

II. SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE

5. Die Axiomatik Einsteins: Gibt es Gleichzeitigkeit?

Die spezielle Relativitätstheorie beruht auf zwei Axiomen: auf der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und dem Relativitätsprinzip. Die aus dem Versuch von Michelson und Morley gefolgerte Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle wie immer bewegten Beobachter, die den Physikern bis dahin als bloße Störung der Beobachtung durch Mitführung des Weltäthers, Kontraktion des Meßarms u. dgl. erschienen war, machte Einstein zum Zentralsatz der Physik. Sie war für ihn keine Störung, sondern der Ausgangspunkt aller physikalischen Erkenntnis. Sie ist die einzige beobachtbare absolute Größe in der Welt. Da nur mit beobachtbaren Größen gerechnet werden soll, sind alle physikalischen Gesetze auf die konstante Lichtgeschwindigkeit abzustellen. Nun kann, bleibt zu bemerken, die konstante Lichtgeschwindigkeit ihre absolute Funktion nur in Verbindung mit einer Relativierung der Raum- und Zeitbegriffe übernehmen. In diesem Sinne ist sie nicht so ganz absolut, auch leidet ihre Beobachtbarkeit, die ohnehin im Michelson-Morley-Experiment nur eine schmale Basis hat, unter dieser Zutat.

Das Relativitätsprinzip

Das Relativitätsprinzip im weiteren Sinne ist das Machsche Prinzip, wonach eine Bewegung im absoluten Raum nicht feststellbar ist; daher darf die Physik nur mit relativen Bewegungen von Körpern rechnen. Bei Einstein folgt aus dem Machschen Prinzip die Gleichberechtigung aller bewegten Systeme, denn wenn sich der Körper A relativ zum Körper B bewegt, so bewegt sich, von A gesehen, auch der Körper B relativ zu A, und man kann sowohl den einen als auch den anderen als Bezugskörper der Bewegung wählen. Wenn Kinder glauben, daß die am fahrenden Zug vorbeiziehenden Telegraphenstangen sich bewegen, ist das nach Born (1964, S. 194) gar nicht so falsch; mathematisch kommt man zu dem gleichen Ergebnis, ob man eine Bewegung des Zugs oder eine Bewegung der Stangen annimmt. Die mathematische Relativität, muß man hinzufügen, schwindet allerdings, wenn man auch qualitative Wesenszüge heranzieht. Dann zeigt sich, daß die Stangen nicht fahren können, der Zug aber fährt. Das Relativitätsprinzip beruht auf der Abstraktion von der Qualität und von den operationellen Definitionen. Es ist rein mathematisch.

Die «kinematische Relativität» hatten u. a. schon Huygens und Leibniz vertreten. Leibniz hatte allerdings hinzugefügt, daß jedem Körper eine eigene «Kraft» zukomme und hierdurch eine Unterscheidung möglich sei. Heute nennt man das die «dynamische» Auffassung. Einstein bleibt bei der rein kinematischen Betrachtung und folgert, daß alle physikalischen Größen vom Bezugssystem abhängen, das die Grundlage ihrer Messung bildet. Den schon bekannten Prinzipien der Reziprozität und Vertauschbarkeit fügt er noch die Relativierung der Raum- und Zeitmaße bei bewegten Systemen hinzu, die aus $c = \text{const}$ folgt.

Das Relativitätsprinzip im engeren Sinne ist das klassische: gleiche physikalische Gesetze in allen gleichförmig und geradlinig bewegten Systemen mit variierenden numerischen Werten. Solche Systeme sind Inertialsysteme, d. h. in ihnen gilt das Trägheitsgesetz von Newton, das 1. Gesetz der Mechanik genannt. Beschleunigt und rotierend bewegte Systeme sind keine Inertialsysteme; mit ihnen beschäftigt sich erst die allgemeine Relativitätstheorie. Einsteins zweites Postulat im engeren Sinne knüpft an das klassische Relativitätsprinzip an.

Die spezielle Relativitätstheorie übernimmt aus der klassischen Physik, ausgesprochen oder stillschweigend, noch einige axiomatische Annahmen, so die Geradlinigkeit der Fortpflanzung des Lichts, die Gültigkeit der euklidischen Geometrie und die Konstanz der elektrischen Ladung in jedem Bewegungszustand.

Damit ist das Programm für die Relativitätstheorie gegeben. Sie will das physikalische Wissen nach einem neuen Prinzip ordnen. Experimentell stützt sie sich zunächst nur auf den Michelson-Morley-Versuch und die scheinbare Massenzunahme des Elektrons bei Bewegung in einem elektromagnetischen Feld. Diesen Experimenten gibt sie eine bestimmte Auslegung. Soweit sich Ausblicke auf neue Phänomene ergeben, werden nachträglich experimentelle Beweise für die neue Theorie gesucht. Das Experiment bleibt aber sekundär. Die Relativitätstheorie ist keine Experimentalphysik. Sie ist ein Versuch, eine neue Physik um eine a priori festgelegte Philosophie herum zu schreiben. Die Relativitätstheorie ist auf Grund der axiomatischen Postulate Einsteins, zum Teil auch Machs (der das gar nicht gerne sah), konstruiert und nur unter diesem Gesichtspunkt zu verstehen.

Was wurde beim Michelson-Morley-Experiment beobachtet?

Für Einstein ist seit dem Experiment von Michelson und Morley die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eine gesicherte Tatsache. Er erhebt sie

ohne Zögern zum Dogma. Infolge der tragenden Rolle, die der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in der Relativitätstheorie zukommt, ist die Frage erörtert worden, ob das Michelson-Morley-Experiment wirklich die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle wie immer bewegten Beobachter in der ganzen Welt erweist. Soweit überhaupt, hat es sie nur für den Bereich der Erde demonstriert.

Aber auch im Erdbereich sind Einwände gegen den aus dem Versuch gezogenen Schluß erhoben worden. Die Schlußfolgerung enthält mehr, als beobachtet wurde. Beobachtet ist das Zusammentreffen zweier Strahlen auf der Platte A, gemessen sind die Längen der beiden Meßstrecken, beobachtet ist das stationäre Interferenzmuster. Alles andere geht über die Beobachtung hinaus (Israel 1931, Törnebohm 1952). Ob das Verhalten der Interferenzstelle ein gleichartiges Verhalten der Lichtfortpflanzungswelle in sich schließt, ist nicht so sicher, wie angenommen wird (Le Roux 1931).

Die Zeiten der Reflexion an den Spiegeln B und C sind ebenso wenig beobachtet worden wie die Reisezeiten der Strahlen zwischen A, B, C und T. Das ist gewiß bei einem so kleinen Apparat nicht möglich; aber es bleibt Tatsache, daß über diese Zeiten keine direkten Messungen, sondern nur Annahmen vorliegen. Die Geschwindigkeiten $c + v$ und $c - v$ beim Hin- und Rückweg sind nicht beobachtet, sondern vorausgesetzt worden. Der Mittelwert für die Gesamtreise des Strahls zwischen A und C ist konstant, aber seine beiden Komponenten sind verschieden. In die Deutung der Unverrückbarkeit des Interferenzmusters gehen hypothetische Voraussetzungen ein. Nimmt man für die Reflexe bzw. Reisezeiten andere Werte an, kommt man zu ganz anderen Ergebnissen (Dingle 1946). Physikalisch betrachtet, erhebt sich schließlich die Frage, ob wir genug von der Natur des Lichts wissen, um den Versuch richtig deuten zu können⁶.

Das Problem der Gleichzeitigkeit

Nach Einstein müssen in einer Physik, die mit konstanter Lichtgeschwindigkeit rechnet, «überkommene Vorurteile über Raum und Zeit» aufgegeben werden. Lorentz hatte mit der Veränderung räumlicher und zeitlicher Maße schon den Weg dazu gewiesen. Er hatte aber ebenso wie Poincaré den absoluten Raum und die absolute Zeit nicht angetastet. Ein-

⁶ Le Roux (1931) meint: «Einstein hat an das Michelson-Morley-Experiment Folgerungen geknüpft, die es nicht wirklich in sich schließt. Hiernach hat er an diese Folgerungen Hypothesen geknüpft, die sich widersprechen und keine Beziehung zu den Phänomenen haben.»

stein tat nun wieder einen radikalen Schritt, offenbar eine der «herrlichen Ideen», von denen er gesprochen hatte. Was bei seinen Vorgängern nur ein Rechenkunststück war, sollte zur Beschreibung der Wirklichkeit werden. Im Einklang mit der positivistischen Philosophie, die er vermutlich nur durch Mach kannte, sagte Einstein, daß Raum und Zeit keine apriorischen Gegebenheiten seien, wie es Newton und Kant gelehrt hatten, sondern der Erfahrung entspringen. Daher müssen sie experimentell definiert werden. Als einziges Mittel der Zeiterfahrung erklärte Einstein die Ablesung von Uhren.

Wenn nur beobachtbare Größen verwendet werden sollen, so ist Zeit nur in einem engen örtlichen Bereich bestimmbar, der die direkte Ableseung einer Uhr gestattet. Jedes System hat nach Einstein nur seine Ortszeit. Von der Zeit im Nachbarsystem hat es zunächst keine unmittelbare Kunde. Wenn zwei Ereignisse in den beiden Systemen als «gleichzeitig» gelten sollen, müssen zunächst die Uhren in beiden Systemen synchronisiert werden. Von Gleichzeitigkeit kann man sprechen, wenn die Zeiger zweier solcher Uhren die gleiche Stellung zeigen. Eine Gleichzeitigkeit zweier entfernter Ereignisse ohne Uhrenablesung anzunehmen, ist nach Einstein unzulässig. Nur am Ort des Beobachters stattfindende Ereignisse sind a priori gleichzeitig.

Uhren-Synchronisierung mit Lichtsignalen

Die Uhren in zwei Nachbarsystemen A und B sind nach Einstein mit Hilfe von Lichtsignalen zu synchronisieren. Er gibt dafür eine genaue Vorschrift. Ein Lichtstrahl wird von A nach B gesandt; dort wird er an einem Spiegel reflektiert und kehrt nach A zurück. Die Zeitdifferenz in A ist nach der Formel $t'_A - t_A = \frac{2 AB}{c}$ zu normen, wo t_A der Zeitpunkt der Aussendung des Signals, t'_A der Zeitpunkt seiner Rückkehr, AB die Entfernung zwischen den beiden Orten und c die Lichtgeschwindigkeit von 300000 km/sek ist. Die Uhr in B ist nach der Gleichung $t'_A - t_B$ einzuregulieren, wo t_B der Zeitpunkt der Ankunft des Signals in B ist. Die Vorschrift beruht auf der Voraussetzung, daß die Lichtgeschwindigkeit auf dem Hin- und Rückweg konstant, d. h. daß sie in allen Richtungen und unabhängig von der Distanz gleich ist.

Wenn die Zeitbeziehung zwischen A und B auf diese Weise hergestellt wird, lugt allerdings die absolute Zeit hervor. Es muß doch von vornherein angenommen werden, daß der Lichtstrahl in B später ankommt, als er von A abgeht. Das folgt auch daraus, daß die Aussendung kausal

für die Reflexion ist; die Ursache liegt vor der Wirkung. Wenn es a priori ein «früher» und ein «später» gibt, ist nicht einzusehen, warum es nicht a priori auch ein «gleichzeitig» geben sollte. Der Lichtstrahl bewegt sich in einem beiden Systemen gemeinsamen Raum und einer beiden gemeinsamen Zeit. Er bewegt sich nach Gesetzen, die in einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit festgestellt wurden. Sonst könnte man gar nicht annehmen, daß er sich geradlinig bewegt, daß der in B reflektierte Strahl wirklich der von A ausgesandte ist und die Geschwindigkeit c besitzt.

Der Lichtsignalvorschlag beruht auf Erfahrungen, die in der absoluten Zeit gewonnen wurden. Er setzt die absolute Zeit voraus und kann keinen neuen Zeitbegriff schaffen⁷. Dieser wird auch überflüssig (Nordenson 1969, S. 38, 43). Hier liegt der Erbfehler der Relativitätstheorie, der sich durch alle ihre Konsequenzen zieht. Es ist Einstein nicht gelungen, die absolute Zeit auszuschalten und eine neue, nur auf unmittelbarer Erfahrung beruhende Zeit zu begründen. Er bittet Kant in einer Tagebuchnotiz, ihm zu verzeihen, daß er die Kantsche Welt zerstört habe. Er hat aber Kant gar nicht begriffen. Kants Satz, daß Erfahrung nur in einem vorgegebenen Rahmen von Raum und Zeit stattfinden kann, wird gerade von Einsteins Meßvorschrift bestätigt.

Das erste Gedankenexperiment Einsteins (praktisch ist es nie durchgeführt worden) beruht also auf einem logischen Fehler, sogar einem recht primitiven. Einstein bemerkt ihn nicht, wie er noch viele logische Fehler nicht bemerken wird, und setzt seine Argumentation fort. Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse definiert er dahin, daß die Signale dieser Ereignisse gleichzeitig, d. h. bei einem bestimmten Zeigerstand der Uhr, bei einem Beobachter eintreffen. Für zwei Beobachter bedeutet Gleichzeitigkeit, daß die Zeiger ihrer auf die beschriebene Weise synchronisierten Uhren beim Eintreffen der Signale gleich stehen. Die Signale sind Lichtsignale, manchmal primäre, manchmal reflektierte. Ein Signal braucht eine gewisse, von der Lichtgeschwindigkeit c und der Entfernung bestimmte Zeit, ehe es den Empfänger erreicht. In dieser Zeit durchwandern die Lichtwellen die Strecke zwischen Signalquelle und Empfänger. Bei sehr großen Entfernungen wird diese Zeit erheblich. Zu beachten ist noch, daß sich beide Uhren bei der Synchronisation in Ruhe und nicht etwa in Bewegung befinden.

⁷ Den Lichtsignalvorschlag zur Uhrenregulierung hatte, wie früher erwähnt, schon Poincaré gemacht, aber die absolute Zeit beibehalten.