Wirft die Relativitätstheorie den Ursachsbegriff über Bord?

Von Helge Holst.

(Eingegangen am 5. Dez. 1919.)

In zwei Artikeln in den Verh. d. D. Phys. Ges. (20, 189—201, 1918 und 21, 495—500, 1919) hat J. Petzoldt in überaus klarer und prägnanter Weise einer ausgebreiteten Auffassung von der Relativitätstheorie Ausdruck gegeben. In dem ersten dieser Artikel sagt er u. a., auf die Änderungen der Körperdimensionen und die Dauer der physikalischen Vorgänge, mit denen man in der speziellen Relativitätstheorie rechnen muß, Bezug nehmend: „Damit wird nicht nur der alte Kraft-, sondern auch der Ursachsbegriff überhaupt über Bord geworfen“ (S. 190); an einer anderen Stelle sagt er von den relativ gegeneinander bewegten Beobachtern, welche man in der Theorie berücksichtigen muß, daß jedem von diesen ein eigenes Raum-Zeit-System zukommt, in dem keines der anderen Platz hat, und weiter: „Jeder lebt gewissermaßen in einer eigenen Welt für sich, in einer Art Spinoza-Leibnizscher Monade, die keine Fenster hat“ (S. 191). In dem zweiten Artikel sagt er: „Eine entscheidende Stellung zu der Frage nach den Grundlagen der Relativitätstheorie kann man an der Hand der Alternative gewinnen: ist es möglich durch ein mechanisches Modell das Wesen dieser Theorie zu veranschaulichen, oder nicht?“, und er verneint diese Möglichkeit.

Wenn man davon ausgeht, daß die verschiedenen gegeneinander gleichförmig bewegten Koordinatensysteme, in denen die Beobachter ruhen, physikalisch vollkommen gleich sind, so muß man die genannten Behauptungen zugeben, und unter dieser Voraussetzung läßt sich die Sachlage kaum besser und kürzer charakterisieren, als es J. Petzoldt getan hat. Wenn man die Sache aber im Lichte der allgemeinen Relativitätstheorie betrachtet, wird man meiner Meinung nach finden, daß diese Voraussetzung nicht erfüllt ist.

Wie bekannt, hat man den kausalen Zusammenhang dadurch zu retten versucht, daß man an der Äthertheorie festhält, indem die betreffenden Änderungen dann durch die Bewegung relativ zum Äther als kausal bestimmt aufgefaßt werden, und H. A. Lorentz hat diese Erklärung auf sehr einfache elektrodynamische Annahmen gestützt.

Aber wenn die Lorentz-Theorie auch rein formal die Kausalität retten konnte, schien diese Rettung real nicht viel wert zu sein. Einerseits hat diese Erklärung zur Voraussetzung, daß eins von den gegeneinander bewegten Koordinatensystemen vor den anderen durch Ruhe im Äther bevorzugt ist, andererseits scheint sie aber prinzipiell jedes beobachtbare Kennzeichen der Ruhe oder der Bewegung im Äther auszuschließen. Wenn die Anhänger der Äthertheorie aber zugeben, daß keines der verschiedenen Systeme vor dem anderen durch irgend etwas Beobachtbares ausgezeichnet ist, dann wird es ein unhaltbarer Standpunkt, eine kausale Erklärung auf eine Bevorzugung eines von den Systemen basieren zu wollen. Denn nur was für unsere Beobachtung hervortreten kann, ist real.

Die Äthertheorie scheint also keine Aushilfe von erkenntnistheoretischem Wert zu geben. Der Kern der Sache bleibt die Frage, ob die verschiedenen Koordinatensysteme physikalisch gleichgestellt sind oder nicht. Auf der Beantwortung dieser Frage beruht es, wie oben angedeutet, ob man die kausale Auffassung behaupten kann, und ob es prinzipiell möglich ist, alles Beobachtete raum-zeitlich eindeutig oder, anders ausgedrückt, in ein für alle Beobachter geltendes Weltbild einzuordnen.

Man hat doch, meine ich, diese Frage zu schnell als abgemacht betrachtet, ohne recht die Konsequenzen davon zu berücksichtigen, daß die ursprüngliche Relativitätstheorie von sehr speziellem Charakter war. Die gegeneinander gleichförmig bewegten Koordinatensysteme, welche sie als äquivalent oder für die Beschreibung der physikalischen Vorgänge als gleichberechtigt aufstellt, sind ja, was Einstein „galileische Bezugssysteme“ nennt, d. i. solche, in bezug auf welche das Trägheitsgesetz gültig ist; ich möchte sie lieber als Inertialsysteme bezeichnen.

Bei der Entwicklung seiner allgemeinen Relativitätstheorie hat nun Einstein betont, daß die Sonderstellung der Inertialsysteme einer kausalen Begründung bedarf, und im Anschluß an E. Mach hat er „ferne Massen“ als Träger von prinzipiell beobachtbaren Ursachen zu dem verschiedenen Verhalten der Körper in Inertialsystemen und anderen Koordinatensystemen angegeben (Ann. d. Phys. (4) 49, 772, 1919). Wir treten also nicht in prinzipiellen Gegensatz zu Einstein, wenn wir das kausale Moment hervorziehen und die Weltkörper — die sichtbaren Fixsterne und vielleicht noch fernere und größere Sternensysteme — als für die Inertialsysteme und überhaupt für die physikalischen Vorgänge in unseren Raumgegenden bestimmend ansehen. Wir können sagen, daß die Vorgänge sich in einem von diesen fernen Weltkörpern erzeugten Felde abspielen.

Nach allgemeinem Sprachgebrauch wird der Raum zwischen den begrenzten Stoffabschnitten der Weltkörper als leer bezeichnet. Aber die Stoffabschnitte sind doch selbst nur Felder, und das äußere Feld eines Körpers — welches in der Newtonschen Mechanik nur als durch die Gravitationswirkung charakterisiert betrachtet wurde — ist ein ebenso integrierender Bestandteil des physikalischen Individuums oder Körpers als sein Stoffabschnitt. Man kann sagen, daß jeder Weltkörper, jeder Körper, jedes Atom die ganze Welt erfüllt, aber in solcher Weise, daß sein Feld immer schwächer wird, d. h. daß sein Einfluß auf das physikalische Geschehen immer geringer wird, je größer die Entfernung von dem Stoffabschnitte ist — oder mit anderen Worten, daß „die Intensität des Feldes“ mit der Entfernung von dem Stoffabschnitte abnimmt. Der Unterschied zwischen diesem und dem äußeren Feld kann physikalisch dadurch charakterisiert werden, daß wir in dem Stoffabschnitte mit elektrischen Feldern zu tun haben, indem Atomkerne und Elektronen hier ihren Einfluß je für sich geltend machen, während ihr Einfluß außerhalb der Stoffabschnitte verschmolzen ist; wir wollen deshalb das Feld hier ein Neutralfeld nennen. Wenn man nicht alle Felder „Stoff“ nennen will — was rationell aber unpraktisch sein würde —, gibt es somit keinen anderen Weg als den Einsteinschen: nicht nur Stoff in gewöhnlichem Sinne, sondern jedes elektromagnetische Feld Stoff zu nennen (Ann. 49, 803). Dahingegen ist der in erkenntnistheoretischer Hinsicht tiefgehende Unterschied zwischen gefülltem und leerem Raum der Unterschied zwischen Raum mit Feldern und Raum ohne Felder. In dieser Bedeutung aufgefaßt wird leer nur ein Grenzbegriff; der leere Raum existiert nicht in der Welt, die wir kennen. — Alles dieses steht, glaube ich, eher in Übereinstimmung als in Streit mit den Einsteinschen Gedanken.

Wir wollen jetzt die Sternenwelt als fest betrachten, d. h. wir wollen von den gegenseitigen Bewegungen der Sterne absehen. Wir können uns dann in der Sternenwelt — oder, anders ausgedrückt, in dem von den Sternen erzeugten zusammengesetzten Neutralfelde — ein Koordinatensystem XYZ denken, welches wir als das Ruhekoordinatensystem bezeichnen wollen. An verschiedenen Stellen des Feldes werden Körper, die sich selbst überlassen sind, d. i. Körper, welche von keinen anderen als den felderzeugenden beeinflusst sind, Beschleunigung relativ zur Sternenwelt in verschiedenen Richtungen erfahren. Wir wollen uns aber denken, daß diese Beschleunigung innerhalb einer gewissen Raumgegend R von bedeutender Ausdehnung gleich Null ist; wir sagen dann, daß das Feld in dieser Raumgegend

ein homogenes Neutralfeld ist ¹⁾. Ein Koordinatensystem $X_1 Y_1 Z_1$, das im Neutralfelde ruht, ist dann hier ein Inertialsystem. In bezug auf dieses gilt das Trägheitsgesetz, aber nur innerhalb der betrachteten Raumgegend; es ist also nicht ein allgemeines Gesetz; es ist außerdem nur eine Annäherung, weil wir nicht erwarten können, daß das Feld innerhalb einer Raumgegend endlicher Ausdehnung mehr als annäherungsweise homogen ist. Ein Koordinatensystem $X_2 Y_2 Z_2$, das sich gleichförmig relativ zu $X_1 Y_1 Z_1$ bewegt, ist, nach Newtons Mechanik auch ein Inertialsystem (innerhalb R). Wir wollen das im Neutralfelde ruhende, das primäre Inertialsystem, die bewegten die sekundären Inertialsysteme nennen. — Innerhalb einer anderen Raumgegend R' wollen wir annehmen, daß die Beschleunigung nach Größe und Richtung konstant ist. Wenn wir hier ein Koordinatensystem $X' Y' Z'$ wählen, das in dem Ruhekoordinatensysteme eben diese für das Feld charakteristische Beschleunigung hat, dann wird ein sich selbst überlassener Körper sich in $X' Y' Z'$ gleichförmig und gradlinig bewegen; dieses Koordinatensystem ist folglich ein Inertialsystem. Wir wollen es ein feldakzeleriertes Inertialsystem nennen. Auch unter diesen Systemen wird in einem gewissen Augenblick eins, das primäre System, dadurch bevorzugt sein, daß es die Geschwindigkeit Null im Felde hat; aber es werden wegen der Beschleunigung unablässig neue Systeme sein, die diese Geschwindigkeit bekommen. — Dem speziellen Relativitätsprinzip und Einsteins sogenannter Äquivalenzhypothese zufolge sollen diese verschiedenartigen Inertialsysteme untereinander äquivalent sein. Ein Beobachter in der Raumgegend R' kann deshalb nicht aus den physikalischen Vorgängen, welche sich innerhalb dieser Gegend abspielen, entscheiden, ob das Feld hier homogen ist oder nicht; wir können deshalb das Feld innerhalb R' als ein pseudohomogenes Feld bezeichnen.

Aber obwohl die verschiedenen Inertialsysteme äquivalent sind, können sie doch nicht schlechthin als in physikalischer Hinsicht gleichgestellt angesehen werden. Das primäre Inertialsystem ist tatsächlich vor den sekundären dadurch bevorzugt, daß es relativ zu dem felderzeugenden Systeme — also zu einem Systeme von prinzipiell erkennbaren Körpern, die für den Zustand in der betreffenden Raumgegend

¹⁾ Wir können es auch als ein gravitationsfreies Neutralfeld bezeichnen. Wenn wir im Anschluß an Einstein statt „Neutralfeld“ das Wort „Gravitationsfeld“ benutzen wollen, kommen wir aber hier in Verlegenheit, weil „ein gravitationsfreies Gravitationsfeld“ etwas paradox klingt, und „ein homogenes Gravitationsfeld“ eine ganz andere Bedeutung hat. Unter anderem aus diesem Grunde habe ich das neue Wort Neutralfeld vorgezogen. Es dreht sich aber hier nur um eine sprachliche Zweckmäßigkeitsfrage, nicht um einen realen Gegensatz.

bestimmend sind — in Ruhe ist. Und ebenso unterscheidet sich ein in einem homogenen Neutralfelde gleichförmig bewegtes Inertialsystem von einem in einem pseudohomogenen Neutralfelde feldakzelebrierten Inertialsysteme durch seine Bewegung relativ zu dem felderzeugenden Systeme. Und wenn der Beobachter außerhalb der betreffenden Raumgegend sehen, d. h. Lichtbotschaften von den felderzeugenden Körpern empfangen kann, dann kann er seine Bewegung relativ zu diesen konstatieren.

Von unserer Erde aus können wir ja mittels langfristiger Beobachtungen einigen Aufschluß über die Bewegung des Sonnensystems relativ zu den sichtbaren Sternen erhalten und wenn man sie in dieser Hinsicht als vollgültige Vertreter der ganzen für unsere Raumgegenden bestimmenden felderzeugenden Welt ansehen darf, könnte man auf diesem Weg das primäre Inertialsystem oder, anders ausgedrückt, die Geschwindigkeit der Erde und der irdischen Körper im Neutralfelde bestimmen. Nun können wir wohl nicht davon ausgehen, daß die genannte Voraussetzung richtig ist; daß wir aber nicht alle felderzeugenden Weltkörper beobachten können, liegt nur in der Begrenzung unserer Beobachtungsmittel; und was hier von Belang ist, ist nur, daß es prinzipiell möglich ist, die Bewegung in dem von diesem erzeugten Neutralfelde zu bestimmen. Wenn wir diese Bewegung kennen würden, so könnten wir unter Anwendung der Lorentzschen Theorie — mit dem Neutralfelde anstatt dem Weltäther — die der Geschwindigkeit der betreffenden Körper entsprechenden Verkürzungen und Periodenvergrößerungen bestimmen; jeder Beobachter könnte dann seine Maßstäbe und Uhren für diese korrigieren und mittels dieser Korrekturen eine Raum-Zeit-Einordnung für alle Beobachtungen gewinnen, welche mit der des „primären Beobachters“ übereinstimmen würde. Jeder von den verschiedenen Beobachtern lebt dann aber nicht in einer eigenen Monadenwelt ohne Fenster. Das felderzeugende System — das in der allgemeinen Relativitätstheorie in den Formeln implicite zugegen ist (durch die zehn Komponenten des Gravitationspotentials vertreten), und das in der speziellen nur „unsichtbar“ geworden ist — eröffnet jedem von den Beobachtern Aussicht in die Welten der anderen. Fernerhin ist es prinzipiell möglich, durch ein mechanisches Modell, das auf Relationen zwischen realen Dingen basiert ist, das Geschehen zu veranschaulichen, wenn man das felderzeugende System in das Modell mit hineinzieht. Wenn dieses nicht geschieht, wird jeder Versuch in dieser Richtung, wie J. Petzold hervorgehoben hat, gewissermaßen irreführend; ob die gemachten Versuche doch einen didaktischen Wert haben können, ist

eine Frage, die außerhalb des Bereiches unserer Untersuchung liegt. Was ich hervorzuheben wünsche, ist, daß wenn man das felderzeugende System außer Betracht läßt, man nur „ein losgerissenes Weltstück“ übrig läßt; es ist, meine ich, nicht zulässig, auf einem so schwachen Fundamente tiefgehende erkenntnistheoretische Betrachtungen zu basieren.

Die oben genannte eindeutige Raum-Zeit-Einordnung kann man als kausal bezeichnen, weil sie die Raum-Zeit-Bestimmung auf einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen den Längen der Maßstäbe, bzw. der Periodenlängen der Uhren, und die Relation der Maßstäbe, bzw. der Uhren, zu realen Körpern (und deren physikalischen Eigenschaften) basiert. Sie erfüllt dadurch die Forderung, welche man an eine kausale Beschreibung stellen kann, nämlich daß die Längen von Maßstäben und die Perioden von Uhren nicht als verändert gerechnet werden, ohne daß man etwas Beobachtbares angeben kann (oder wenigstens sucht), welches man für die Änderung verantwortlich machen kann, oder mit anderen Worten als Träger der Ursache dazu ansehen kann. — Wenn jemand die Frage stellen würde, ob die Bewegungen im Neutralfelde wirklich solche Änderungen von Dimensionen und Periodenlängen hervorbringen, so läßt sich darauf antworten, daß wir diese Änderungen in dem nämlichen Sinne wie alle anderen Änderungen von Längen und Zeiten (z. B. Änderungen von Maßstablängen und Uhrperioden durch Druck und Temperatur), welche durch beobachtbare Ursachen bestimmt sind, als wirklich auffassen können; sie sind nicht weniger und nicht mehr real. Wir brauchen gar nicht dem Wort wirklich — ebenso wenig wie dem Wort Ursache — eine transzendente Bedeutung zuzuschreiben. Das, worum es sich handelt, ist in diesem Falle, wie in allen anderen Fällen, nur, ob die Änderungen sich in gesetzmäßige eindeutige Relationen zu beobachtbaren Dingen bringen lassen, oder, anders ausgedrückt, ob sie in einer eindeutigen (d. h. für alle Beobachter geltenden) kausalen Beschreibung ihren Platz finden. Wir können in diesem Zusammenhang daran erinnern, daß wir bei unseren Messungen überhaupt nicht Längen und Zeiten unmittelbar beobachten, sondern, wie Einstein hervorgehoben hat, nur raumzeitliche Koinzidenzen konstatieren.

Im Gegensatz zu der kausalen Einordnung kann man die Einsteinsche Einordnung als definitionsmäßig bezeichnen. Sie hat als Grundlage ihre auf das gewählte Koordinatensystem bezogene Gleichzeitigkeitsdefinition, und weil der Geschwindigkeitsbegriff mit dem Gleichzeitigkeitsbegriff untrennbar verknüpft ist, ist auch die Einsteinsche „Lichtgeschwindigkeit“ nur eine Definitionsgröße in Relation

zu dem zufälligen Koordinatensystem, das an sich nichts mit der Lichtbewegung zu schaffen hat. Da das zufällige Bezugssystem nur teilweise, nämlich als Inertialsystem, gewisse für die Vorgänge bestimmende physikalische Realitäten vertritt, und teilweise ein mathematisches Hilfsmittel ist, kann man sagen, daß die Einsteinsche Lichtgeschwindigkeit nicht — wie die Lichtgeschwindigkeit in dem Ruhekoordinatensystem (d. h. relativ zu dem felderzeugenden System) — eine rein physikalische Größe ist, sondern so zu sagen ein Gemisch von Physik und Mathematik. Es ist daher nicht — wie viele Gegner der Relativitätstheorie meinen — eine Absurdität, daß diese Lichtgeschwindigkeit in den verschiedenen Inertialsystemen dieselbe ist; das steht gar nicht in einem entschiedenen Widerspruch mit der gewöhnlichen Raum- und Zeitauffassung. Das Einsteinsche Einordnungsprinzip steht überhaupt nicht in realem Widerspruch mit dem Kausalen; es kann als eine mathematische Transformation des kausalen betrachtet werden — und noch dazu eine sehr wertvolle Transformation, weil sie große Einfachheit in der Beschreibung mit sich führt.

Aber wenn die Möglichkeit einer kausalen Beschreibung, einer eindeutigen Raum-Zeit-Einordnung und eines mechanischen Modells von dem Geschehen durch das Wesen der Einsteinschen Relativitätstheorie nicht ausgeschlossen wird, kann man doch sagen, daß eine gewisse Verschleierung des Kausalen in ihrem Wesen liegt, weil sie in ihrer Eigenschaft als Äquivalenztheorie vor allen Dingen darauf hinzielt, verschiedene Koordinatensysteme als äquivalent oder für die Beschreibung der physikalischen Vorgänge als gleichberechtigt aufzustellen. Daher steht es einigermaßen im Widerspruch mit dem Zweck der Theorie, oder es liegt wenigstens außerhalb ihres Planes, äußere physikalische Verhältnisse, wodurch die Koordinatensysteme ungleich werden, in volle Beleuchtung zu bringen; sie legt lieber auf die innere phänomenologische Gleichheit Gewicht. Wenn es der Zweck ist, die kausale Seite der Sache zu beleuchten, muß man aber im Gegenteil die physikalischen Verhältnisse hervorziehen, welche gewisse Koordinatensysteme von anderen unterscheiden, die in der Relativitätstheorie mit diesen als äquivalent betrachtet werden. Zum Teil aus eben diesem Grunde wurden im vorhergehenden für die verschiedenen Koordinatensysteme besondere Namen eingeführt, durch welche ihre verschiedene Relation zu der physikalischen Realität, dem felderzeugenden Systeme, gekennzeichnet werden.

Durch die Erkenntnis, daß Einsteins Relativitätstheorie in keinem notwendigen Gegensatz zum Kausalen steht, und daß sie überhaupt in erkenntnistheoretischer Hinsicht weniger revolutionär ist, als im

allgemeinen angenommen wird, wird der physikalische Wert von diesem genialen und überaus bedeutungsvollen Lehrgebäude meiner Meinung nach gar nicht verringert. Ich hoffe vielmehr, daß eine solche Erkenntnis dazu beitragen könne die Mißdeutungen, welche die volle Anerkennung der Lehre von allen Seiten erschwert haben, zu beseitigen.

Ich habe im vorhergehenden wesentlich nur die spezielle Relativitätstheorie besprochen. Ich glaube aber, daß sich die allgemeine Relativitätstheorie zum Kausalen und zu der allgemeinen Raum- und Zeitauffassung in ein analoges Verhältnis bringen läßt, obwohl die Schwierigkeiten den Fragen auf den Grund zu kommen hier bedeutend größer sind. Es würde aber zu weit führen, auf diese Sache näher einzugehen. Ich muß in dieser und anderer Hinsicht auf eine ausführlichere Behandlung des Problems in einer Abhandlung in den Publikationen des „Kgl. danske Vid. Selskab“ hinweisen ¹⁾.

Charlottenlund, Dänemark, Nov. 1919.

¹⁾ Helge Holst: Die kausale Relativitätsforderung und Einsteins Relativitätstheorie. Det kgl. danske Vid. Selskab. Math.-fys. Meddelelser II, 11, 1919.