

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab.  
Mathematisk-fysiske Meddelelser. **II**, 11.

---

DIE KAUSALE  
RELATIVITAETS FORDERUNG  
UND EINSTEINS  
RELATIVITAETSTHEORIE

VON

HELGE HOLST



KØBENHAVN

HOVEDKOMMISSIONÆR: ANDR. FRED. HØST & SØN, KGL. HOF-BOGHANDEL  
BIANCO LUNOS BOGTRYKKERI

1919



## I.

**E**in Hauptgrund für den starken Widerstand, welcher sich wider die Einstein'sche Relativitätstheorie erhoben hat, ist zweifellos darin zu suchen, dass die Aenderungen von den Dimensionen der Körper und der Dauer der physikalischen Prozesse, mit denen man in der Relativitätstheorie rechnen muss, wie es scheint, mit dem Ursachsgesetze unverträglich sind. Die Auffassung, dass es sich hier wirklich um einen unausgleichbaren Gegensatz handelt, wird nicht nur von der grossen Mehrzahl der Gegner gehegt; auch viele Anhänger der Theorie werden zugeben, dass sie nicht die gewöhnlichen kausalen Ansprüche erfüllt. Besonders stark und offen hat sich J. PETZOLDT — ohne deswegen von Einsteins Lehre Abstand zu nehmen — in dieser Richtung in einer Abhandlung über gewisse Seiten der erkenntnistheoretischen Stellung der Relativitätstheorie geäussert (»Ber. der Deutschen Physikal. Ges.« Jahrg. 1918, S. 189); sich auf die erwähnten Aenderungen beziehend sagt er: »Damit wird nicht nur der alte Kraft-, sondern auch der Ursachsbegriff überhaupt über Bord geworfen.«

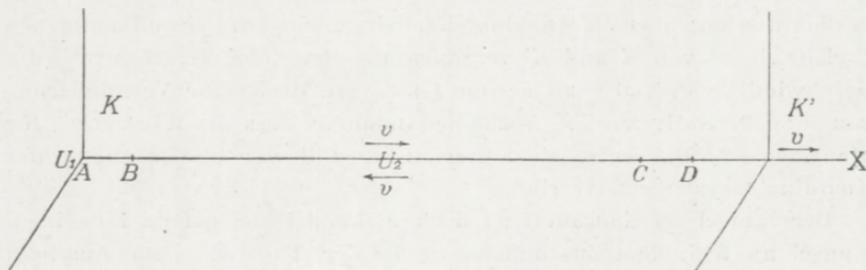
Es lässt sich denn auch nicht leugnen, dass die spezielle Relativitätstheorie, welche für die Stellungnahme der meisten Physiker entscheidend gewesen ist, für sich betrachtet wenigstens scheinbar an einem sehr auffallenden

Mangel an Kausalität leidet, und so lange nur dieser Anfang des imponierenden Gebäudes, das Einstein errichtet hat, bekannt war, mochte es den Anschein haben, dass man nur zwischen den beiden Alternativen zu wählen habe: entweder das alte Kausalitätsprinzip aufzugeben, oder das neue und überaus fruchtbare von Einstein aufgestellte Relativitätsprinzip zu verwerfen. Wenn man — wie einige Anhänger der Relativitätstheorie es tun — sagen würde, dass die Bewegung eines materiellen Systems relativ zum Beobachter Ursache zu Aenderungen der Länge von Massstäben und des Ganges von Uhren in dem Systeme ist, dann würde man jedenfalls das Wort *Ursache* in einem ganz anderen Sinne anwenden als in demjenigen, worin wir bisher den Begriff *einer physikalischen Ursache* auffassten. Denn was hier bei dem Beobachter für die Aenderungen in dem bewegten System bestimmend ist, ist doch eben nur die Eigenschaft, dass er Beobachter ist — also etwas Mentales — und durchaus nicht seine physikalischen Eigenschaften. Die Aenderungen sind ja nicht von seiner Masse, seiner Entfernung von dem Systeme oder dergleichen abhängig; seine Masse kann so gering, seine Entfernung so gross sein, dass er physikalisch als eine »*quantité négligeable*« angesehen werden muss. Die gewöhnliche kausale Auffassung lässt sich auch nicht dadurch retten, dass man die Aenderungen als blossen Schein — etwas, das nur für den betreffenden Beobachter existiert — betrachtet. Dass dies nicht angeht, wird besonders klar durch das bekannte Beispiel mit zwei Uhren, die sich zu Anfang beide an derselben Stelle in Ruhe relativ zueinander befinden und dann genau denselben Gang und Stand haben, aber, nachdem die eine Uhr eine Reise ausgeführt hat und in die ursprüngliche Ruhestellung zurückgekehrt ist, einen ver-

schiedenen Stand aufweisen. Hier tritt das Resultat des Vorganges in der verlaufenen Zeit als ein realer Unterschied zwischen den beiden Uhren hervor — ein Unterschied, der von jedem Beobachter erkannt werden kann — und es geht hieraus hervor, dass wenigstens die eine von den Uhren eine reale Veränderung erfahren hat. Auch die realen Einwirkungen, welche in Wirksamkeit treten müssen, um die Geschwindigkeit eines Körpers relativ zu einem von »den berechtigten Koordinatensystemen« der speziellen Relativitätstheorie zu verändern, vermögen keine befriedigende kausale Erklärung des auftretenden Unterschiedes zwischen den beiden Uhren zu liefern, wenn die verschiedenen berechtigten Koordinatensysteme als vollkommen gleichgestellt betrachtet werden sollen.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dies wird aus folgenden Betrachtungen hervorgehen:

$K$  sei ein »berechtigtes galileisches Koordinatensystem: d. i. ein solches, relativ zu welchem isolierte Körper sich gleichförmig und geradlinig bewegen, und  $K'$  ein anderes berechtigtes Koordinatensystem, das relativ zu  $K$  sich mit der Geschwindigkeit  $v$  im Sinne der positiven X-Achse (nach rechts) bewegt. Bei  $A$  befinden sich, ruhend in  $K$ , zwei Uhren  $U_1$  og  $U_2$ , desselben Ganges und Standes. Jetzt wird  $U_2$  durch eine äussere



Kraft nach rechts beschleunigt, bis sie in  $B$  die Geschwindigkeit  $v$  erreicht hat. Mit dieser Geschwindigkeit (folglich in  $K'$  ruhend) bewegt sie sich von  $B$  bis  $C$ . Eine äussere Kraft in der negativen Richtung setzt nun erst die Geschwindigkeit auf 0 herab (in  $D$ ) und danach wieder herauf auf  $v$  nach links (in  $C$ ). Sie geht mit dieser Geschwindigkeit zurück nach  $B$ , wonach eine äussere Kraft die Geschwindigkeit herabsetzt, bis sie in  $A$  wieder den Wert 0 erreicht hat; und man wird dann finden,

Viele Forscher haben jedoch versucht, die Annahme von Einsteins Lehre als gemeingültiges phänomenologisches Prinzip mit der kausalen Auffassung zu vereinbaren, indem sie am Weltäther als Erklärungsgrund festhielten und mit FITZGERALD und H. A. LORENTZ annahmen, dass durch die Bewegung relativ zum Aether eine Kontraktion in der Bewegungsrichtung hervorgebracht werde. Und nachdem Lorentz gezeigt hatte, dass eine sehr einfache Hypothese von der Natur der Kräfte zwischen den Teilen der Körper

dass  $U_2$  jetzt relativ zu  $U_1$  zurückgeblieben ist, dass sie aber den nämlichen Gang wie diese hat.

In den Akzelerationsperioden könnte man sich den Gang der Uhr auf verschiedene Weise geändert vorstellen:

1. Der Gang wird nur momentan geändert, d. h. er ist nur während der Akzelerationsperiode geändert. — Diese Annahme kann nicht richtig sein, da die schliessliche Aenderung im Stande der Uhr mit der Dauer der Reise wächst.

2. Jede Geschwindigkeitsänderung gibt eine dauernde Vergrößerung der Uhrperiode. — Auch unannehmbar; denn wenn es so wäre, müsste die Uhr schliesslich langsamer gehen.

3. Eine Vergrößerung der Geschwindigkeit relativ zu  $K$  von 0 zu  $v$  vergrößert die Uhrperiode dauernd, und eine Verminderung der Geschwindigkeit von  $v$  zu 0 vermindert die Uhrperiode in demselben Verhältnis. — Dadurch könnte die schliessliche 'Standänderung wohl erklärt werden; aber die Annahme lässt sich nicht mit der vollkommenen Gleichstellung von  $K$  und  $K'$  vereinbaren. Denn eine Vergrößerung der Geschwindigkeit relativ zu  $K$  von 0 zu  $v$  ist doch eine Verminderung von  $v$  zu 0 relativ zu  $K'$ . (Auch die Annahme, dass die Richtung für die Gangänderung entscheidend sei, wäre mit der Gleichstellung der Koordinatensysteme unvereinbar).

Der Mangel an Kausalität ist doch nicht gleichbedeutend mit einem Mangel an logischem Zusammenhang in der Theorie. Dem Anschein nach entsteht wohl ein Selbstwiderspruch dadurch, dass ein mit der Uhr  $U_2$  folgender Beobachter während der gleichförmigen Bewegung stets finden wird, dass  $U_1$  langsamer geht als  $U_2$ , und nichts desto weniger schliesslich — gleichgültig wie lange die Reise gedauert hat — erkennen wird, dass  $U_2$  zurückgeblieben ist. Dieser scheinbare Selbstwiderspruch lässt sich doch durch Betrachtung der Verhältnisse in den Akzelerationsperioden auflösen (siehe z. B. »H. A. LORENTZ: Das Relativitätsprinzip«, 1914, S. 47).

und dem Verhalten der Elektronen bei Bewegungen im Aether die Aethertheorie mit Einsteins Lehre in Uebereinstimmung zu bringen vermochte, konnte man meinen, dass die Sache in Ordnung sei.

Dem Einwand, dass die Lorentz'schen Annahmen einen willkürlichen, nur für den Fall erfundenen Ausweg bezeichnen, kann man kein grosses Gewicht zuschreiben. Denn bei unserem Suchen nach Gesetzen, durch welche wir von dem kausalen Zusammenhang Rechenschaft ablegen können, müssen wir uns überhaupt von dem Vorliegenden leiten lassen, und wenn wir dann durch einfache Annahmen dieses Ziel erreichen, fühlen wir uns befriedigt. Der wirkliche Mangel, welcher dem Lorentz'schen Ausweg anhaftet, liegt an einer ganz anderen Stelle, nämlich in ernsthaften Schwächen des angewandten Erklärungsgrundes — des Weltäthers — selbst. Die Einführung dieses Mediums als physikalische Ursache war überhaupt ein bedenklicher Schritt von dem natürlichen Wege ab, auf dem wir den Ursachen nachspüren, und die negativen Ergebnisse der vielen Versuche, dem Aether bestimmte stoffliche Eigenschaften zuzuschreiben, mussten ihn als reale physikalische Ursache allmählich mehr und mehr verdächtig machen. Die Realität der Körper, welche wir sonst als Ursachen einführen, erkennen wir daran, dass das Betragen anderer Körper in gesetzmässiger Weise von ihren Lagen und Bewegungen relativ zu gewissen Raumabschnitten, die dadurch von der Umgebung unterscheidbar werden, abhängig sind. Selbst für die Luft, deren Unscheinbarkeit und Homogenität oft mit denen des Aethers zusammengestellt werden, haben wir Realitätskriterien dieser Art. Schon bei den gröberen Beobachtungen finden wir verschiedene Stellen einer Luftmasse durch verschiedene Dichte u. a. m.

voneinander gekennzeichnet; und ein tieferes Eindringen in die physikalischen Vorgänge hat uns gelehrt, dass die Luft aus kleinen, individuellen Raumabschnitten, den Molekülen, besteht, die wir als Träger der physikalischen Ursachen aller von der Luft ausgeübten Wirkungen ansehen müssen. Aber was den Aether betrifft, so hatte man hier kein Anzeichen einer solchen Individualisierung gefunden; er figurierte in der Physik nur als ein unterschiedsloses Kontinuum. Man kann sagen, dass er eigentlich nur als ein Name eines Weltkoordinatensystems angewandt wurde, auf das man die Bewegungen des Lichtes und der Elektronen bezog, dass man aber keine reale, für die Beobachtung zugängliche Bezugspunkte für die Bewegungen gefunden hatte. Schon hierdurch musste Zweifel daran entstehen, ob in der Tat solch ein besonderes Medium existiere. Die negativen Resultate von dem Michelson-Versuch u. a. mussten diesen Zweifel erhärten. Und obgleich die früher erwähnte Lorentz-Hypothese wohl rein formal eine auf dem Weltäther basierte kausale Auffassung der speziellen Relativitätstheorie ermöglichte, kompromittierte sie in der Tat noch ernsthafter den Aether als *vera causa*, weil sie es prinzipiell unmöglich machte, Ruhe und gleichförmige Bewegung in dem Aether durch Beobachtungen voneinander zu unterscheiden. Einerseits hat sie zur Voraussetzung, dass eins von den gegeneinander bewegten Koordinatensystemen der speziellen Relativitätstheorie vor den anderen durch Ruhe im Aether bevorzugt wird, andererseits schliesst sie aber prinzipiell jedes beobachtbare Kennzeichen einer solchen Bevorzugung aus. Es liegt unzweifelhaft an der Erkenntnis dieser Schwäche der Fundamente der Aethertheorie, dass Lorentz sich über die Realität des Aethers sehr vorsichtig ausdrückt; er kann

nicht umhin, sagt er, den Aether als »*endowed with a certain degree of substantiality*« zu betrachten (»H. A. LORENTZ: The Theory of Electrons«, 1909). Und es ist verständlich, dass Einstein und viele mit ihm den Schritt weiter gingen, den Weltäther als ein blosses Phantasieprodukt anzusehen und es als Pseudophysik zu betrachten, wenn man, um den scheinbaren Mangel an Kausalität zu verdecken, dieses Medium als Ursache einführt.

Demungeachtet kann man nicht annehmen, dass Einstein die Anschauung hegt, dass die Relativitätstheorie den Ursachsbegriff über Bord wirft. Bei seiner Begründung der allgemeinen Relativitätstheorie hat er es als einen Mangel an Kausalität sowohl der speziellen Relativitätstheorie als der Newton'schen Mechanik hervorgehoben, dass man »ein reales Etwas« vermisst, worauf man das verschiedene Verhalten der Körper gegenüber den »galileischen Koordinatensystemen« und anderen Koordinatensystemen zurückführen kann (siehe »Ann. d. Physik« 49, 1916 S. 771 und »A. EINSTEIN: Ueber die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie« 2. Aufl. 1917 S. 49). Zur Beleuchtung dieses Mangels benutzt Einstein u. a. ein Beispiel mit zwei frei im Raume schwebenden, relativ zueinander rotierenden flüssigen Körpern, von denen der eine sphärisch, der andere ein Rotationsellipsoid ist. In näherem Anschluss an Newtons bekannte Betrachtungen über die Rotation von mit Wasser gefüllten Eimern wollen wir uns hier lieber zwei solche an dem Nordpole der Erde aufgehängte Eimer denken, den einen in Ruhe relativ zur Erde, den anderen relativ zu dieser um eine vertikale Achse mit dem Uhrzeiger einmal in einem Sternentage rotierend (also in »Rotationsruhe« relativ zu den Fixsternen). In dem zweiten von den Eimern wird die Wasseroberfläche ein Teil einer

Kugelfläche um das Erdzentrum sein, während sie in dem ersten eine gewisse Abflachung haben wird. Nach Newtons Mechanik wird die Abflachung in dem ersten Eimer dadurch erklärt, dass »die Inertie« der Wasserteilchen gewisse Zentrifugaldrücke erzeugt. Aber auf die Frage, warum die Inertie in der relativ zu den Fixsternen, aber nicht in der relativ zur Erde rotierenden Wassermasse diese Wirkung hat, hat man sich gewöhnlich mit der Antwort begnügt, dass die erste »im Raume« rotiert, während die zweite in Rotationsruhe in diesem ist. Hierdurch wird dann Bewegung im Raume oder »absolute Bewegung« als physikalische Ursache eingeführt. Einstein will aber keine absolute Bewegung als *vera causa* annehmen, und in Anschluss an E. MACH (siehe »E. MACH: Die Mechanik in ihrer Entwicklung« 7. Aufl. S. 227) hat er »ferne Massen (und ihre Relativbewegungen gegen die betrachteten Körper)« als »Träger von prinzipiell beobachtbaren Ursachen« zu dem verschiedenen Verhalten der Körper in galileischen und anderen Koordinatensystemen angegeben.

Im Folgenden wollen wir als die kausale Relativitätsforderung die Forderung bezeichnen, dass die Bewegungen oder Lagen, welche wir als bestimmend für die physikalischen Vorgänge annehmen, weder auf den leeren Raum noch auf ein hypothetisches Weltmedium ohne irgend welche für die Beobachtung zugängliche Bezugspunkte bezogen werden dürfen, sondern dass es Bewegungen oder Lagen relativ zu erkennbaren Körpern (d. i. Raumabschnitten, die von der Umgebung unterscheidbar sind) sein müssen — oder, anders ausgedrückt, dass man nur solche Körper als Träger der physikalischen Ursachen ansehen darf.

In den Bezeichnungen »die kausale Relativitätsforderung« und »das spezielle Relativitätsprinzip« wird das Wort

»Relativität« augenscheinlich in wesentlich verschiedenem Sinne benutzt. Durch das spezielle Relativitätsprinzip wird ohne kausale Begründung Aequivalenz (mit Rücksicht auf die Ausdrücke für die physikalischen Gesetze) zwischen gewissen Koordinatensystemen postuliert, und man könnte es darum eigentlich treffender als ein Aequivalenzprinzip oder -postulat bezeichnen; wir wollen es Einsteins erstes Aequivalenzprinzip nennen. Einstein zieht aber aus den oben erwähnten kausalen Betrachtungen die Folgerung, dass »die Gesetze der Physik so beschaffen sein müssen, dass sie in Bezug auf beliebig bewegte Bezugssysteme gelten« (Ann. 49. S. 772). In diesem Satze begegnen die beiden verschiedenen Arten von Relativität, wie es scheint, einander, indem die Kausalitätsforderung zur Aufstellung von einem Aequivalenzsatze führt.

Man könnte hiernach erwarten, dass die Kausalität durch die Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie wieder zu Ehren kommen würde, und dass dann auch die spezielle Relativitätstheorie, die ja eben nur ein spezieller Fall von der allgemeinen ist, in kausaler Beleuchtung hervortreten würde. Ich glaube auch, dass es in der Tat möglich ist, den realen Inhalt der allgemeinen Relativitätstheorie in einem solchen Lichte zu betrachten, dass die Kausalitätsforderung für diese — und somit auch für die spezielle Relativitätstheorie — als erfüllt erscheinen wird. Dass dies in den Einstein'schen Arbeiten nicht klar zu Tage zu kommen scheint, mag u. a. darauf beruhen, dass das erwähnte kausale Argument für Einstein nicht das Hauptargument war. Das Hervorziehen von »dem realen Etwas«, das die Basis einer kausalen Betrachtung bilden muss, scheint bei der Entwicklung der Relativitätstheorie für ihn nicht die Hauptsache gewesen zu sein; man kann

vielmehr sagen, dass im Gegenteil seine Theorie ihrem Wesen zufolge von der Betonung der Kausalität hinwegführt.

Wenn es nun scheint, dass das Einstein'sche Kovarianzprinzip (»Die allgemeinen Naturgesetze sind durch Gleichungen auszudrücken, die für alle Koordinatensysteme gelten« Ann. 49. S. 776) sich aus der kausalen Relativitätsforderung ableiten lässt, so hat es damit seine eigene Bewandnis. Wenn es möglich wäre, für die physikalischen Gesetze solche auf ein gewisses Koordinatensystem bezogenen Ausdrücke aufzustellen, dass sie für alle möglichen gegenseitigen Lagen und Geschwindigkeiten aller in Betracht kommenden Körper gölten, so müssten allerdings der kausalen Relativitätsforderung zufolge diese Ausdrücke von der Wahl des Koordinatensystems unabhängig sein; denn sonst wären nicht nur reale, beobachtbare Dinge, sondern auch Koordinatensysteme für die physikalischen Vorgänge bestimmend. Es liegt aber in der kausalen Relativitätsforderung nichts, was uns sagt, dass dieses überhaupt möglich sein muss; von vorn herein scheint ein Versuch in dieser Richtung im Gegenteil ganz aussichtslos zu sein. Denn wenn auch das Weltgeschehen ein Wechselspiel zwischen individuellen Körpern von nur ganz wenigen (zwei?) Arten ist und der Einfluss von jedem einzelnen auf den Zustand in dem umgebenden Raume einfachen Regeln folgt, muss man doch erwarten, dass die willkürlichen und verschiedenen Relationen von allen einzelnen Körpern zu dem Koordinatensysteme diese Einfachheit ganz verschleiern werden. Die Verhältnisse werden überdies dadurch kompliziert, dass wir nicht die Einflüsse der einzelnen Körper als momentan sich fortpflanzende Fernwirkungen auffassen dürfen.

Dass es trotzdem Einstein gelungen ist, allgemein kovariante Ausdrücke für allgemeine physikalische Gesetze

aufzustellen, muss somit als ein höchst überraschendes Resultat bezeichnet werden. Von entscheidender Bedeutung für diese Leistung sind selbstverständlich die von Einstein angewandten, von jedem früheren Verfahren abweichenden Methoden gewesen. (Einführung von einem nicht-euklidischen Ausdruck für das Linienelement, Anwendung von vierdimensionalen Raum-Zeit-Koordinaten u. s. w.). Aber es kann durchaus nicht als eine notwendige Konsequenz des Kausalitätsprinzips oder überhaupt von erkenntnistheoretischen Betrachtungen angesehen werden, dass man ein solches Resultat erreichen musste, wenn man nur den rechten Weg einschlug; es war zugleich von einer Einfachheit besonderer Art in dem Weltgeschehen bedingt.

Indem Einstein von gewissen bekannten mechanischen und elektrodynamischen Aequivalenzverhältnissen und von der »Gleichheit der trägen und der schweren Masse« ausging, hat er eine solche tiefgehende Einfachheit in den physikalischen Erscheinungen aufgespürt und enthüllt, und in genauer Anknüpfung daran hat er zugleich eine neue fundamentale Methode für die analytische Behandlung der Erscheinungen entwickelt und dadurch neue grosse Möglichkeiten für unser Eindringen in deren Zusammenhang eröffnet. Aber der Umstand, dass das kausale in dem Geschehen in der Relativitätstheorie verschleiert wird, hat die erkenntnistheoretische Seite der Sache in einer für das volle Verständnis und die rechte Beurteilung der Theorie vielleicht nicht fördernden Weise in den Vordergrund gebracht. Durch viele Darstellungen der neuen Lehre bekommt man den Eindruck, dass sie einen entscheidenden erkenntnistheoretischen Bruch mit älteren Anschauungen bezeichnet, und während einige deswegen die Lehre abweisen, gibt

es andere, die eben darin ihre wahre Grösse sehen. Deshalb mag es nützlich sein, die Aufmerksamkeit besonders auf das Kausale zu richten, das unter den mathematischen Transformationen versteckt liegt, und dadurch zu erstreben, nicht den Bruch, sondern die Kontinuität gewahr zu werden.

In dieser Absicht wollen wir im Folgenden untersuchen, zu welchen Konsequenzen wir natürlich geführt werden, wenn wir die Erfüllung der kausalen Relativitätsforderung verlangen, im übrigen aber auf dem alten Grunde verharren. Wir wollen versuchen, nachzuweisen, dass man auf diesem Wege — also ohne die für Einsteins Theorie eigentümlichen Methoden und Annahmen einzuführen — was das Qualitative betrifft, durch einfache Betrachtungen ungezwungen zu mehreren Resultaten der Relativitätstheorie geführt wird, und das zwischen Einsteins Lehre und der älteren Physik kein im Wesen dieser Theorie notwendig begründeter Widerspruch zu bestehen scheint.

## II.

Das Newton'sche Trägheitsgesetz hat nur dann einen bestimmten Sinn, wenn vorausgesetzt wird, dass die Bewegung auf gewisse Koordinatensysteme bezogen wird, die gegeneinander gleichförmige und geradlinige Translation haben. Denn ein Körper, der sich in einem bestimmten Koordinatensysteme gleichförmig und geradlinig bewegt, wird sich in einem anderen, das relativ zu dem ersten eine ungleichförmige Bewegung hat, ungleichförmig bewegen und im allgemeinen eine andere Bahn als eine gerade Linie beschreiben. Einstein nennt die Koordinaten-

systeme, in welchen (d. i. in bezug auf welche) das Trägheits- oder Inertialgesetz gilt, die galileischen; wir wollen sie als die Inertialsysteme bezeichnen. Auf diese soll man sowohl die elektrodynamischen als die mechanischen Gesetze beziehen. Dass das elektrodynamische Bezugssystem (»das Weltätherkoordinatensystem«), auf das die Elektronenbewegungen zu beziehen sind, ein Inertialsystem ist, lässt sich übrigens aus der Annahme des elektrischen Ursprunges der Trägheit ableiten.

Diese Bevorzugung von gewissen Koordinatensystemen lässt sich nur mit der kausalen Relativitätsforderung vereinbaren, wenn sie eine prinzipiell beobachtbare Realität vertreten — z. B. ein System  $X$  von Körpern, die nicht explicite in den Gesetzen vertreten sind, aber für das Geschehen in dem ins Auge gefassten System  $S$  mitbestimmend sind. Die für das System  $S$  geltenden Gesetze können allerdings dann keine allgemeinen sein; man muss annehmen, dass ihre Einfachheit durch eine Einfachheit der Relation von  $S$  zu  $X$  bedingt ist (und dass sie deswegen auch nur mit Annäherung gelten) — z. B. dass  $S$  sich innerhalb einer Raumgegend von kleinen Dimensionen relativ zu seinem Abstand von  $X$  befindet.

Es war bekannt, dass die Newton'schen Inertialsysteme relativ zur Erde rotierten, aber relativ zu einem sehr grossen äusseren Systeme — dem Fixsternensysteme — in Rotationsruhe waren; man meinte aber nur, dass dieses sowie die Inertialsysteme in Rotationsruhe im Raume seien (siehe S. 10). Wenn wir nun Ruhe und Bewegung im Raume als Erklärungsgrund abweisen, liegt die Annahme auf der Hand, dass die Sternenwelt — die sichtbaren Fixsterne und vielleicht noch grössere Sternensysteme — wirklich für die Inertialsysteme bestimmend sind. Ja, es kann

behauptet werden, dass diese (von E. Mach aufgestellte) Annahme die einzig mögliche ist, wenn die kausale Relativitätsforderung erfüllt sein soll und wir bei unserm Suchen nach Ursachen nicht die Grundlage verlassen wollen, die unsere bisherigen Erfahrungen uns gegeben haben, denn wir kennen kein anderes, beobachtbares System, das wir als Erklärungsgrund benutzen können. Es gibt aber auch — ausser dem wichtigen Indizium, das von der Rotationsruhe der Inertialsysteme gegen das sichtbare Sternensystem geliefert wird — andere kräftige Gründe für eine solche Annahme.

Wir wissen, dass die Sterne Weltkörper sind, welche die bekannte Gravitationswirkung ausüben. Aber, wie Einstein hervorgehoben hat, ist »die Gleichheit von der trägen und der schweren Masse«<sup>1</sup> ein sehr kräftiges Argument für einen genauen Zusammenhang zwischen Gravitation und Trägheit und somit für die Annahme, dass die Sterne, indem sie Gravitationswirkung (im gewöhnlichen Sinne) ausüben, auch für die Trägheit Bedeutung haben.

Eine Betrachtung von mehr erkenntnistheoretischer Art hinsichtlich Stoff und Kraftfelder wird uns auch zu dem Gedanken führen, dass die Sternenwelt alle sowohl mechanischen als elektrodynamischen Vorgänge beeinflusst.

Die Tatsache, dass in dem Raume um einen Stern ein Gravitationsfeld existiert, wurde früher gewöhnlich in einer gar zu inhaltlosen und mathematischen Weise aufgefasst.

<sup>1</sup> Man kann sagen, dass das Verhältnis, worauf Einstein mit diesem Ausdrucke hinzielt, nichts anderes ist als die Tatsache, dass alle Körper an demselben Orte immer dieselbe Gravitationsakzeleration erfahren. Dieses kann aber auch so ausgedrückt werden, dass die Gravitationskräfte, welche an einem gewissen Orte auf verschiedene Körper wirken — im Gegensatz zu Kräften anderer Art — immer der trägen Masse der Körper proportional sind.

Die meisten sahen hierin nur einen Ausdruck davon, dass ein Körper hier eine durch die Entfernung des Sternes und eine gewisse denselben charakterisierende Eigenschaft (seine Masse) bestimmte Beschleunigung gegen ihn hat; aber der Raum wurde als »leer« aufgefasst. Viele konnten sich doch nicht mit diesem Gedanken versöhnen; sie fanden es unbegreiflich, dass der Körper den Stern so trotz seiner Entfernung empfinden konnte; sie meinten deshalb, dass ausser dem Sterne und dem Körper ein unbekannter Stoff, ein Medium (der Aether), existieren müsste, welcher den sonst leeren Raum ausfüllte und die Fernwirkung zwischen ihnen vermittelte. Hierdurch könnten dann die sonst unfassbaren »Fernkräfte« erklärt werden. Ganz anders war die Auffassung von den »Berührungskräften«. Wenn ein ausgeworfener Ball von einer Wand angehalten wurde, war dieses verständlich, weil er in einen »stoffgefüllten Raum« eindrang (oder einzudringen versuchte); man fand hier kein besonderes Medium erforderlich, um die Sache verstehen zu können. Diese Vorstellung von unbegreiflichen Fernkräften, die ein besonderes Medium zu ihrer Erklärung erfordern, und begreiflichen, oder wenigstens begreiflicheren Berührungskräften, ist aber nicht nur erkenntnistheoretisch unhaltbar, sondern auch ohne Wurzeln in der gegenwärtigen Physik — was doch nicht verhindert, dass sie noch in grossem Umfang die Auffassung von physikalischen Erscheinungen beeinflusst.

Dasjenige, worin »der Ball« eindringen will, ist in der Tat nichts anderes als die eigentümlichen Kraftfelder ganz dicht an den Atomen und in ihrem Innern (d. i. in Entfernungen von ihren Kernen und Elektronen, die von einer mit den gegenseitigen Entfernungen zwischen diesen vergleichbaren Grössenordnung sind), und innerhalb dieser

Kraftfelder variiert die Kraft kontinuierlich wie in den Gravitationsfeldern der Weltkörper. Was wir einen Körper oder einen stoffgefüllten Raumabschnitt nennen, ist nur ein Raumabschnitt, der mit einer Sammlung von konzentrierten, von Ort zu Ort stark variierenden Kraftfeldern eigentümlicher Art gefüllt ist; aber der Raum zwischen den Stoffabschnitten der Weltkörper ist ebenso wohl von Kraftfeldern ausgefüllt, wenn diese auch von anderer Art sind. Der Unterschied kann physikalisch dadurch charakterisiert werden, dass wir in den Stoffabschnitten mit elektrischen Feldern zu tun haben, indem Atomkerne und Elektronen hier ihren Einfluss je für sich geltend machen können (siehe die vorhergehende Parenthese), während wir ausserhalb der Stoffabschnitte »Neutralfelder« haben, worin ihr Einfluss verschmolzen ist. Wenn man nicht alle Kraftfelder »Stoff« nennen will — was rationell, aber unpraktisch sein würde — aber doch diesem Begriff eine rationelle Abgrenzung geben will, gibt es somit keinen andern Weg als den Einstein'schen: nicht nur Stoff im gewöhnlichen Sinne, sondern jedes elektromagnetische Feld Stoff zu nennen (Annalen 49. S. 803). Aber der in erkenntnistheoretischer Hinsicht tiefgehende Unterschied zwischen gefülltem und leerem Raum ist der Unterschied zwischen Raum mit Kraftfeldern und Raum ohne Kraftfelder. Eine Unterscheidung, wonach ein Raum als stoffgefüllt betrachtet wird, wenn die Bewegung eines Körpers Widerstand erfährt, aber als leer, wenn dieses nicht der Fall ist, lässt sich nicht rationell aufrechterhalten. In einem von zahlreichen Weltkörpern erzeugten Neutralfeld, wird der Gravitationseinfluss von einigen unter diesen auf die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers eine vergrössernde Wirkung haben, während andere von ihnen entgegengesetzt

wirken. Das Resultat kann entweder eine Vergrösserung oder eine Verminderung sein. In letzterem Falle kann man sagen, dass die Bewegung einen Widerstand erfährt — ebensowohl als wenn die Bewegung in »Stoffgebieten« gehemmt wird. — In der Bedeutung »frei von Kraftfeldern« aufgefasst, wird »leer« nur ein Grenzbegriff; der leere Raum existiert nicht in der Welt, die wir kennen.

Man kann den Tatbestand so ausdrücken, dass ein Weltkörper ein Individuum ist, das aus einem Stoffabschnitte und einem Neutralfelde besteht. Dieses letztere, das sich ins Unendliche erstreckt, ist ein ebenso integrierender Bestandteil von dem Individuum wie der Stoffabschnitt, und es ist darum berechtigt, zu sagen, dass ein Weltkörper (und überhaupt jeder Körper) unendlich gross ist oder die ganze Welt erfüllt, aber in solcher Weise, dass das Feld immer schwächer wird, d. h. sein Einfluss auf das physikalische Geschehen immer geringer wird, je grösser die Entfernung von dem Stoffabschnitte ist — oder, mit andern Worten, dass die Intensität des Feldes mit der Entfernung von dem Stoffabschnitte abnimmt. Ein Weltkörper ist ferner ein zusammengesetztes Individuum, und sowohl sein Stoffabschnitt als sein Neutralfeld sind aus den elektromagnetischen Feldern und den Neutralfeldern zusammengesetzt, aus denen die einzelnen Atome bestehen. Wenn man, obschon die Individuen in dem Sinne, worin wir das Wort hier nehmen, unendlich gross sind, doch von ihren relativen Lagen und Bewegungen sprechen kann, liegt das daran, dass Veränderungen in und Bewegungen von dem kleinen Stoffabschnitt für den Einfluss des ganzen Individuums auf andere Individuen bestimmend sind.

Die Erkenntnis, dass der Raum zwischen den Welt-

körpern von etwas ebenso Realem wie dem, was wir Stoff nennen, erfüllt ist — nämlich dem von den Neutralfeldern von nahen und fernen Weltkörpern erzeugten zusammengesetzten Neutralfeld — kann nicht umhin, unsere Auffassung von den physikalischen Vorgängen im Raume zu beeinflussen. Das Licht z. B. kann als eine periodische, vorschreitende Aenderung in diesem Raumzustande aufgefasst werden, und wir haben darum ebenso wenig Grund, die Existenz eines besonderen, für diesen Zweck erfundenen Mediums anzunehmen, als die Fernkräfte durch eine solche Annahme erklären zu wollen. Die Hypothese von einem besonderen Weltmedium erscheint denn von vorn herein als überflüssig, weil wir dadurch im Verständnis von dem Weltgeschehen um keinen Schritt weiter kommen, als wenn wir die erkennbaren Körper als Träger von allen Ursachen und die durch sie bedingten Raumzustände als für alles Geschehen bestimmend ansehen. Diese Annahme, nach welcher sowohl die elektrodynamischen als die mechanischen Vorgänge, sowohl die Trägheit als die Gravitation, in einer gewissen Raumgegend von diesem realen Raumzustand in der betreffenden Gegend abhängig sind, erscheint dagegen als eine natürliche Hypothese.

Einige könnten vielleicht den Eindruck bekommen, dass man sich durch die hier entwickelte Auffassung in gewissem Masse der alten Vorstellung von unvermittelten Fernwirkungen anschliesst. Das trifft jedoch nicht zu. Teils wird der Begriff »Fernwirkung« eigentlich ausser Rede gestellt dadurch, dass die Individuen je für sich als unendlich gross oder als einen sich über den ganzen Raum erstreckenden Raumzustand darstellend angesehen werden, teils werden weitere Spekulationen darüber, wie das jedem Individuum gehörende Feld zu Stande kommt, durch die

angestellten Betrachtungen nicht ausgeschlossen. Was hier abgelehnt wird, ist ja nur der alte Streit, ob man direkte Fernwirkungen oder Wirkungen durch ein Medium vorziehen will. Die Fernwirkungsfrage hat aber andere Seiten. In realer Hinsicht ist es eine Frage, ob Aenderungen in oder Bewegungen von dem Stoffabschnitte eines Individuums momentan ihren Einfluss über die ganze Welt geltend machen, oder ob die Wirkung sich mit endlicher Geschwindigkeit fortpflanzt. Die letztere mit den modernen Anschauungen übereinstimmende Annahme steht keineswegs mit der entwickelten Auffassung in Widerspruch. In formaler (rechnerischer) Hinsicht ist es eine Frage, ob man in die Formeln der Physik die einzelnen Individuen — durch die Koordinaten ihrer Stoffabschnitte und gewisse Eigenschaftsgrößen (Masse, elektrische Ladungen u. s. w.) charakterisiert — einführen will, oder ob man (wie in Differentialtheorien) Größen, wodurch der von sämtlichen implizierten Individuen bestimmte Zustand in einem gewissen Punkte charakterisiert wird, einführen will.

### III.

Es muss angenommen werden, dass die Beschleunigung, welche die Körper in einem Gravitationsfelde (im alten Sinne)<sup>1</sup> in einer gewissen Richtung erfahren, von einer Ungleichartigkeit der Intensität des Neutralfeldes bedingt ist. Eine solche Ungleichartigkeit hat man in dem Neutralfeld eines jeden Weltkörpers, weil die Intensität des Feldes mit der Entfernung von dem Stoffabschnitte des

<sup>1</sup> Um Zweideutigkeit zu vermeiden, wollen wir das Wort »Gravitationsfeld« nur in dieser Bedeutung benutzen und für den ganzen Zustand die Bezeichnung »Neutralfeld« anwenden.

Weltkörpers abnimmt, und wenn ein Körper an einem gewissen Orte zwischen zwei Weltkörpern keine Beschleunigung gegen den einen oder den anderen von ihnen erfährt, findet dieses Verhältnis seine hinlängliche Erklärung darin, dass die Intensität hier einen Minimalwert hat und deshalb nicht in der einen oder der anderen Richtung zunimmt. Es würde aber unberechtigt sein, daraus zu schliessen, dass die beiden Neutralfelder dann einander aufgehoben haben, so dass der Zustand des Raumes hier der nämliche ist, als wenn sie nicht existierten. Im Gegenteil muss angenommen werden, dass der Einfluss von beiden Weltkörpern zusammen auf Vorgänge, die nicht wie die Beschleunigung von Differenzen in der Intensität bedingt sind, grösser ist als der Einfluss von jedem einzelnen der Weltkörper.

Wenn die einzelnen Weltkörper, die ein zusammengesetztes Neutralfeld bilden, sich relativ zueinander bewegen, wird das Feld in einem Aenderungszustand sein; denn die individuellen Neutralfelder verschieben sich ineinander. Wir wollen aber annehmen, dass man sich immer für einen gewissen Ort und einen gewissen Zeitpunkt ein solches Feld mit Rücksicht auf seinen Einfluss auf die physikalischen Vorgänge durch ein Neutralfeld ohne innere Verschiebungen ersetzt denken kann. Hierin liegt, dass man sich immer ein feldbildendes System, das aus einer Anzahl von relativ zueinander bewegten Weltkörpern besteht, für eine genügend kleine Raumgegend und eine genügend kleine Zeit durch ein System von feldbildenden Körpern in gegenseitiger Ruhe oder mit anderen Worten durch einen einzelnen festen Körper ersetzt denken kann. Wir wollen uns hier damit begnügen, vorauszusetzen, dass es prinzipiell möglich ist, ein solches »Ersatzsystem«

oder einen solchen »Ersatzkörper« durch Anwendung von bestimmten Gesetzen zu bestimmen; was das für Gesetze sind, ist eine Frage, die ausserhalb des Zwecks dieser Abhandlung liegt. Die genannte Voraussetzung ist allerdings eine Hypothese; aber die entgegengesetzte Annahme würde eigentümliche Konsequenzen mit sich führen. Die gegenseitigen Bewegungen der feldbildenden Sterne würden dann nicht nur zeitliche Aenderungen in dem Zustand an verschiedenen Orten verursachen, sondern auch besondere Raumeigenschaften erzeugen, die ganz wegfallen würden, wenn die feldbildenden Sterne in gegenseitiger Ruhe wären. Wir haben aber keinen Erfahrungsgrund, der uns dazu führt, eine solche Komplikation anzunehmen.

Wenn wir die Verhältnisse in unseren Raumgegenden betrachten, so haben wir hier an dem Sonnensysteme ein materielles System  $S$  von sehr geringen Dimensionen relativ zu seinen Entfernungen selbst von den nächsten bedeutenden äusseren Weltkörpern, die das felderzeugende Fixsternensystem  $X$  bilden. Das zusammengesetzte Neutralfeld von diesem System bildet, so zu sagen, eine Atmosphäre, worin das Sonnensystem sich befindet, und alle physikalischen Vorgänge in unseren Raumgegenden werden teils durch die Wechselwirkungen innerhalb des Systems, teils durch diese Atmosphäre bestimmt. Da die relativen Bewegungen, welche die Fixsterne selbst in langen Zeiträumen ausführen, relativ zu den enormen Dimensionen des Fixsternensystems sehr klein sind, kann man sich für die ganze Raumgegend des Sonnensystems das Neutralfeld der Sterne durch einen festen »Sternenkörper« — eine mächtige feste »Welthülle« von Stoff, die das Sonnensystem in grossem Abstände umgibt, erzeugt denken. Ein Koordinatensystem, das im Neutralfelde, d. i. relativ

zu dieser Welthülle, ruht, wollen wir als das »Ruhekoordinatensystem«<sup>1</sup> (mit Rücksicht auf die äussere felderzeugende Welt) für die betreffende Raumgegend bezeichnen. Obgleich es den Einfluss von der ganzen Sternenwelt vertritt, ist es doch kein Weltkoordinatensystem in universalem Sinne. Es ist wohl das Ruhekoordinatensystem für eine Raumgegend von sehr grosser Ausdehnung, aber entsprechende Ruhekoordinatensysteme für andere, fernere Weltgegenden können sowohl in Rotation als in Translation (gleichförmig oder ungleichförmig) relativ zu dem unsrigen sein.

Es lässt sich denken, dass das von der Sternenwelt gebildete Neutralfeld in unseren Raumgegenden überall die nämliche Feldintensität hätte, oder dass wir uns hier in — wie wir sagen möchten — »einem homogenen Neutralfeld« befänden. Wenn ein sich selbst überlassener Körper in einem solchen Feld in Ruhe wäre, müssen wir annehmen, dass er in Ruhe verbleiben würde, da wir keine Ursache zu einer Aenderung dieses Zustandes sehen können. Das Ruhekoordinatensystem muss dann ein Inertialsystem für die betreffende Gegend sein, vorausgesetzt, dass ein Inertialsystem überhaupt existiert. Dass dieses der Fall ist, kann doch nicht als eine Selbstfolge oder eine Folge der kausalen Relativitätsforderung betrachtet werden. Denn wenn ein Körper, der sich in einem homogenen Felde bewege, immer eine von der Geschwindigkeit abhängige Verzögerung erführe, könnten wir für dieses Verhalten seine Bewegung relativ zu erkennbaren Körpern (den felderzeugenden Ster-

<sup>1</sup> Da die Lage des Anfangspunktes und die Richtung der Achsen in den Koordinatensystemen, von welchen wir im Folgenden reden, für uns von keinem Belang sind, wollen wir alle relativ zueinander ruhenden Koordinatensysteme als ein einzelnes besprechen.

nen) als Ursache oder als bestimmenden Faktor in einer kausalen Beschreibung angeben. — Wenn das Ruhekoordinatensystem ein Inertialsystem ist, muss auch ein jedes relativ dazu gleichförmig und geradlinig bewegtes Koordinatensystem ein Inertialsystem sein. Wir können das im Felde ruhende als »das primäre Inertialsystem«, die anderen als sekundäre Inertialsysteme bezeichnen. Das Feld selbst können wir auch ein »gravitationsfreies Feld« oder ein »Inertialfeld« benennen.

Es ist jedoch eine ganz willkürliche Annahme, dass das Feld der Sternenwelt diese Eigenschaft in unserer Raumgegend besitzt. Es muss angenommen werden, dass die Verteilung der Sterne eine solche ist, dass die Intensität des Feldes in irgend einer Richtung zunimmt, und Körper, die sich selbst überlassen sind, werden dann in dieser Richtung Beschleunigung erfahren. Wegen der grossen Entfernungen der Sterne darf man aber davon ausgehen, dass die Beschleunigung an Grösse und Richtung über eine sehr grosse Raumgegend sehr annäherungsweise dieselbe ist; man kann mit anderen Worten das Feld als »ein homogenes Gravitationsfeld« ansehen. Unter der Voraussetzung, dass Körper jeder Art dieselbe Beschleunigung erfahren, wird dann jeder Körper in einem Koordinatensystem, das in dem Ruhekoordinatensysteme diese für das Feld charakteristische Beschleunigung hat, sich gleichförmig und geradlinig bewegen. Ein solches Koordinatensystem ist folglich ein Inertialsystem. Das heisst, wir können den Schluss ziehen, dass das Trägheitsgesetz für ein solches Koordinatensystem gilt. Dass Inertialsysteme verschiedener Art nicht nur diese Eigenschaft gemeinsam haben, sondern dass alle physikalischen Vorgänge in allen Inertialsystemen genau gleich verlaufen, ist keine notwen-

dige Folgerung; es ist dies eine Annahme, die in Einsteins Aequivalenzprinzipien ausgedrückt ist. Der ganze Inhalt von sowohl dem speziellen Relativitätsprinzip als »der Aequivalenzhypothese« (Einsteins erstem und zweitem Aequivalenzprinzip) lässt sich eben durch den kurzen Satz: »Alle Inertialsysteme sind äquivalent« ausdrücken. — Wir wollen ein Koordinatensystem der genannten Art »ein feldakzeleriertes Inertialsystem« nennen. Auch unter diesen Systemen wird in einem gewissen Augenblick eins, das primäre System, dadurch bevorzugt, dass es die Geschwindigkeit Null im Felde hat; aber es werden wegen der Beschleunigung unablässig neue Systeme sein, die diese Bevorzugung bekommen.

Wir haben hier nur das von der äusseren Sternenwelt gebildete Neutralfeld und das Verhalten von isolierten Körpern in diesem Felde betrachtet. Den Einfluss von den Weltkörpern des Sonnensystems und andere Einwirkungen müsste man dann besonders in Betracht nehmen. Wir können aber wohl in das felderzeugende System die näheren Weltkörper — die Sonne, die Erde und die Planeten — mit aufnehmen. Wegen der grossen Nähe von diesen relativ zu der Sternenwelt in verschiedener Weise bewegten Weltkörpern könnte man vermuten, dass sie bei der Bestimmung von dem festen Ersatzsysteme, das für eine gewisse Raumgegend das felderzeugende System repräsentieren soll, von grossem Belang sein würden, und dass man darum ein Ruhekoordinatensystem nur für eine kleine Raumgegend und eine kleine Zeit festlegen könnte. Wenn wir nur mit der »Fixsternen-Welthülle« und der relativ zu dieser rotierenden Erde zu tun hätten, wäre es augenscheinlich nicht mit der kausalen Relativitätsforderung vereinbar, dass das Ruhekoordinatensystem ganz mit

der Sternenhülle folgte. Wenn diese nicht existierte, würde das ganze Neutralfeld relativ zur Erde ruhen, und wenn sowohl die Sternenhülle als die Erde zu dem Neutralfelde beitragen, muss das Ruhekoordinatensystem um so mehr in der Erdrotation mitfolgen, je näher wir der Erde sind. Aus der Tatsache, dass die irdischen durch Pendelversuche u. dgl. bestimmten Inertialsysteme, soweit sich feststellen lässt, in Rotationsruhe relativ zu dem Fixsternensysteme sind, muss man dann die Folgerung ziehen, dass der Beitrag der Erde zu dem Neutralfelde, selbst in ihrer unmittelbaren Nähe, im Vergleich mit dem Beitrage der Sternenwelt, nur sehr gering ist. Besonders genau ist die erwähnte Bestimmung doch nicht (die Fehlergrenze ist wohl von der Grössenordnung 1<sup>0</sup>/<sub>0</sub>); aber auch andere Gründe sprechen dafür, dass die Intensität von dem Neutralfelde der äusseren Sternenwelt im Vergleich mit den Beiträgen von den Weltkörpern des Sonnensystems überwältigend gross ist, und dass folglich das Mitaufnehmen von diesen in das felderzeugende System das Ruhekoordinatensystem für die verschiedenen Gegenden nur in sehr geringem Grade zu ändern vermag. Etwas anderes ist es, dass die kleinen lokalen Variationen, die sie in der überaus grossen Feldintensität erzeugen. Beschleunigungen in verschiedenen Richtungen veranlassen, wodurch wir verschiedene in dem Ruhesystem feldakzelerierte, lokale Inertialsysteme bekommen — z. B. die kleinen irdischen Inertialsysteme, die von frei fallenden Körpern repräsentiert werden. (Ein freifallender Elevator mit Inhalt ist ein materielles System S, für welches das Trägheitsgesetz in bezug auf ein relativ zu dem Elevator ruhendes Koordinatensystem gilt.)

Bisher haben wir nur die Konsequenzen betrachtet,

welche die kausale Relativitätsforderung mit sich führt mit Rücksicht auf die Auffassung von den physikalisch bevorzugten Koordinatensystemen, auf welche wir die Bewegungen beziehen müssen, um einfache Ausdrücke für die Bewegungsgesetze zu bekommen. Jetzt wollen wir auch einige Konsequenzen anderer Art betrachten, wobei wir der Einfachheit halber vorläufig nur an die Verhältnisse in homogenen Neutralfeldern denken.

Wenn wir das von den Weltkörpern erzeugte Neutralfeld an die Stelle des frühern Weltäthers setzen, können wir die Lorentz'sche Elektrodynamik für eine Gegend mit homogenem Neutralfeld anwenden. Elektronen, die im Felde (d. i. in dem Ruhekoordinatensystem) ruhen, werden nur ein elektrostatisches Feld bilden. Durch ihre Bewegungen in dem Neutralfelde werden magnetische Felder erzeugt, und durch die dazu erforderliche Energie wird die Trägheit in der bekannten Weise erklärt. Aber wenn wir annehmen, dass es die Bewegung im Neutralfelde ist, die für diese Wirkungen bestimmend ist, so muss man erwarten, dass letztere von der Intensität des Feldes abhängig sind und mit dieser abnehmen. In einem leeren (feldfreien) Raum kann die Bewegung kein magnetisches Feld erzeugen; die Masse eines Körpers sollte dann gleich 0 sein und somit seine Bewegung eine unbestimmte werden. Diese Konsequenz geht auch direkt aus der kausalen Relativitätsforderung hervor, und es kann nicht wundern, dass man zu absurden Resultaten kommt, wenn man sich einen Leerheitszustand vorstellt, welcher nur ein Grenzbe-  
griff, kein realer, physikalischer Zustand ist.

Wenn sowohl die Kräfte zwischen den Körperteilen wie die Massen von elektrischer Natur sind, muss man erwarten, dass sowohl die Dimensionen fester Körper als

die Periodenlängen von periodischen Systemen mit der Intensität des Feldes variieren. Die Kontraktionen in der Bewegungsrichtung, welche Lorentz aus der Annahme von der elektrischen Natur der innern Kräfte hergeleitet hat, müssen ebenso mit der Feldintensität variieren; wenn diese sich 0 nähert, müssen die Verkürzungen sich auch dieser Grenze nähern; der Zusammenziehungsfaktor muss sich also 1 nähern.

Was das Licht betrifft, so können wir dieses nicht gut als eine periodische, vorschreitende Zustandsänderung in dem Neutralfelde ansehen, ohne dann auch anzunehmen, dass die Lichtbewegung in mehreren Weisen von dem Zustand des Feldes abhängt. Man muss es von vorn herein als im höchsten Grade wahrscheinlich ansehen, dass das Licht sich nur in einem homogenen Neutralfelde gleichförmig und geradlinig bewegt, dass es aber in Neutralfeldern mit variierender Intensität variierende Geschwindigkeit und Richtung hat. Ob die Geschwindigkeit abnehmen oder zunehmen wird, wenn die Intensität abnimmt, darüber lässt sich kaum unmittelbar irgend etwas schliessen; wir können aber das, was früher von dem Lorentz'schen Zusammenziehungsfaktor gesagt wurde, benutzen.

Dieser ist, wie bekannt,  $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ , wo  $v$  und  $c$  beziehungsweise die Geschwindigkeit des Körpers und des Lichtes sind; wenn dieser Faktor sich 1 für jeden Wert von  $v$  nähern soll, muss  $\frac{v}{c}$  sich 0,  $c$  sich also  $\infty$  nähern. Die

Lichtgeschwindigkeit im Felde sollte also zunehmen und sich  $\infty$  nähern, wenn der Zustand des Raumes sich dem Leerheitszustand nähert. Hieraus folgt, dass ein Weltkörper, der eine lokale Vergrößerung von der Intensität des Feldes

verursacht, bewirken wird, dass vorbeipassierendes Licht eine Krümmung mit der konvexen Seite nach aussen erfährt. Wenn man diese — von Einstein aus der Äquivalenzhypothese hergeleitete — Krümmung bisher nicht wahrgenommen hat, so ist dies wieder ein Zeugnis davon, dass der Beitrag, welchen selbst ein Weltkörper wie die Sonne zum Neutralfelde gibt, gegen den der Sternenwelt sehr gering werden muss, wenn die ganze Betrachtung mit den Beobachtungen stimmen soll.

Dass auch die Bahnen, welche die Weltkörper des Sonnensystems beschreiben, von den Variationen des Feldes einigermaßen beeinflusst werden müssen, folgt schon daraus, dass die Ruhe- und Inertialsysteme eine gewisse Störung erfahren. Kleine Abweichungen von den Newton'schen Gesetzen müssen also erwartet werden.

Im Vorhergehenden wurde vorausgesetzt, dass die Bildung der elektromagnetischen Felder in einem homogenen Neutralfelde stattfindet. In der Tat haben wir jedoch in den Gravitationsfeldern die elektrodynamischen Gesetze kennen gelernt, und man kann deshalb nicht annehmen, dass die Homogenität des Feldes entscheidend ist. Wenn wir aber fortwährend voraussetzen, dass es die Geschwindigkeit der Elektronen im Neutralfelde ist, die für die Magnetfelder bestimmend ist, und wir davon ausgehen, dass das Gravitationsfeld bei einem freien Fall die zu ihrer Erzeugung erforderliche Energie leistet, sind wir dadurch im wesentlichen zu dem früheren Fall zurückgeführt worden, da eine allen Teilen eines materiellen Systems gemeinsame Geschwindigkeit der Lorentz-Hypothese zufolge nicht in den Vorgängen innerhalb des Systems hervortreten soll. In einem Koordinatensysteme, das die nämliche Beschleunigung wie die frei fallenden Körper hat (ein

feldakzeleriertes Inertialsystem) werden dann die physikalischen Vorgänge trotz der zunehmenden Geschwindigkeit im Neutralfelde annäherungsweise in gleicher Weise wie in einem Inertialsystem in dem homogenen Feld verlaufen, wenn die allmähliche Vergrößerung der Feldintensität so klein ist, dass die davon herrührende Komplikation die Erscheinungen nicht merkbar beeinflussen kann. Dass diese Gleichheit mehr als eine Annäherung ist (wie aus Einsteins Theorie folgt), kann doch weder aus der kausalen Relativitätsforderung noch aus der Lorentz-Hypothese gefolgert werden.

Als wir das besondere Aethermedium und »den absoluten Raum« als physikalische Ursachen aufgaben und statt derselben das reale Feld, das im Raume zwischen den Weltkörpern existiert, einführten, wurden wir durch eine Reihe von Betrachtungen — welche sich uns fast mit Notwendigkeit aufdrängen, wenn wir uns auf den Standpunkt der kausalen Relativitätsforderung stellen — zur Annahme von Variationen (in Masstäben, Uhren, Lichtgeschwindigkeit, Massen u. a. m.) von derselben Art geführt wie die Variationen, die Einstein von seinen Aequivalenzprinzipien (oder wenigstens hauptsächlich von diesen) abgeleitet hat. An den Aequivalenzprinzipien hatte Einstein aber Leitregeln zum Ausfinden vom quantitativen Resultaten in betreff der Variationen. Solche Resultate können selbstverständlich nicht von kausalen Betrachtungen allein geleistet werden. Damit soll doch nicht gesagt sein, dass die gewöhnlichen induktiv-deduktiven Wege der Physik auf kausaler Grundlage in diesen Gebieten überhaupt nicht fahrbar sind.

Die Annahme, dass die Felder der Weltkörper nicht nur für die Gravitation (im alten Sinne), sondern für andere

Vorgänge im Raume bestimmend sind, kann selbstverständlich nur als eine Hypothese betrachtet werden, so lange nicht durch Beobachtungen gezeigt worden ist, dass Variationen in diesen Vorgängen wirklich der stellenweisen und ungleichen Verteilung der Weltkörper im Raum entsprechen. Es muss aber hervorgehoben werden, dass diese »Neutralfeldhypothese« einen allgemeineren Charakter hat als Einsteins Relativitätstheorie oder Aequivalenzhypothese. Eben weil diese ganz bestimmte quantitative Relationen mit sich führt, würde sie durch davon abweichende Ergebnisse hinfällig werden. Die mehr allgemeine Hypothese könnte mehr vertragen. Namentlich könnten rein negative Resultate des Suchens nach solchen Variationen nicht als Gegenbeweis dienen. Die Lichtkrümmungen und Spektralschiebungen z. B., welche die Sonne hervorbringen sollte, könnten vielleicht so klein sein, dass es ganz unmöglich wäre, sie mit den feinsten Beobachtungsmitteln der Gegenwart nachzuweisen. Von vorn herein können wir nämlich nicht wissen, ob die Intensität des von der genannten Sternenwelt erzeugten Neutralfeldes nicht so überwältigend ist, dass der Sondereinfluss der Erde, der Sonne oder anderer Weltkörper, für welche Untersuchungen in dieser Richtung sich überhaupt anstellen lassen, ein ganz unmerklicher ist. Selbst wenn es so wäre, dass die Beobachtung uns keine Stütze für die Hypothese gäbe, wäre es doch vorzuziehen, die realen Körper im Weltraume als die erforderlichen Ursachen anzusehen, anstatt ein besonderes, unbeobachtbares Weltmedium dazu zu erfinden. Die Ergebnisse und Verheissungen der Einstein'schen Theorie machten es aber wahrscheinlich, dass die Neutralfeldhypothese in dem Realen eine sehr solide Verankerung finden wird.

Was speziell die Perioden der von den Atomen ausgesandten Lichtschwingungen betrifft, so muss erkannt werden, dass man nicht aus der Neutralfeldhypothese ohne weiteres schliessen kann, dass sie mit der Feldintensität variieren müssen. Die Möglichkeit lässt sich nicht von vorn herein abweisen, dass die Quantenphänomene, welche man nicht aus der klassischen Elektrodynamik ableiten kann, in dieser Hinsicht eine Ausnahmestellung einnehmen. Wenn man Lichtkrümmungen und Abweichungen von den Newton'schen Gesetzen findet, welche mit der Einstein'schen Relativitätstheorie übereinstimmen, wird man deshalb wohl solche Ergebnisse als Bestätigungen der Neutralfeldhypothese ansehen können, wenn auch durch Beobachtungen bewiesen würde, dass die Einstein'schen Spectralverschiebungen nicht stattfinden. Entscheidende negative Ergebnisse in dieser Hinsicht würden dagegen für das grundwesentliche der Einstein'schen Relativitätstheorie ein ernsthafter Schlag sein. Es ist Grund dazu vorhanden, diese Sache zu berühren, da gewisse Beobachtungen über das Sonnenspektrum, wie es scheint, mit Einsteins Theorie von den Spectralverschiebungen unvereinbar sind (C. E. ST. JOHN; »Astrophysical Journal« Vol. 46 S. 249). A. S. EDDINGTON sagt hiervon, dass es nutzlos sein würde, den Ernst dieses scheinbaren Bruchs von Einsteins Theorie zu leugnen, dass wir aber vielleicht wegen der Schwierigkeiten der Untersuchungen das Urteil aufschieben dürfen (EDDINGTON: »Report on the Relativity Theory of Gravitation«; The Physical Society, London; S. 57). Diesen Standpunkt einzunehmen, ist unzweifelhaft vorläufig notwendig.

## IV.

Der Umstand, dass es durch die im Vorhergehenden angestellten kausalen Betrachtungen — die übrigens in mehreren Punkten mit gewissen Einstein'schen Betrachtungen zusammenfallen — möglich gemacht wurde, eine Strecke in der nämlichen Richtung vorwärts zu kommen, in der Einstein auf seinen eigenen Wegen so weit gelangt ist, muss die Meinung, dass Einsteins Relativitätstheorie in keinem realen Gegensatz zum Kausalitätsprinzip steht, kräftig erhärten. Wir müssen aber ein wenig näher untersuchen, woran es liegt, dass es aussehen kann, als ob der Gegensatz zugegen wäre.

Von entscheidender Bedeutung in dieser Hinsicht ist es, dass die Relativitätstheorie in ihrer Eigenschaft als Äquivalenztheorie vor allen Dingen darauf hinzielt, verschiedene Koordinatensysteme als äquivalent oder für die Beschreibung der physikalischen Vorgänge gleichberechtigt aufzustellen. Einsteins erstes Äquivalenzprinzip (das spezielle Relativitätsprinzip) stellt verschiedene relativ zueinander gleichförmig bewegte Inertialsysteme als äquivalent, und sein zweites Äquivalenzprinzip (»die Äquivalenzhypothese«) stellt Koordinatensysteme, die in einem gravitationsfreien Felde akzeleriert sind, als äquivalent mit Koordinatensystemen auf, die in einem homogenen Gravitationsfelde ruhen — oder umgekehrt Koordinatensysteme, die in einem Gravitationsfelde feldakzeleriert sind, als äquivalent mit Koordinatensystemen, auf, die in einem gravitationsfreien Felde gleichförmig bewegt sind. Daher steht es einigermaßen in Widerspruch mit dem Zweck der Theorie, oder es liegt wenigstens ausserhalb ihres Planes, äussere physikalische Verhältnisse, welche die Koordinatensysteme ungleich stel-

len können, in volle Beleuchtung zu bringen, anstatt auf die innere phänomenologische Gleichheit Gewicht zu legen. Da es mehr eine formale als eine reale Frage ist, können die Ausdrucksformen grosse Bedeutung erhalten, und es ist unzweifelhaft, dass viele Missverständnisse, viele Desorientierungen in betreff der Relativitätstheorie, nur durch die Darstellungsweise verursacht worden sind. Wenn man z. B. den Ausdruck anwendet, dass ein Gravitationsfeld durch eine Koordinatenwahl »erzeugt« oder »zum Verschwinden gebracht« wird, kann dies als eine Art von Zauberkunst erscheinen, durch die man mittels eines mathematischen Kunstgriffs eine physikalische Verwandlung ausführt, wenn es auch möglich ist, darin nur eine zulässige Gedankenoperation zu sehen.

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 diesen in der Relativitätstheorie äquivalent gesetzt werden. Zum Teil eben aus diesem Grunde wurden im Vorhergehenden für die verschiedenen Koordinatensysteme besondere Namen eingeführt, durch welche ihre verschiedene Relation zu der physikalischen Realität, dem felderzeugenden System, gekennzeichnet wird. Aus dem nämlichen Grunde wird das Wort »Feld« nur als Bezeichnung eines in einer gewissen Raumgegend von einem realen felderzeugenden Systeme erzeugten Zustandes gebraucht werden. Mit den Namen homogenes Neutralfeld, Inertialfeld oder gravitationsfreies Feld bezeichnen wir stets eine andere Realität als ein homogenes Gravitationsfeld. Dies wollen wir auch »ein pseudohomogenes Neutralfeld« nennen, um dadurch gleichzeitig seinem realen Unterschied von und seiner

phänomenologischen Gleichheit mit einem homogenen Neutralfeld einen Ausdruck zu verleihen. In dem homogenen Felde kann man sowohl ruhende oder gleichförmig bewegte Inertialsysteme als akzelerierte »Gravitationssysteme« (d. i. Koordinatensysteme, in bezug auf welche isolierte Körper Beschleunigung haben) und in dem pseudohomogenen sowohl ruhende oder gleichförmig bewegte (oder akzelerierte) Gravitationssysteme als feldakzelerierte Inertialsysteme wählen. Zuzufolge des zweiten Aequivalenzprinzips lassen sich alle physikalischen Vorgänge innerhalb eines materiellen Systems  $S$  in dem ersten Felde und eines materiellen Systems  $S_1$  in dem zweiten Felde in ganz gleicher Weise beschreiben, wenn wir für beide ein Inertialsystem oder für beide ein passendes Gravitationssystem zur Beschreibung wählen; aber wenn wir ausser den Systemen  $S$  und  $S_1$  die felderzeugenden Systeme in die Betrachtung mit hineinziehen, so werden wir erkennen, dass der Unterschied ein durchaus realer ist und u. a. bei der Koordinatenwahl dadurch hervortritt, dass die Inertialsysteme in dem ersten Feld gleichförmig bewegt, in dem zweiten relativ zu dem felderzeugenden Systeme (oder in dessen Neutralfeld) feldakzeleriert sein müssen.

Aber ebenso wenig wie die Koordinatensysteme, welche das zweite Aequivalenzprinzip als äquivalent aufstellen, schlechthin als in physikalischer Hinsicht gleichgestellt angesehen werden können, ebenso wenig ist dies der Fall mit denen, welche das erste als äquivalent aufstellen. Unter den verschiedenen relativ zueinander gleichförmig bewegten Inertialsystemen ist tatsächlich das primäre, das in dem Neutralfelde in Ruhe ist, durch seine besondere Relation zu dem felderzeugenden Systeme — also zu einem Systeme von prinzipiell erkennbaren Körpern, die für den Zustand

in der betreffenden Raumgegend bestimmend sind — vor den übrigen bevorzugt. In der ursprünglichen, speziellen Relativitätstheorie war diese äussere Realität überhaupt nicht ins Auge gefasst; man hatte nur mit den Inertialsystemen selbst zu tun, und sie wurden alle als vollkommen gleichgestellt angesehen. Darum war die Einordnung des Beobachteten (Ereignisse und materielle Punkte) nach Zeit und Raum, welche ein Beobachter in einem von den Systemen unternahm, als vollständig gleichgestellt mit derjenigen anzusehen, die ein Beobachter in jedem andern von den Systemen nach den nämlichen Regeln unternahm, und es wurde als eine tiefgehende erkenntnistheoretische Entdeckung aufgefasst, dass die Urteile der verschiedenen Beobachter über Längen und Zeiten sich nicht vereinbaren liessen. J. Petzoldt hat in seiner früher zitierten Abhandlung ein ausdrucksvolles und treffendes Bild von der scheinbar vorliegenden Situation gegeben, indem er sagt, dass jeder von den relativ zueinander bewegten Beobachtern als eine Monade in seiner eigenen Raum-Zeitwelt lebt, ohne Fenster zu den Welten der andern. Aber 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 andern.

Das felderzeugende System, das aus erkennbaren Körpern besteht, liefert die erforderliche reale Basis für eine kausale Betrachtung von den Aenderungen der festen Körper und der Perioden der periodischen Systeme. Dass eine Geschwindigkeitsvergrösserung im Neutralfelde z. B. stets einen langsameren Gang einer Uhr mit sich führt,

während eine Geschwindigkeitsverminderung im Neutralfelde stets einen schnelleren Gang zur Folge hat (vergl. die Fussnote S. 5), streitet nicht wider die kausale Relativitätsforderung, da es eine gesetzmässige Relation zwischen prinzipiell beobachtbaren Dingen ist. — Es muss hervorgehoben werden, dass für die Grundfrage von der Möglichkeit einer kausalen Klarlegung von den Aenderungen nicht die besondere elektrodynamische Erklärung, sondern nur die Bevorzugung eines von den Inertialsystemen von Belang ist.

Wenn jemand die Frage stellen würde, ob die Bewegungen im Neutralfelde wirklich solche Aenderungen von Dimensionen und Periodenlängen hervorbringen, so lässt sich darauf antworten, dass wir diese Aenderungen in dem nämlichen Sinne wie alle anderen Aenderungen von Längen und Zeiten (z. B. Aenderungen von Masstablängen und Uhrperioden durch Druck und Temperatur), welche durch beobachtbare Ursachen bestimmt sind, als wirklich auffassen können. Wir brauchen gar nicht dem Wort wirklich — ebenso wenig wie dem Wort Ursache — eine gewisse transzendente Bedeutung zuzuschreiben. Das, wovon es sich handelt, ist in diesem Falle, wie in allen anderen Fällen, nur, ob die Aenderungen 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.

Allerdings können wir hier von der Erde aus nicht alle Körper, die das Feld erzeugen, beobachten, aber sie sind

prinzipiell beobachtbar, und einen Teil von ihnen, nämlich die sichtbaren Sterne können wir in der Tat beobachten. Mittels lange Zeiten hindurch fortgesetzter Beobachtungen können wir zudem einigen Aufschluss über die Bewegung des Sonnensystems relativ zu diesen Sternen erlangen, 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; denn das sichtbare Sternensystem ist vielleicht nur ein sehr geringer Teil des ganzen felderzeugenden Systems (in der Tat müssen wir dies annehmen), und es braucht relativ zu dem diesen repräsentierenden »Ersatzkörper« nicht in Ruhe zu sein. Aber 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 könnten, so könnten wir unter Anwendung der Lorentz'schen Theorie — mit dem Neutralfelde anstatt des Weltäthers — die der Geschwindigkeit der betreffenden Körper entsprechenden Verkürzungen und Periodenvergrößerungen bestimmen; jeder Beobachter könnte dann seine Masstäbe und Uhren für diese korrigieren und mittels dieser Korrekturen eine Raum-Zeit-Einordnung von allen Beobachtungen gewinnen, welche mit der des »primären Beobachters« stimmen würde.

Man kann diese Einordnung als kausal bezeichnen, weil sie die Raum-Zeit-Bestimmung auf einem gesetzmässigen Zusammenhang zwischen den Längen der Masstäbe beziehungsweise der Periodenlängen der Uhren und der Rela-

tion der Masstäbe beziehungsweise der Uhren zu realen Körpern (und deren physikalischen Eigenschaften) basiert, während die Einstein'sche Einordnung nicht kausal, sondern definitionsmässig ist. Da Einsteins Gleichzeitigkeitsdefinition sich auf das gewählte Inertialsystem bezieht und der Geschwindigkeitsbegriff mit dem Gleichzeitigkeitsbegriff untrennbar verknüpft ist, wird auch die Einstein'sche »Lichtgeschwindigkeit« nur eine Definitionsgrösse sein, in Relation zu dem zufälligen Inertialsystem, das an sich nichts mit der Lichtbewegung zu schaffen hat. Es ist daher nicht — wie es manchem scheint — eine Absurdität, dass diese Lichtgeschwindigkeit in den verschiedenen Inertialsystemen dieselbe ist; das steht gar nicht, wie gewöhnlich behauptet wird, in einem entscheidenden Widerspruch mit der gewöhnlichen Raum- und Zeitauffassung. Nach dem Einstein'schen Einordnungsprinzip muss man auch die Länge eines Einheitsmasstabes und die Periode einer Normaluhr, welche nebst dem Beobachter in einem gewissen Inertialsysteme ruhen, als unverändert (gleich der Einheit) rechnen, wenn man ihnen und dem Beobachter eine gewisse Geschwindigkeit erteilt und dann ein neues Inertialsystem, in welchem sie jetzt ruhen, wählt; bei der kausalen Einordnung muss man dagegen — wegen der veränderten Geschwindigkeit im Neutralfelde — eine Korrektur einführen. Aber die beiden Einordnungsprinzipien stehen nicht in realem Widerspruch miteinander; das Einstein'sche kann als eine mathematische Transformation von dem kausalen betrachtet werden — und noch dazu eine berechtigte und wertvolle Transformation, weil sie grosse Einfachheit in der Beschreibung mit sich führt.

Es könnte den Anschein haben, dass Einstein selbst der im Vorhergehenden entwickelten Auffassung, nach

welcher das von Massen im Raume erzeugte Feld den früheren Weltäther ersetzt, jetzt nicht fern steht. Wir können in dieser Hinsicht auf einen Artikel von Einstein in »Die Naturwissenschaften«, Jahrg. 1918 S. 697, hinweisen. Er sagt hier u. a., dass man nicht einen Raum ohne Materie (elektromagnetische Felder) als schlechthin leer zu betrachten braucht; nach der allgemeinen Relativitätstheorie hat er physikalische Qualitäten, welche durch die Komponenten des Gravitationspotentials mathematisch charakterisiert sind, und nach dieser Auffassung ist es zulässig, »dass man von einem Aether spricht, dessen Zustand von Punkt zu Punkt stetig variiert«. Und wie früher erwähnt, hat er ferne Massen als die realen Ursachen des Unterschieds zwischen »galileischen« und anderen Koordinatensystemen erkannt. Er zieht aber nicht die, wie mir scheint, unvermeidliche Folgerung, dass sie dann auch die vollkommene Gleichstellung der verschiedenen gegeneinander gleichförmig bewegten Inertialsysteme aufheben. Im Gegenteil scheint es, dass er einem solchen Gedanken gegenüber Front macht. An der zitierten Stelle sagt er u. a.: »Gemäss der speziellen Relativitätstheorie gab es keinen bevorzugten Bewegungszustand mehr; dies bedeutet Leugnung des Aethers im Sinne der früheren Theorien. Denn gab es einen Aether, so musste er in jedem Raum-Zeitpunkt einen bestimmten Bewegungszustand haben, der in der Optik eine Rolle spielen musste. Einen solchen bevorzugten Bewegungszustand aber gibt es nicht, wie die spezielle Relativitätstheorie lehrte, und darum gibt es auch keinen Aether im alten Sinne«. Er warnt zudem ausdrücklich davor, dem »Aether«, welchen er anerkennen kann, »an jeder Stelle eine bestimmte Geschwindigkeit zuzuschreiben«. Insofern dies so zu verstehen ist, dass man nicht dem »Aether«

und dem betrachteten materiellen System eine bestimmte Geschwindigkeit relativ zueinander zuschreiben darf, fordert er, scheint es mir, eben in einem sehr entscheidenden Punkte ohne irgend eine im Wesen der Relativitätstheorie begründete Notwendigkeit das Festhalten an einer akausalen Auffassung. Dass es nicht nur der Gedanke von einem besonderen über die ganze Welt gleichartigen Aethermedium ist, welchen er abweist, geht u. a. aus den (von mir) hervorgehobenen Worten in dem Zitate hervor. Denn die Forderung, dass ein bestimmter Bewegungszustand relativ zu dem Aether eine Rolle in der Optik spielen, oder mit andern Worten in irgend einer Weise in den physikalischen Vorgängen hervortreten muss, fällt, wie es scheint, nicht weg, weil man das Wort Aether im Sinne von dem Neutralfelde in einer Raumgegend, wo dieses homogen (oder pseudohomogen) ist, anwendet. Sie steht unzweifelhaft eher da als ein Ausdruck von Einsteins Auffassung des Verhältnisses zwischen dem Phänomenologischen und dem Realen. Nur was phänomenologisch hervortritt, existiert, könnte man sagen. Wenn die verschiedenen gegeneinander gleichförmig bewegten Inertialsysteme wirklich phänomenologisch äquivalent sind, sollte es dann unberechtigt sein, eine Erklärung oder »kausale Beschreibung« auf einer Bevorzugung von einem unter ihnen zu basieren, und die nämliche Betrachtung könnte man gegenüber dem Verhältnis zwischen felderzeugenden und unakzelerierten Inertialsystemen anstellen. Da es dennoch unzweifelhaft ist, dass gewisse Inertialsysteme sich vor andern durch ihre Relation zu dem felderzeugenden System auszeichnen, scheint es, als ob hier ein Widerspruch zwischen dem Äquivalenzgesichtspunkte und der entwickelten kausalen Betrachtungsweise besteht.

Der Widerspruch löst sich doch auf, wenn man in Betracht zieht, dass sowohl ein homogenes als ein pseudohomogenes Neutralfeld nur ein idealer Grenzfall ist. Es ist zwar richtig, dass die gleichförmige Bewegung von einem sich selbst überlassenen materiellen Systeme in einem homogenen Neutralfelde oder sein freier Fall in einem pseudohomogenen Neutralfelde der Relativitätstheorie zufolge sich an keinen Vorgängen innerhalb der Grenzen des Systems erkennen lässt; aber die Bedingung für das vollkommene Verschwinden von jedem solchen Kriterium der Bewegung ist freilich, dass das Feld in der betreffenden Raumgegend vollkommen homogen oder pseudohomogen ist. In der Tat kann aber diese Bedingung für Raumgegenden von endlicher Ausdehnung nicht erfüllt sein. (Nur für eine infinitesimale Raumgegend kann man durch passende Koordinatenwahl erreichen, dass die Einstein'schen Komponenten des Gravitationspotentials die einem Inertialsysteme entsprechenden speziellen Werte annehmen). Das phänomenologische Kriterium einer Bewegung im »Aether« (d. i. dem Neutralfelde), welches Einstein fordert, ist in der Tat immer zugegen für ein endliches materielles System und bei genügend feinen Beobachtungsmitteln. Dass es an der Grenze verschwindet, d. i., wenn die Dimensionen des materiellen Systems Null werden oder der Raumzustand einen idealen Grenzzustand erreicht, kann man nicht mit Recht als Argument dafür gebrauchen, dass man nicht Bewegung relativ zum Neutralfelde als physikalische Ursache einführen darf. In der Physik wie in der Mathematik darf man nur mit grosser Vorsicht von Idealfällen aus rasonnieren.

Betrachten wir das zu einem einzelnen Weltkörper gehörige Neutralfeld, leuchtet es unmittelbar ein, dass es

nicht homogen sein kann. Wenn wir voraussetzen, dass die Beschleunigung gegen den Weltkörper eine Funktion der Entfernung von seinem Zentrum ist, sieht man, dass das Feld für eine endliche Raumgegend auch nicht pseudohomogen sein kann, denn es ist ja eben die konstante Beschleunigung, die ein pseudohomogenes Neutralfeld oder ein homogenes Gravitationsfeld kennzeichnet. Dagegen könnte es scheinen, dass eine Möglichkeit dafür bestehe, dass eine nicht sphärische Masse ein homogenes oder pseudohomogenes Neutralfeld von endlicher Ausdehnung bilden könne. Wenn die Feldintensität wie das Newton'sche Gravitationspotential bestimmt würde, dann wäre sie ja konstant im Raume innerhalb einer homogenen Kugelschale. In der Tat ist es doch ausgeschlossen, dass ein solcher vollkommen homogener (oder pseudohomogener) Zustand existieren kann, schon weil das Feld von individuellen Körpern — Weltkörpern oder Atomen — erzeugt ist. Hieraus folgt, dass es eine von diesen bestimmte Struktur besitzt, und diese Eigenschaft des »Neutralfeldäthers« ist von grossem Belang mit Rücksicht auf seine erkenntnistheoretische Berechtigung, als Basis für eine kausale Beschreibung des Weltgeschehens zu dienen. Wenn er ein vollkommen unterschiedsloses Kontinuum wäre, könnte man nicht wohl Bewegungen in ihm als wahre physikalische Ursachen der Bildung von magnetischen Feldern, Dimensionsänderungen u. s. w. ansehen. Man könnte allerdings auch in diesem gedachten Falle die Bewegungen relativ zu dem Stoffabschnitte des felderzeugenden Systems als bestimmende Faktoren in die physikalische Beschreibung einführen, und wenn man also die Vorgänge in gesetzmässige Relationen zu beobachtbaren Dingen bringt, hat man die kausale Relativitätsforderung erfüllt, aber man könnte es doch als

eine Rückkehr zu einer Fernwirkungsauffassung schroffer Art bezeichnen, wenn die Eigentümlichkeiten des fernen Systems sich nicht in dem Felde mittels Variationen — wie schwach sie auch wären — in seinem Zustande abspiegelten und jeder kleine endliche Teil des Feldes dadurch ein Abbild der ganzen äusseren Welt würde.

Es liegt Grund vor, hier hervorzuheben, dass der Raumzustand, der mit dem Namen »Neutralfeldäther« bezeichnet wird, ein Kombinationszustand ist, nicht nur in dem Sinne, dass das ganze Neutralfeld aus vielen individuellen Neutralfeldern (denen der einzelnen Atome) zusammengesetzt ist, sondern dass das einzelne Atomneutralfeld für sich als ein Spezialzustand angesehen werden muss, welcher durch spezielle Kombinationen von primitiveren Elementen — den positiven und negativen Grundbestandteilen — zu neutralen Atomen bedingt ist. Wenn es möglich ist, uns alle physikalischen Vorgänge als in dem Neutralfelde verlaufend vorzustellen und in der Relativitätstheorie diesen »Aether« als für »die metrischen Eigenschaften des Raumes« bestimmend aufzufassen, kommt das daher, dass die enorme Menge von neutralem Stoffe im wesentlichen den Charakter des Raumzustandes bestimmt. Denken wir uns aber einen Raum, worin es z. B. nur negative Elektronen gibt, so haben wir hier einen »Aether« ganz anderer Art. Man könnte wohl auch fragen, ob die Abweichungen von der klassischen Elektrodynamik, welche durch die Entwicklung der Atomtheorie zu Tage gebracht sind, vielleicht damit in Zusammenhang ständen, dass »der Aether« im Innern der Atome wegen des überwältigen Einflusses der elektrischen Atombestandteile kein Neutralfeldäther sei. — Wir wollen uns nicht in die Probleme vertiefen, zu denen diese Betrachtungen uns führen könnten; es soll hier nur

betont werden, dass man nicht davon absehen kann, wenn man den mit der Relativitätstheorie verknüpften erkenntnistheoretischen Fragen auf den Grund kommen will.

Wenn ein materielles System von endlicher Ausdehnung sich in einem willkürlich variierenden Neutralfelde bewegt, wird diese Bewegung in Krümmungen von Lichtstrahlen, Spektralverschiebungen bei Vergleichen von Licht aus den verschiedenen Teilen des Systems u. a. m. phänomenologisch hervortreten. In der Relativitätstheorie kann man von allen diesen Verhältnissen Rechenschaft ablegen, indem man den Komponenten des Gravitationspotentials in jedem Raum-Zeitpunkte von dem vierdimensionalen Kontinuum gewisse Werte zuschreibt. Um das Beobachtete eindeutig als Ausdruck eines bestimmten Bewegungszustandes des Systems relativ zu einem Systeme von felderzeugenden Körpern auslegen zu können, muss man aber eine vollkommene Kenntnis der Gesetze besitzen, nach welchen der Zustand des Feldes durch die felderzeugenden Körper bestimmt wird. Denken wir uns einen Beobachter im Besitze einer solchen vollkommenen Kenntnis dieser »Neutralfeldgesetze« und zudem im Besitze einer genügenden Fülle von Beobachtungen — sowohl Messungen innerhalb des für seine Maßstäbe und Uhren zugänglichen materiellen Systems als »Lichtbotschaften« von den fernen felderzeugenden Körpern — müsste es ihm prinzipiell möglich sein, alles Beobachtete in Raum und Zeit in Uebereinstimmung mit der Einordnung anderer ebenso vollkommener Beobachter einzuordnen. Aber die Bedingung für das Erlangen von einer solchen Uebereinstimmung ist die, dass alle die Beobachter sich beständig die Maßstäbe und Uhren für die Variationen und Bewegungen im Felde korrigiert denken. Man könnte z. B. den Atomabstand in dem Krystallgitter

des Steinsalzes als Längeneinheit und die Periode der Lichtschwingungen der roten Kadmiumlinie an einer bestimmten Stelle der Erde und zu einem bestimmten Zeitpunkt als Zeiteinheit wählen; aber der irdische Beobachter müsste dann stets Korrekturen für die Änderungen dieses Abstandes und dieser Periode durch Variationen und Bewegungen im Neutralfelde einführen.

Es würden sich dann für die Lichtgeschwindigkeit sowohl relativ zu dem Neutralfelde als relativ zu einem Koordinatensystem, worin er in Ruhe wäre, an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeitpunkten verschiedene Werte finden. Wenn dagegen der genannte Abstand und die genannte Periode schlechthin als Einheiten festgestellt würden, so dass jeder Beobachter ihnen stets — ohne die erwähnten Korrekturen einzuführen — den Zahlenwert 1 beilegte, wenn die Träger dieser Einheiten relativ zu ihm und in seiner unmittelbaren Nähe ruhten, dann würde er hier für die Lichtgeschwindigkeit in einem relativ zu ihm ruhenden Koordinatensystem der Relativitätstheorie zufolge stets den nämlichen Wert finden. Aber die Einordnungen verschiedener Beobachter würden sich dann voneinander unterscheiden. Unter der nämlichen Voraussetzung wird man bei der Messung von festen Körpern im allgemeinen nicht Uebereinstimmung mit den Regeln der euklidischen Geometrie finden. In der allgemeinen Relativitätstheorie wird dies gern in der Weise ausgedrückt, dass die euklidische Geometrie in dem betreffenden Raum nicht gilt. Wenn man aber für den Einfluss der Feldvariationen und Bewegungen auf den Masstab und den gemessenen Körper ganz wie für den Einfluss von Temperatur und Druck korrigiert, sollte man natürlich erwarten, dass die Abweichungen von den euklidischen Regeln verschwinden würden — ebenso wie

die Abweichungen, welche man z. B. bei einer festen Scheibe findet, wenn die Temperatur an der Mitte höher ist als am Rande<sup>1</sup>. Wenn man durch solche Korrekturen die Messresultate auf die euklidischen Regeln zurückführen kann, unter Anwendung von Neutralfeldgesetzen, die nicht wider die von der allgemeinen Relativitätstheorie abgeleiteten Relationen streiten, dann ist es möglich, die allgemeine Relativitätstheorie wie die spezielle als eine mathematische Transformation einer auf dem Grunde der gewöhnlichen Raum- und Zeitauffassung ruhenden Kausaltheorie zu betrachten.

Es könnte vielleicht so scheinen, als ob diese Möglichkeit von vorn herein durch mehrere von Einstein und andern angestellte Betrachtungen abgewiesen wird.

Einstein denkt sich z. B. (»Über die spez. u. die allg. Relativitätstheorie« S. 55), dass die Peripherie und der Radius einer rotierenden Scheibe mit einem Einheitsmasstab (einem relativ zum Radius kleinen Stab) von einem Beobachter auf der Scheibe gemessen werden; dann findet dieser — wenn er mit hinlänglicher Feinheit messen könnte — für das Verhältnis zwischen Peripherie und Radius einen grössern Zahlenwert als  $2\pi$ , weil der Stab eine Lorentz-Kontraktion erfährt, wenn er an den Rand gelegt wird und dadurch in seiner eigenen Richtung in dem Inertialsystem bewegt wird, in dem die Scheibe sich dreht. Hierüber sagt Einstein dann: »Damit ist bereits bewiesen, dass die Sätze der euklidischen Geometrie auf der rotierenden Scheibe und damit überhaupt in einem Gravitationsfelde nicht

<sup>1</sup> Selbst wenn der benutzte Masstab aus dem nämlichen Stoff wie die Scheibe ist und er überall die Temperatur des Ortes erlangt, wird man durch Messung der Peripherie und des Radius für ihr Verhältnis einen grösseren Zahlenwert als  $2\pi$  finden, wenn die erforderlichen Korrekturen nicht eingeführt werden.

genau gelten können, wenigstens wenn man dem Stäbchen überall und in jeder Orientierung die Länge 1 zuschreibt«. In dem letzten Satze ist aber ein für die kausale Betrachtung entscheidender Vorbehalt genommen, denn bei der kausalen Einordnung dürfen wir ja eben dieses nicht tun, sondern müssen im Gegenteil die Stablänge für die Lorentz-Verkürzung korrigieren, und dadurch kommt in dem betrachteten Fall eben der euklidische Wert  $2\pi$  für das Zahlenverhältnis heraus. Dass Einstein sich dieser Betrachtungsweise nicht anschliesst, liegt offenbar darin, dass er ein mit dem Beobachter auf der rotierenden Scheibe folgendes Koordinatensystem — in welchem der Stab keine Bewegung hat — als vollkommen gleichberechtigt mit dem Inertialsystem betrachtet. Aber die Rotation der Scheibe ist doch eine Bewegung relativ zu dem äussern felderzeugenden System, und darin haben wir eine reale Basis für eine Bevorzugung des Inertialsystems vor dem rotierenden Koordinatensystem und für die kausale Auffassung der Kontraktion des Stabes — der Bevorzugung des primären Inertialsystems in der speziellen Relativitätstheorie analog.

In ähnlicher Weise verhält es sich mit den mehr allgemeinen Betrachtungen, durch die man dartun kann, dass die Kovarianzforderung sich unmöglich erfüllen lässt, wenn man nicht dem Ausdruck eines Linienelements eine nicht-euklidische Form erteilt (Siehe z. B. E. FREUNDLICH: »Die Grundlagen der Einstein'schen Gravitationstheorie« 1916 S. 31). Dieser Satz ist sicherlich richtig, aber daraus, dass man sich, um die Kovarianzforderung zu erfüllen, von der euklidischen Geometrie entfernen muss, darf man nicht schliessen, dass die Möglichkeit einer mit der euklidischen Geometrie stimmenden kausalen Einordnung mit Einsteins Relativitätstheorie unvereinbar ist. Denn die kausale Re-

lativitätsforderung führt nicht mit sich, dass man die physikalischen Gesetze in kovarianter Form ausdrücken soll, sondern nur, dass die Koordinatensysteme, in bezug auf welche Gesetze ausgedrückt werden, andernfalls gewisse nicht mit einbezogene Realitäten vertreten; aber andererseits schliesst sie nicht aus, dass man durch ein besonderes mathematisches Verfahren die Gesetze in kovarianter Form ausdrücken kann (vergl. S. 12 u. 15). Man kann sagen, dass bei einer Kausaltheorie (d. i. einer Darstellung, in welcher der kausale Zusammenhang explicite hervortritt) die von den Massen im Raume bedingten Feldzustände in die Reihe der übrigen für die physikalischen Vorgänge (und die Dimensionen der Körper) bestimmenden Ursachen eingehen sollen. In der Einstein'schen Relativitätstheorie gibt man aber der »Gravitation« eine Sonderstellung als bestimmend für »die metrischen Eigenschaften des Raumes«. Durch diese — überaus fruchtbare — mathematische Transformation wird das Kausale in diesem Punkte verschleiert, aber es wird nicht aus der Welt gebracht.

Wie tief diese Sonderstellung der »Gravitation« (d. i. des Neutralfeldzustandes) im Wesen des Geschehens begründet ist, soll hier nicht näher erörtert werden. Wir wollen nur auf die Bemerkungen hinweisen, welche S. 45 von dem »Neutralfeldäther« und S. 33 von einer etwaigen Ausnahmestellung der Quantenphänomene gemacht wurden — und endlich auch darauf, dass die Sonderstellung eine momentane Anpassung von Masstäben und Uhren nach dem Zustande im betreffenden Raum-Zeitpunkte (den Gravitationspotentialen) involviert, während es nach der kausalen Auffassung eine sehr naheliegende Annahme ist, dass diese Anpassung eine gewisse Zeit erfordert, — wie z. B. Anpassungen nach der Temperatur eines Milieus.

## V.

Im Vorhergehenden haben wir von dem felderzeugenden System gesprochen und darunter die ganze äussere materielle Welt verstanden, die zur Bildung des Neutralfeldes in der betreffenden Raumgegend beiträgt. Es ist nun eine Frage von grossem Interesse mit Rücksicht auf die kausale Relativitätsforderung, ob es möglich ist, dem materiellen Universum unendliche Ausdehnung und Masse zuzuschreiben, und ob man in diesem Falle zu der für eine gewisse Raumgegend bestimmenden felderzeugenden Welt das ganze Universum mitrechnen muss, oder ob man sich damit begnügen kann, einen begrenzten endlichen Teil in Betracht zu ziehen, indem der Einfluss fernerer Weltgegenden verschwindend gering wird.

Es ist wohlbekannt, dass die Annahme einer unendlichen Welt, wo die durchschnittliche Dichte für hinlänglich grosse Räume überall einen endlichen Wert hat, mit Newtons Theorie unvereinbar ist. Betrachten wir nämlich eine Kugel mit Radius  $r$  und Dichte  $\rho$ , haben wir für das Potential im Zentrum den Wert  $2\pi\rho r^2$  (wenn wir von der Gravitationskonstante absehen), und wenn  $\rho$  endlich ist, wird das Potential mit dem Radius gegen Unendlich hin wachsen. Hieraus folgt, dass das Potential in jedem Punkte einer solchen Welt den Wert  $\infty$  annimmt, und damit wird die Kraft unbestimmt.

Denken wir uns dagegen, das  $\rho$  in stärkerem Verhältnis als  $\frac{1}{r^2}$  gegen Null hin abnimmt, wenn wir aus unserer Raumgegend nach dem Unendlichen hin gehen, wird das Potential endlich sein. Wenn die gesamte Masse aber auch trotzdem unendlich gross sein kann, können wir

eine Welt dieser Art als »eine endliche Mittelpunktswelt« bezeichnen. Sowohl die einzelnen Weltkörper als die Strahlenenergie wird aber nach und nach ein solches Weltsystem verlassen und sich in dem unendlichen Welt- raume verteilen. Aber selbst hiervon abgesehen, ist eine Weltvorstellung dieser Art wenig befriedigend für unsern Gedanken.

Eine Weltordnung, bei welcher  $\rho$  nicht mit wachsendem Abstände gegen Null hin abnimmt, wäre zulässig, wenn man in Newtons Gravitationsgesetz eine geeignete kleine Aenderung einführt. Es würde nichts helfen, den Exponenten des Abstandes  $r$  ein wenig von 2 abweichen zu lassen; dagegen könnte man z. B. den Zweck dadurch erreichen, dass man in dem Gesetze ausser der Gravitationskonstante einen Faktor  $e^{\lambda r}$  einführt, wo  $\lambda$  eine kleine Zahl ist — oder wenn man, wie man es auch ausdrücken kann, die Gravitation eine »Absorption« im Raume erfahren liesse.

Die Vorstellung eines unendlich ausgedehnten materiellen Universums ohne Mittelpunkt lässt sich aber auch mit der unmodifizierten Newton-Theorie vereinbaren, indem wir unsere Vorstellung von dessen Bau auf die Ordnung des Stoffes in kleineren und grösseren Aufhäufungen basieren, welche uns, so weit unsere Beobachtungen reichen, als eine Tatsache begegnen. Wir wissen, dass die Atome im wesentlichen in Weltkörpern wie Sonnen, Planeten u. a. m. gesammelt sind. Diese Weltkörper bilden Sonnensysteme, die in Sternenhaufen gesammelt sind, welche wiederum — vielleicht mit Aufhäufungen von dazwischenliegenden Grössenordnungen als Mittelgliedern — das System der Milchstrasse bilden. Wir haben Grund dazu, gewisse Spiralnebel, welche sich unter anderm durch grössere Geschwindigkeiten als die für die Sterne des Milchstrassensystems durch-

schnittliche auszeichnen, für Sternensysteme ähnlicher Art wie unser Milchstrassensystem anzusehen. Länger als zu diesen Systemen reichen unsere Beobachtungen nicht; das findet aber eine durchaus hinlängliche Erklärung in der Beschränkung unserer Beobachtungsmittel, und wir haben keinen Grund, die Erklärung in einer Weltbegrenzung zu suchen. Es ist vielmehr eine naheliegende und wahrscheinliche Annahme, dass es unter diesen Systemen eine sehr grosse Anzahl gibt, welche zusammen ein endliches System höherer Grössenordnung bilden, und dass diese Grossysteme wiederum ein endliches System noch höherer Grössenordnung bilden. Wenn wir uns den Stoff in dem Weltraume in Systeme von ins Unendliche wachsender Grössenordnung gesammelt denken, folgt unser Gedanke dann nur der von unsern Beobachtungen angezeigten Linie immer weiter in der eingeschlagenen Richtung — statt in beschränkter egozentrischer Weise an einem ganz zufälligen von unserm beschränkten Beobachtungsvermögen bestimmten Punkte anzuhalten.

Der Gedanke von einer solchen Ordnung der Sterne wurde im Prinzip schon in dem 18. Jahrh. von LAMBERT ausgesprochen, und in der Astronomie hat man ihn jedenfalls für die Lichtverhältnisse gegenüber dem Unendlichkeitsprobleme in Anwendung gebracht. Es ist nämlich erkannt, dass das Universum sehr wohl in dieser Weise aus einer unendlich grossen Zahl von leuchtenden Sternen erbaut sein kann, ohne dass der Himmel darum durch das gesamte Licht aller dieser Sterne ein einziges Lichtmeer wird. Dass man auch durch eine Ordnung dieser Art der Konsequenz entgehen kann, dass das Newton'sche Potential in irgend einer Stelle unendlich wird, ist leicht zu sehen.

Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, dass jedes System eine Kugel ist und aus einer sehr grossen Zahl von »Kugelsystemen« nächster unterer Grössenordnung besteht, dass diese Systeme gleichförmig verteilt sind, dass sie eine sehr geringe Masse relativ zu der des grössern Systems besitzen, und dass ihre Radien relativ zu ihren gegenseitigen Abständen sehr klein sind. Wir denken uns vorläufig nur zwei Grössenordnungen, nämlich ein System  $S_2$  mit Durchschnittsdichte  $\rho_2$  und Radius  $r_2$  und als seine Komponenten Systeme  $S_1$  mit den entsprechenden Werten  $\rho_1$  und  $r_1$ . In einem Punkte innerhalb  $S_2$  in dem Abstände  $a_2$  von seinem Zentrum wird das Potential dann sehr annähernd  $P_2 = \frac{2}{3}\pi\rho_2(3r_2^2 - a_2^2)$  sein, wenn der Punkt nicht irgend einem von den Systemen  $S_1$  besonders nahe liegt. Wenn er dagegen innerhalb eines von diesen Systemen liegt, gibt dieses für sich betrachtet ein Potential  $P_1$  von der nämlichen Form wie  $P_2$ . Da das von allen übrigen Systemen  $S_1$  zusammen erzeugte Potential den gemachten Voraussetzungen zufolge sehr nahezu gleich  $P_1$  ist, wird das ganze Potential annähernd gleich  $P_1 + P_2$ .

Wenn wir nun statt der beiden Systemordnungen  $S_1$  und  $S_2$  eine unendliche Reihe  $S_1, S_2, S_3 \dots$  haben, von welchen jede Systemordnung in der nämlichen Relation zu der folgenden wie  $S_1$  und  $S_2$  steht, können wir das Potential  $P$  in einem Punkte von einem von den Systemen der untersten Grössenordnung  $S_1$  annähernd als eine Summe von Gliedern ausdrücken:

$$P = P_1 + P_2 + \dots = \frac{2}{3}\pi\rho_1(3r_1^2 - a_1^2) + \frac{2}{3}\pi\rho_2(3r_2^2 - a_2^2) + \dots$$

Wenn  $P$  einen endlichen Wert annehmen soll, ist es nicht hinlänglich, dass  $\rho_n r_n^2$  sich Null nähert, indem  $n$  gegen unendlich hin wächst. Dass Produkt muss sich Null

in solcher Weise nähern, dass die Reihe gegen einen endlichen Wert hin konvergiert. Wenn diese Bedingung erfüllt ist und man so viele Glieder mitnimmt, dass man sich dadurch diesem Grenzwert genügend nähert, kann man die übrigen Glieder weglassen oder, anders ausgedrückt, die Systeme höherer Grössenordnung als das letzte mitgenommene Glied haben nur einen überaus kleinen Einfluss auf die Verhältnisse in der betreffenden Raumgegend. Nur ein endlicher Teil von dem Weltall hat Bedeutung für sie; »ihre physikalische Welt« ist endlich.

Für einen Punkt, der innerhalb der Grenzen eines gewissen Systems  $S_n$  liegt, aber weder einem System  $S_{n-1}$  angehört noch in der Nähe von einem dieser Systeme liegt, werden alle Glieder von  $P$  links von  $P_n$  wegfallen. Körper, die sich in solchen Punkten befinden, könnte man Vagabunden in  $S_n$  nennen (z. B. Meteore, welche in einem Sternenhaufen wandeln, ohne irgend einem von dessen Sonnensystemen so nahe zu sein, dass dessen Beitrag zu dem Potential gegenüber dem, welcher von dem Sternenhaufen als Ganzes herrührt, von Belang ist).

Es ist selbstverständlich unwesentlich, ob die Systeme Kugeln sind und die Stoffverteilung eine gleichförmige ist. Die Bedingung dafür, dass eine der Systemordnung entsprechende Auflösung von  $P$  in Glieder statt finden kann, ist nur die mehr allgemeine von der Kleinheit jedes Systems relativ zu den nächsten grösseren und zu seinen Abständen von Systemen gleicher Grössenordnung.

Dem Gravitationspotential in Newtons Theorie entspricht in unserer Auffassung von dem Weltgeschehen das, was wir die Feldintensität genannt haben, und wenn diese sich auch nicht ohne weiteres mit dem Newton'schen Potential identifizieren lässt, stossen wir doch hier auf die nämliche

Unendlichkeitsschwierigkeit, und eine Ordnung des Stoffes im Weltall in Systeme von wachsender Grössenordnung kann uns auch hier Hilfe leisten. Eben eine solche Vorstellung von dem Bau des Weltalls harmoniert zudem besonders schön mit der Auffassung von dem Weltgeschehen, welche der kausalen Relativitätsforderung entspriest. Nach dieser Vorstellung haben wir volle Symmetrie in dem ganzen Weltall. In den fernsten Gegenden des Universums gibt es mächtige Sternensysteme gleicher Art wie die uns bekannten, aber mit andern felderzeugenden Welten als der unsrigen. Ruhekoordinatensysteme für Gegenden von solchen verschiedenen Welten können in jeder Translation und Rotation relativ zueinander sein. Ihre Lagen und Bewegungen können wir auf jedes ganz zufällige rechtwinkelige Koordinatensystem beziehen, welches wir uns über das ganze Universum ausgedehnt denken; und alle solche Koordinatensysteme sind mit Rücksicht auf die Einordnung von dem Geschehen gleichgestellt. Einfache Ausdrücke für die physikalischen Gesetze bekommen wir nicht in bezug auf ein solches universales Koordinatensystem. Aber der Umstand, dass jedes von den Systemen des Weltbaus — von den kleinsten Weltkörpern und aufwärts in die Reihe von Grössenordnungen — in der Regel relativ zu den Abständen von Systemen ihresgleichen sehr klein ist, ist von grosser Bedeutung für die Ausnutzung der Einfachheit, welche die Aequivalenzprinzipien der Relativitätstheorie repräsentieren; denn daraus resultiert, dass das ganze System sich in einem von seinen gleichen samt höheren Systemen gebildeten pseudohomogenen Neutralfelde befinden wird, und man kann dann ein Koordinatensystem so wählen, dass es ein Inertialsystem für die ganze das System umfassende Raumgegend ist.

Es wird mit diesem Weltbild harmonieren, wenn wir uns denken, dass die Durchschnittswerte von den gegenseitigen Geschwindigkeiten der gleichgestellten Systeme mit wachsender Grössenordnung zunehmen. Die Lichtgeschwindigkeit in den Räumen zwischen gleichgestellten Systemen wird aber auch mit der Grössenordnung zunehmen, da die Feldintensität abnimmt, indem wir nach und nach die kleineren Systeme verlassen. Ein Beobachter, der mit Masstab und Uhr von unserer Raumgegend nach solchen Gegenden mit kleinerer Feldintensität reiste, würde doch, wie früher gesagt, nach der Relativitätstheorie stets den gleichen Wert der Lichtgeschwindigkeit finden, wenn er nicht für die Veränderung von Masstab und Uhr korrigierte. Man könnte sich dann auch leicht denken, dass es überhaupt unmöglich wäre, durch Beobachtungen innerhalb des Sonnensystems zu merken, wenn das System nach und nach unsern Sternenhaufen, dann das Milchstrassensystem, darauf das nächste grössere System u. s. w. verlässt und Vagabund in immer grösseren Systemen wird. Die Sache ist doch nicht so einfach. Wenn die von der äusseren Welt herrührende Feldintensität kleiner wird, wird nämlich der von den Körpern des Sonnensystems gelieferte Beitrag zu der gesamten Feldintensität in jedem Punkte verhältnismässig grösser werden. Die von deren Bewegungen — z. B. der Rotation der Erde — herrührenden Störungen in dem Ruhekoordinatensysteme werden dann grösser und können merkbare Wirkungen haben (vergl. S. 27). Ebenso muss z. B. die Krümmung eines Lichtstrahls, der dicht an der Sonne vorbeipassiert, stärker werden. Man muss annehmen, dass das Verhältnis zwischen dem Krümmungsradius für einen solchen, auf den Sonnenradius winkelrechten Lichtstrahl und seinem

Abstände von dem Sonnenzentrum grösser wird, und wenn die Intensität des äusseren Neutralfeldes sich 0 nähert, kann man sich schwierig irgend einen andern Grenzwert dieses Verhältnisses denken als 1, so dass die genannten Strahlen in diesem Grenzfall einen Kreis um die Sonne beschreiben sollten. Eine andere Frage ist es, ob ein solches endliches System sich nicht schnell auflösen würde, wenn es in ein schwaches äusseres Feld gebracht würde.

Wir kommen hiermit zu der allgemeinen Frage, ob die hier geschilderte Vorstellung des Weltbaus — die ins Unendliche fortgesetzte Systemordnung — uns auch gegenüber der zweiten berührten Unendlichkeitsschwierigkeit — der Zerstreungsneigung der Strahlenenergie und der Weltkörper — helfen kann. Wir wollen doch nicht näher auf diese Frage eingehen, da sie zu dem in dieser Abhandlung behandelten Probleme nur in fernerer Relation steht. Es soll nur bemerkt werden, dass wir nicht der Zerstreungsschwierigkeit entweichen, selbst wenn wir uns darauf beschränken, die Systemordnung zu betrachten, welche wir faktisch innerhalb des endlichen, sichtbaren Teiles der Welt vorfinden.

Dagegen wollen wir noch einen andern zur Lösung der Unendlichkeitsschwierigkeiten angewiesenen Ausweg von einem kausalen Gesichtspunkte aus betrachten. Wir meinen hiermit die Vorstellung, dass der Raum, in dem sich die physikalischen Vorgänge abspielen, »sphärisch« ist, so dass das Universum endlich sein kann, ohne Grenzen zu haben.

Dieser Ausweg ist schon bei der Newton'schen Theorie in Vorschlag gebracht worden, und Einstein hat sich dieser Auffassung angeschlossen, indem er das Weltkontinuum in bezug auf die räumliche Ausdehnung als ein nicht euklidisches dreidimensionales Volumen betrachtet, das

zwar an verschiedenen Stellen einen verschiedenen Krümmungsradius hat, aber doch im grossen und ganzen sphärisch ist (»Sitzungsber. der Kgl. Preussischen Akad. d. Wissensch.« 1917 S. 142). Diese Betrachtungsweise führt doch, wie W. DE SITTER hervorgehoben hat (»Monthly Notices of The Royal Astronomical Society« LXXVIII, 1917 S. 3), zu sonderbaren und kaum annehmbaren Konsequenzen. Ausser den wirklichen Sternen müssten wir am Himmel scheinbare, »Antisterne«, sehen, welche die nämliche Klarheit wie die wirklichen und ihren Platz gegenüber diesen haben würden, wenn das Licht keine Absorption im Welt- raume erfährt, und wenn die Sterne unbeweglich wären; die Bewegungen in der langen Zeit — vielleicht Millionen von Jahren — welche das Licht zu einer »Rundreise« in der Einstein'schen Welt braucht, würden doch diese Sym- metrie aufheben. Einsteins Hypothese kann nach de Sitter auch nicht erklären, warum die Sterne nicht aus dem Milchstrassensysteme entwischen (l. c. S. 24).

De Sitter hat eine andere Hypothese aufgestellt. Da- nach ist das Weltkontinuum von sphärischem (oder ellip- tischem) Charakter, nicht nur in räumlicher, sondern auch in zeitlicher Hinsicht; man könnte also den Krümmungs- radius von de Sitters vierdimensionalem Raum-Zeit-Konti- nuum passend als den Radius einer fünfdimensionalen Hy- persphäre bezeichnen. Nach de Sitters Hypothese müssten die Vorgänge in fernen Weltgegenden, von dem Gesichts- punkte des Beobachters aus beurteilt, langsamer als bei ihm verlaufen, die Spektrallinien von den fernen Spiral- nebeln sollten also durchschnittlich gegen Rot verschoben sein (Die Beobachtungen geben uns keine Anzeichen von wirklicher Bedeutung in dieser Richtung). Nennen wir den Krümmungsradius  $R$ , sollte die Zeit in dem Abstand

$\frac{1}{2} \pi R$  von dem Beobachter so zu sagen still stehen; und da das Licht deshalb unendlich langsam gehen würde, könnte es niemals zurückkehren und Antisterne bilden. Für einen Beobachter im Abstände  $\frac{1}{2} \pi R$  von uns würden natürlich nicht die Vorgänge bei ihm, sondern die Vorgänge bei uns unendlich langsam verlaufen.

Man könnte gegen die Annahme eines sphärischen (oder elliptischen) Raumes oder eines sphärischen Raum-Zeit-Kontinuums einwenden, dass eine solche Auffassung für unser Anschauungsvermögen unzugänglich ist. Wir wollen doch lieber hier die Einwendung machen, dass sie in kausaler Hinsicht nicht befriedigend ist. Was die lokalen Raumsphärizitäten (die Abweichungen von dem durchschnittlichen Krümmungsradius) betrifft, haben diese ihre kausale Basis in den durch existierende Massen bestimmten Einstein'schen Gravitationspotentialen; aber der allgemeine sphärische Charakter scheint keine solche Basis zu haben.

Was hiermit gemeint ist, wird am leichtesten verstanden werden, wenn wir die für uns anschauliche dreidimensionale Kugel betrachten und uns zweidimensionale Wesen auf der Kugeloberfläche lebend denken. Wir wollen annehmen, dass es für sie ebenso unmöglich ist, die dritte als für uns die vierte Dimension anzuschauen, und das deshalb die Vorstellung von einer Kugel mit Zentrum und Radius ganz inkonsistent mit ihrem Bewusstsein ist. Wenn sie aber, nachdem sie — wegen der überaus grossen Länge des Kugelradius relativ zu ihrer eigenen Ausdehnung und der ihrer beobachtbaren Umgebung — erst die Sätze der ebenen euklidischen Geometrie ausgefunden hätten, später die der sphärischen Geometrie entsprechenden Abweichungen von den euklidischen entdeckten, würden sie vorläufig physikalische Ursachen zu den beobachteten Abweichungen

suchen. Wenn es aber nicht möglich wäre, in dieser Weise einen vernünftigen Zusammenhang in dem Geschehen, d. i. einfache allgemeine physikalische Gesetze zu finden, würden einige vielleicht in der Auffassung zur Ruhe kommen, dass eine gewisse neue »Kreisgeometrie«, die ein geschlossenes logisches System bildete, und durch welche es möglich sein würde, die Vorgänge in einfachen Gesetzen zu beschreiben, die rechte, d. i. die für ihre Welt geltende, wäre. Aber in ihrer geometrisch-physikalischen Wissenschaft würde eine Linie von ganz bestimmter Länge (ein grösster Kreis auf der Kugelfläche) eine besondere Rolle spielen. Viele würden eine Erklärung der Sonderstellung dieser Länge gegenüber allen anderen Längen vermessen, und wenn sie keine beobachtbaren Realitäten als die Ursache ansehen könnten, würden sie es als einen Mangel bei dem kausalen Zusammenhang, welcher übrigens in den Vorgängen hervortritt, empfinden. Dass man, von mathematischen Analogien mit der Lehre von ebenen Kreisen geleitet, der ausgezeichneten Länge einen Namen beilegen könnte, indem man sie als  $2\pi$ -mal den »Krümmungsradius des Raumes« bezeichnete, würde sie nicht befriedigen. Wir dreidimensionalen Wesen müssen zugeben, dass ihre Unzufriedenheit nicht unberechtigt wäre; wir würden reale Ursachen erkennen können, welche für den Zwang, der die Lichtstrahlen u. a. m. an der Kugelfläche festhielte, Rechenschaft ablegen könnten — Ursachen, die ausserhalb ihres Vorstellungskreises und ihrer räumlichen Welt liegen würden.

Wir werden in eine ähnliche Lage wie diese zweidimensionalen Wesen geraten, wenn wir genötigt werden, unanschauliche Analogien wie einen »sphärischen Raum« mit einem gewissen »Krümmungsradius« in unsere geometrisch-physikalische Wissenschaft einzuführen. Es wird dann in

diese ein fremdes Element, eine »unbeobachtbare Ursache« eingehen. Wenn nun die Möglichkeit, dass »ausserweltliche« Ursachen für das Geschehen in unserer Welt mitbestimmend sind, sich auch nicht schlechthin abweisen lässt, muss man doch eine solche Annahme als in kausaler Hinsicht unbefriedigend bezeichnen.

Da der »Weltkrümmungsradius« bei der Einstein'schen Hypothese von der räumlichen Sphärizität in einer gewissen Relation zu der Gesamtmasse in der Welt steht, ist die Sachlage hier weniger klar als bei de Sitters Hypothese. Bei dieser wird die Grösse des Krümmungsradius nur durch eine gewisse Eigenschaft des Raum-Zeit-Kontinuums bedingt, und auch von den Inertialsystemen gilt, dass sie durch nichts beobachtbares Materielles bestimmt sind. Es ist leicht, zu sehen, dass wir damit die von Einstein aufgestellte kausale Forderung aufgeben, indem wir in eine ganz ähnliche Lage zurückkehren wie die, in welche die Annahme von Bewegungen in dem absoluten Raume oder in dem unterschiedslosen Weltäther als bestimmend für das Geschehen die Physik gebracht hatte.

EDDINGTON, der augenscheinlich de Sitters Hypothese bevorzugt, erkennt denn auch ganz offen an, dass sie nicht der kausalen Relativitätsforderung, oder, wie er es nennt, dem philosophischen Prinzip der Relativität gerecht wird. Aber er meint, dass es für den Physiker kein besonderes Interesse hat, dieses Prinzip zu behaupten, und dass wir uns damit begnügen müssen, »*to accept some mathematical expression as an axiomatic property which cannot be further analysed*« (»The Relativity Theory of Gravitation«, S. 91). Man könnte mit einigem Rechte sagen, dass er hierdurch ein mathematisches Ideal statt eines physikalischen Ideales als Leitstern für die physikalische Forschung anweist.

Sowohl Einsteins als de Sitters Sphärizitätshypothesen sind aus der Einstein'schen Relativitätstheorie als »Grenzbedingungen« entsprungen, aber keine von ihnen ist eine notwendige Folge von dieser. Von einem physikalischen Gesichtspunkte aus scheint mir die Hypothese von einer ins Unendliche fortgesetzten Systemordnung bei weitem vorzuziehen zu sein, nicht nur weil sie mit der kausalen Relativitätsforderung — von prinzipiell beobachtbaren physikalischen Ursachen — vollkommen harmoniert, sondern auch weil sie eine Fortsetzung von dem durch wirkliche Beobachtungen gewonnenen Weltbilde repräsentiert.

Gegen Einsteins Sphärizitätshypothese haben de Sitter und Eddington den Einwand erhoben, dass sie die Einführung von enormen Mengen von unbeobachtetem »Weltstoff« erfordert. Dieses wird überhaupt notwendig sein, wenn wir reale Massen für die Inertialsysteme als bestimmend ansehen wollen, denn die (auch nur mit Fernröhren) sichtbaren Sterne genügen gar nicht als felderzeugende Welt für unsere Gegend. Aber bei der »Systemhypothese« ist die Miteinbeziehung von viel grösseren Sternensystemen keine willkürliche oder künstliche Annahme (vergl. S. 53), und der genannte Einwand hat deshalb hier keine wirkliche Berechtigung. Es hängt teils von den Neutralfeldgesetzen, teils von der Verteilung der Sterne ab, zu welcher Grössenordnung der Systeme man gehen muss, um mit einer gewissen Genauigkeit den Vorgängen in einer gewissen Raumgegend gerecht zu werden, aber einen bestimmten endlichen Wert für die Masse und Ausdehnung der felderzeugenden Welt für eine gewisse Raumgegend gibt es nicht, und die einer bestimmten Genauigkeit entsprechende Masse und Raumgrösse der felderzeugenden Welt kann für verschiedene Raumgegenden verschieden sein. Einer bestimm-

ten »Weltmasse« oder einem bestimmten »Weltradius« wie in den Sphärizitätshypothesen begegnen wir also in keiner Weise in der Systemhypothese.

Was das Verhältnis der Systemhypothese zu der allgemeinen Einstein'schen Relativitätstheorie betrifft, leuchtet es nicht unmittelbar ein, dass sie nicht in einem solchen Weltbau Platz finden könnte. Die Systemhypothese steht wenigstens nicht in prinzipiellem Gegensatz zu den Grundgedanken der Einstein'schen Theorie. Eine andere Frage ist es, ob es möglich ist, die gesuchten und noch nicht festgestellten Grenzbedingungen dieser Theorie so zu sagen durch die Annahme der unendlichen Systemordnung zu ersetzen und auf diesem Weg die kausale Relativitätsforderung mit der vollständig durchgeführten Einstein'schen Relativitätstheorie zu vereinbaren. Die Beantwortung dieser Frage erfordert theoretische Untersuchungen, die ausserhalb des Rahmens dieser Abhandlung fallen. Es scheint mir aber, dass sie für die Auffassung der neueren Richtungen in der physikalischen Forschung eine grosse Bedeutung hat.

---

Für wertvolle Kritik und nützliche Ratschläge bei der Ausarbeitung dieser Abhandlung möchte ich gern den Herren Professoren K. KROMAN und N. BOHR meinen besten Dank überbringen.

Charlottenlund, Dänemark  
Mai 1919.