell durch den Erdäther bewegt, anstellen können. Es

gibt aber einen anderen Versuch, der fast dasselbe leistet. Sagnac erzeugte die hohe Geschwindigkeit gegen den Erdäther durch schnelle Rotation und erhielt tatsächlich einen positiven Effekt.)

Damit ist folgende anschauliche Deutung des Michelson-Versuches möglich. Wenn man auf irgendeinem Himmelskörper Lichtsignale aussendet, so laufen sie nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit davon und bilden nach einiger Zeit eine Kugelwelle. Das gilt aber nur in unmittelbarer Nähe des Himmelskörpers, wo die Raummetrik fast ausschließlich von ihm allein bestimmt wird, und in einem verhältnismäßig kleinen Raumgebiet, in dem ja allein der Versuch angestellt werden kann und wo näherungsweise euklidische Metrik gilt. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Lichtsignale ausbreiten, ist zwar streng genommen auf jedem Himmelskörper verschieden, das hat aber keine unmittelbare physikalische Bedeutung. Sie hängt nämlich davon ab, von welchem System aus sie gemessen wird. Eine Abweichung von c könnte nur derjenige Beobachter feststellen, der die Geschwindigkeit eines Lichtausbreitungsvorganges, der auf irgendeinem Himmelskörper stattfindet, von einem anderen Himmelskörper aus präzise messen könnte. Die praktische Messung vollzieht sich aber meist auf demselben Himmelskörper, wo der Lichtausbreitungsvorgang stattfindet, und eine solche ergibt doch wieder den Wert c . (Streng gesagt: wenn in dem Bereich, in dem die Messung stattfindet, die g_{ik} als konstant angenommen werden können, ergibt sich c , d. i. in hinlänglich kleinen Bereichen oder in masselosen Bezugssystemen, wie sie in der speziellen Relativitätstheorie gedacht werden.)

Trotz dieser Zurücknahme der optischen Deutung durch die allgemeine Theorie, bleibt natürlich in der idealistischen Auffassung doch ein wahrer Kern, sonst könnten ja keine richtigen Ergebnisse herauskommen. In dieser Deutung wird die angenommene reale Lichtwelle in zwei ideale Kugelwellen aufgespalten. In der Wirklichkeit aber sind ja zwei solche Lichtwellen tatsächlich vorhanden, nicht bloß ideale, sondern sogar reale, nämlich eine im Erdäther und eine im Marsäther. Indem Einstein die beiden Bezugssysteme idealisiert, ist es möglich, sie ineinander zu legen, wodurch die realen Lichtwellen in eine einzige zusammenfallen, die sich nur mehr idealiter bei der Bewegung der Systeme zueinander in zwei Kugeln und zwei Zentren aufspalten.

Zum Schluß wäre noch darauf hinzuweisen, daß ganz analog in der relativistisch invariant formulierten Schrödingergleichung die Wellenfunktion Ψ sich in vier Komponenten aufspaltet und daß außerdem auch neue Teilchenpaare auftreten, indem sich also ein reales Wellenzentrum in zwei aufspaltet.

Endlich möchte ich auch noch darauf hinweisen, daß die spezielle Relativitätstheorie bekanntlich unter dem Einfluß der positivistischen Philosophie entstanden ist. Wie man aber sieht, wird auch bei einer ausgesprochen positivistischen Einstellung das Phänomen (der Michelson-Versuch) schon beim ersten Ansatz in bestimmter Weise theoretisch gedeutet und umgedeutet.