

Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

K. B. Akademie der Wissenschaften

zu München

1912. Heft II

Mai- bis Julisitzung

München 1912

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



Über den Sinn der absoluten Bewegung von Körpern.

Von **E. Gehrcke.**

Vorgelegt von H. v. Seeliger in der Sitzung am 4. Mai 1912.

§ 1. Über die „absolute Bewegung“ eines Körpers sind in der Literatur die verschiedensten Ansichten geäußert worden. Während Streintz¹⁾ die Meinung Newtons von der Existenz einer absoluten Bewegung teilt, erklärt Mach²⁾, daß es für ihn nur relative Bewegung gebe. Johannesson³⁾ ist der Ansicht, daß die Meinungsverschiedenheit über die absolute und relative Bewegung auf einer Doppelsinnigkeit des Wortes Raum beruht. Seeliger⁴⁾ hält einerseits die Begriffe absoluter Raum, absolute Bewegung, absolute Ruhe für sinnlos, andererseits will er gegen diese Ausdrücke, sofern man sie wirklich faßbaren Begriffen zuordne, nichts einwenden. Seitdem man in die Physik ein neues Grundprinzip, das Prinzip der Relativität, einzuführen versucht hat, gewann auch die absolute Bewegung wieder erneutes Interesse. Nach Einstein⁵⁾ ist

1) H. Streintz, Die physikalischen Grundlagen der Mechanik. Leipzig 1883.

2) E. Mach, Die Mechanik in ihrer Entwicklung. 5. Auflage. Leipzig 1904, S. 252.

3) P. Johannesson, Das Beharrungsgesetz. Wissenschaftl. Beilage zum Jahresber. d. Sophien-Real-Gymnasiums in Berlin. Gaertners Verlag 1896, S. 13.

4) H. Seeliger, Sitzungsber. d. K. Bayer. Akad. d. Wiss. München 36, 85–137, 1906.

5) A. Einstein, Vierteljahrsschr. d. Naturforsch. Gesellsch. Zürich. 27. Nov. 1911, S. 1.

neuerdings das Relativitätsprinzip beschränkt auf genau geradlinig und gleichförmig bewegte Körper. Andererseits hat Maxwell¹⁾ hervorgehoben, daß alle translatorischen Bewegungen, auch die ungleichförmigen, relative seien, im Gegensatz zu den absoluten Rotationsbewegungen. Lotze²⁾ hielt sowohl absolute Translation wie Rotation für möglich.

Diese Aufzählung ließe sich weiter vervollständigen³⁾. Wenn alle die angeführten Urteile auf ein und denselben Gegenstand Bezug hätten, würden eine Reihe sich diametral gegenüberstehender Ansichten vorliegen. Ich möchte nun im folgenden auseinandersetzen, wie die verschiedenen Meinungen über die absolute Bewegung zu verstehen sind, und insbesondere den sehr verschiedenen Sinn, der dem Wort „absolut“ beigelegt wird, näher erörtern. Dabei schließe ich mich dem Urteil Johannessons an, daß von den verschiedenen Autoren „die einen von Bewegungen sprechen, die nur im Denken zu erfassen sind, die andern von solchen, die zur Sinneswelt gehören“. Ich glaube, daß dieser Gesichtspunkt, wenn man ihn weiter verfolgt, aufklärt und manches Rätsel löst. Insbesondere möchte ich bei den weiteren Betrachtungen die Nationalität der Forscher in Rücksicht gezogen wissen; demgemäß unterscheide ich einen deutschen und einen englischen Begriff der absoluten Bewegung. Hierdurch wird meines Erachtens das Verständnis für die bei dem Ausdruck „absolute Bewegung“ in jedem aufgelösten, teils klaren, teils unklaren Gedanken und Vorstellungen erleichtert.

§ 2. Die deutsche Auffassung des Wortes „absolut“ bezeichnet etwas Ideales, Unbestimmtes, Transzendentes, dessen Inhalt sich nicht ganz leicht angeben läßt. Das „Absolute“ ist etwas Erhabenes, Letztes, hinter dem es nichts mehr gibt, etwas an sich Seiendes, oder wie man sonst noch sagen will.

¹⁾ Cl. Maxwell, Substanz und Bewegung. Deutsche Übersetz. von Fleiscl, S. 29. 1881.

²⁾ H. Lotze, Grundzüge der Naturphilosophie, S. 7. Leipzig 1882.

³⁾ Vgl. z. B. A. Voss, Encyclopaedie der mathemat. Wiss. IV, 1. Leipzig 1901—1908, Teubners Verlag.

Eine absolute Bewegung stellt somit eine Bewegung an sich vor, ohne Bezugnahme auf etwas, was nicht mit dem Bewegten selbst identisch wäre, also z. B. die Bewegung eines einzelnen Körpers im vollständig leeren, mathematischen Raume.

Bei näherem Zusehen zerfließt aber die so definierte „absolute Bewegung“ in ein Nichts, denn wenn wir versuchen, sie präzise zu denken oder vorzustellen, so geraten wir in große Schwierigkeiten. Der erste, welcher dies erkannt hat, war wohl Euler¹⁾; dieser machte darauf aufmerksam, daß die Ausdrücke „Lage“ und „Bewegung“ die Bezugnahme auf ein äußeres Substrat verlangen. Hiernach ist eine absolute Bewegung eines Körpers unerkennbar, sie ist darum ein Begriff ohne vorstellbare Bedeutung. — Ich glaube nicht fehlzugehen, wenn ich annehme, daß es der soeben erörterte Sinn der Worte „absolute Bewegung“ ist, gegen den sich verschiedene Autoren wenden, die eine völlige Vermeidung dieses Ausdruckes für angezeigt halten.

Wenn man eingesehen hat, daß die Bewegung oder Ruhe eines Körpers ein äußeres Substrat erfordert, auf das der Bewegungszustand zu beziehen ist, daß also nur relative Bewegungen vorgestellt werden können, so wird man sich nach einem besonders geeigneten Substrat umsehen. Man kann z. B. die Bewegung eines Körpers auf einen beliebigen, außerdem noch vorhandenen Körper beziehen, relativ zu dem die Bewegung beschrieben werden kann. Euler verwarf diesen Ausweg und wandte sich zu einem andern Substrat. Diesem liegt eine eigenartige Raumauffassung, die bereits Newton gehabt hat, zu Grunde: es wird nämlich der gesamte Raum als Substrat für Bewegungen genommen. In der Tat läßt sich, ebenso wie jedes beliebige, geometrische Gebilde (Punkt, Linie, Körper) von endlicher oder unendlicher Ausdehnung, ja auch der gesamte Bereich aller Punkte des unendlichen Raumes, d. h. dieser selbst, als Bezugskörper für Bewegungen in Gedanken verwenden. Hiermit wird dann stillschweigend meist die Voraus-

¹⁾ Vgl. Streintz, l. c. S. 35.

setzung verknüpft, daß der unendliche Raum materielle Beschaffenheit hat. Zur Erkennung oder Angabe eines Bewegungszustandes bedarf man nun keiner besonderen Hilfskörper mehr, es ist eine Bezugnahme auf die unendlich vielen Punkte des materialisierten Raumes selbst möglich. Man kann nun auch wieder von absoluter Bewegung sprechen: eine absolute Bewegung ist in diesem Sinne also eine solche, die relativ zu dem materiell gedachten Raume vor sich geht.

Nach der bemerkenswerten Idee eines materialisierten Raumes hat jeder Punkt, jede Linie eine ganz bestimmte „Lage im Raum“. Da diese Auffassung eine weite Verbreitung in vielen mathematischen und physikalischen Schriften gefunden hat, so ist zu vermuten, daß ein bestimmter, einfacher Grund dafür da ist, welcher bewirkte, daß die höchst willkürliche Materialisierung des Raumes vielen sympathisch und plausibel erschienen ist. Man denkt hier wohl zunächst an eine Ätherhypothese, eine solche kommt indes, wie schon Seeliger¹⁾ hervorgehoben hat, nicht in Betracht. Ich habe mir folgende Erklärung gebildet: Bei der Verdeutlichung einer gedachten Bewegung, z. B. derjenigen eines Punktes, pflegt man auf Papier oder auf der Tafel eine Zeichnung zu entwerfen; relativ zu dieser Zeichnung denkt man sich die Bewegung vor sich gehen. Ebenso wie jeder Punkt und jede Linie eine ganz bestimmte Lage auf dem Material der Zeichnung (z. B. Schreibpapier) einnimmt, kann man sich räumlich etwas Ähnliches vorstellen. Man gelangt so zu dem materialisierten Raum, in welchem, wie auf einer Unterlage, allen Punkten und Linien ein ganz bestimmter Platz zugewiesen ist. Wer die Idee dieses materialisierten Raumes teilt, drückt damit nur aus, daß er die Abstraktion des reinen, mathematischen Raumes nicht streng vollzieht. Die absolute Bewegung eines Körpers im Sinne Eulers ist hiernach im Grunde nur die Bewegung relativ zu einem unendlich ausgedehnten, materiellen Gerüst, an welchem der Körper irgendwie haftend gedacht wird. Durch diese triviale

¹⁾ Seeliger, l. c. S. 91.

Erklärung, die ich so lange teilen möchte, bis eine bessere gefunden ist, wird wohl das Rätsel gelöst, welches Streintz¹⁾ darin erblickt, daß Euler in ein und demselben Werke „zwei sich geradezu bekämpfende Ansichten“, die beide „mit Nachdruck und Überzeugung verteidigt werden“, geäußert hat. Man sieht, daß Euler sich durchaus nicht widerspricht; seine Bezeichnungsweise „absolute Bewegung“ ist allerdings irreführend, sie dürfte aber einen oben charakterisierten, ganz bestimmten Sinn haben. Dieser selbe Sinn liegt, wie ich glaube, auch den Ausführungen mancher anderer Autoren, deren Interessen vorwiegend mathematische waren, zu Grunde (Lagrange, Laplace u. a., vgl. z. B. Seeliger, l. c. S. 91). Es mag übrigens bemerkt werden, daß die Vorstellung des materialisierten Raumes für jeden Geometer durchaus gefahrlos ist, da geometrische Fehler daraus nicht entspringen können.

Hiernach ergibt sich folgender Schluß: Ob wir die Vorstellung eines materialisierten Raumes annehmen oder nicht, es bleibt nur die Möglichkeit, jede Bewegung, die wir klar denken oder vorstellen wollen, phoronomisch als relative aufzufassen, nämlich relativ zu irgendwelchen beliebigen, geometrischen Gebilden oder deren Teilen, wie Punkt, Linie, Fläche oder Körper. Es ist dabei ohne Belang, ob wir uns ein solches Gebilde endlich begrenzt denken oder nicht, und ob wir ihm einen materiellen Inhalt zulegen. Eine absolute Bewegung eines einzelnen Punktes oder Körpers (oder sonst eines geometrischen Gebildes) bleibt phoronomisch eine leere Fiktion, wenn wir mit der Bezeichnung „absolut“ die Beziehungslosigkeit auf irgend ein Substrat ausdrücken wollen. Alles dies gilt ganz allgemein für jede Art von Bewegung, also für beliebige gleichförmige und ungleichförmige Translation und Rotation.

§ 3. Unsere Betrachtungen in § 2 waren rein phoronomische, abstrakte. Die Bewegungsvorgänge waren gedachte, im mathematischen Raume unserer Raumanschauung vor sich gehende, und nur beiläufig wurde eine materielle Reproduktion

¹⁾ L. c. S. 45.

einer Bewegung, z. B. durch eine Zeichnung, als Krücke zur Unterstützung der Vorstellung zugelassen. Wie es mit der Bewegung greifbarer Körper in der Natur bestellt ist, haben wir nicht erörtert. Jetzt wollen wir dies aber tun und von Erfahrungen und Beobachtungen an Naturkörpern ausgehen; die Bewegungsvorgänge, die wir jetzt betrachten, wollen wir also als im physikalischen Raume wirklich erfolgend voraussetzen. Wir nehmen dann den Standpunkt ein, von dem aus das englische Denken vornehmlich Bewegungsvorgänge betrachtet und wollen uns fragen, was man nunmehr unter einer „absoluten Bewegung“ zu verstehen hat.

Die Erfahrung lehrt, daß wir bei der Beurteilung von Bewegungsvorgängen in der Natur zuweilen nicht sicher anzugeben vermögen, welcher von zwei relativ zueinander bewegten Körpern ruht und welcher sich bewegt. Ruhe und Bewegung wird dabei in sehr vielen Fällen phoronomisch auf die Erde als Bezugsstandpunkt bezogen. Nun wissen wir aber, daß auch die Erde sich bewegt, nämlich einmal um sich selbst und sodann um die Sonne; auch die letztere bewegt sich wieder relativ zum Fixsternhimmel usw. Die Sache erscheint mithin äußerst kompliziert. Als absolute Bewegung werden wir jetzt eine solche bezeichnen, welche unabhängig von der willkürlichen Wahl irgend eines Bezugsstandpunktes unverkennbar die für eine Bewegung charakteristischen, physikalischen Merkmale aufweist. Die so definierte, absolute Bewegung bezeichnet also etwas ganz anderes als diejenige in § 2. Daher wäre eine besondere Bezeichnung angebracht, um keine Verwechslung hervorzurufen; man kann aber zweifelhaft sein, bei welcher Definition, ob bei der früheren in § 2 oder bei der soeben aufgestellten, das Kennwort „absolut“ mit größerem Recht beizubehalten ist. Aus diesem Grunde und da wohl kein Mißverständnis mehr möglich ist, wollen wir hier die Einführung einer besonderen Bezeichnung unterlassen.

Es ist nun klar, daß aus dem phoronomischen Verhalten der Naturkörper zueinander niemals auf eine bestimmte Bewegung, die unabhängig vom Bezugsstandpunkt ist, also auf

eine absolute Bewegung, geschlossen werden kann, denn nur eine phoronomisch relative Bewegung ist phoronomisch definierbar und erkennbar. Dies schließt aber nicht aus, daß ein Naturkörper zuweilen gewisse physikalische Merkmale aufweist, aus deren Vorhandensein indirekt auf Bewegung zu schließen ist. Hierzu bedarf es keiner phoronomischen Beziehung, insbesondere keines bestimmten Bezugsstandpunktes; es ist nicht einmal nötig, daß ein solcher als materieller Körper vorhanden ist.

Daß in dem zuletzt erörterten Sinne alle Rotationsbewegungen, in denen Zentrifugalkräfte auftreten, als absolute anzusehen sind, hat Newton erkannt. Die Darlegungen Newtons leiden meines Erachtens an keinem Widerspruch und an keiner Unklarheit, vielmehr kann man nur bewundern, bis zu welcher Tiefe Newton die mechanischen Vorgänge zu durchdringen vermochte. Wohl aber haben diejenigen Autoren, die einer absoluten Bewegung durchaus die in § 2 erörterte Bedeutung geben wollen, in Newtons Darlegungen Unklarheiten empfunden, und zwar, wie ich meine, infolge mißverständener Bedeutung des Wortes „absolut“. Hier ist wohl in erster Linie Mach¹⁾ zu zitieren, der ausdrücklich gegen Newton Stellung nimmt und keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Translation und Rotation gelten lassen will. Ich erblicke den Grund für diese scheinbare Meinungsverschiedenheit darin, daß Mach die Rotation mehr vom phoronomischen, Newton mehr vom physikalischen Standpunkt aus ansieht. Ich habe dies auch schon bei früherer Gelegenheit angedeutet²⁾. — Es sei in diesem Zusammenhange noch erwähnt, daß Kant³⁾ die Darlegungen Newtons klar erfaßt hat; dies geht aus seiner Formulierung der absoluten Kreisbewegung hervor. — Wenn die Darlegungen Newtons manchen deutschen Physikern problematisch erschienen sind, so dürfte das daran liegen, daß diese letzteren sich zu sehr an die weniger physikalische als ab-

1) E. Mach, l. c.

2) E. Gehreke, Verhandl. Deutsch. Physik. Gesellsch. **13**, 993, 1911.

3) Vgl. Streintz, l. c. S. 18.

strakte, bis aufs äußerste idealisierte Idee der in § 2 erörterten, absoluten Bewegung angeklammert haben. Dem Engländer liegen physikalische Betrachtungen im allgemeinen näher als abstrakte, darum scheint Newton von englischen Physikern besser verstanden worden zu sein.

Nun ist es aber mit der Einsicht, daß alle rotatorischen Bewegungen und Bewegungskomponenten als absolute aufzufassen sind, noch nicht getan. Es entsteht die Frage, auf welche Weise ein Standpunkt konstruiert werden kann, dem man mit praktisch ausreichender Genauigkeit die Eigenschaft zusprechen darf, daß relativ zu ihm die absolute Bewegung eines rotierenden Körpers, und damit auch aller rotierenden Körper, vor sich geht. Es sind verschiedene Wege betreten worden, die zu einem solchen „absoluten“ Standpunkt hinführen. Am einfachsten ist es, sich diesen Standpunkt an Hand von Körpern zu konstruieren, die sehr weit entfernt sind und die wir trotzdem sehen können; dabei wird stillschweigend vorausgesetzt, daß diese Körper keine sehr großen Geschwindigkeitskomponenten relativ zu dem Körper haben, dessen Bewegung betrachtet wird. Hier bietet sich uns vor allem der Sternhimmel mit seinen Fixsternen dar. Ein relativ zu den Fixsternen ruhendes Koordinatensystem kann darum nach Newton als absolutes bezeichnet werden. So lange man von einer Eigenbewegung der Fixsterne nichts wusste, genügte dieses Koordinatensystem als Bezugsstandpunkt für alle astronomischen und irdischen Bewegungen; für physikalische und technische Zwecke genügt er auch heute noch mit ausreichender Genauigkeit.

Die Bezugnahme auf die Fixsterne ist nun aber, selbst wenn wir von einer Eigenbewegung derselben absehen, in gewisser Beziehung unbefriedigend, denn sie entspringt nicht aus der Natur der Sache heraus. Die Fixsterne sind jedenfalls etwas Zufälliges, und wir werden mit Neumann¹⁾ annehmen,

¹⁾ Carl Neumann, *Annalen der Physik*, Boltzmann-Festschrift, Leipzig 1901, S. 256–257.

daß es auch ohne Fixsterne absolute Bewegung in der Natur geben würde. Man empfindet deshalb den Wunsch, den Bezugsstandpunkt aus jeder Rotationsbewegung selbst heraus konstruieren zu können. In Anlehnung an Streintz könnte man etwa folgendermaßen verfahren: man denkt sich zu einem bestimmten Zeitmoment in allen Punkten eines rotierenden Körpers die Größe der Zentrifugalkräfte aus den Spannungen und Deformationen des Körpers festgestellt, wobei vorausgesetzt wird, daß äußere elastische, elektrische u. a. Kräfte hier nicht mit im Spiel sind. Man erlangt so eine Übersicht über die vorhandenen Zentrifugalkräfte und kann daraus die Lage der absoluten Rotationsaxe relativ zu dem rotierenden Körper, und ferner die Größe der absoluten Winkelgeschwindigkeit aus bekannten Formeln erschließen. An Hand dieser beiden Daten lassen sich dann beliebig viele ideale Standpunkte, die auf keinem materiellen Körper, wie Fixsternen u. dergl. festzuliegen brauchen, von dem rotierenden Körper aus errichten. Es ließe sich also zu jedem Zeitmoment auf diese Weise ein Standpunkt finden, relativ zu dem die absolute Rotationsbewegung vor sich geht. Die Beschreibung der Bewegung geschähe so zwar ohne Zuhülfenahme von fremden Himmelskörpern, dürfte aber nur von geringer Genauigkeit sein. Das auf den Fixsternen basierte System hat demgegenüber den Vorzug, für praktische Zwecke exakter und einfacher zu sein.

Ein noch anderes Konstruktionsverfahren eines Bezugsstandpunktes für absolute Bewegungen hat W. Thomson¹⁾ angegeben. Lange¹⁾ bezeichnet dieses Koordinatensystem, zu dem man unter Voraussetzung der Gültigkeit des Trägkeitsprinzips geführt wird und das in der Sache mit dem Newtonschen absoluten Koordinatensystem identisch ist, mit dem Namen „Inertialsystem“.

Endlich haben Anding und Seeliger²⁾ ein absolutes Koordinatensystem unabhängig von dem auf den Fixsternen basierten und unabhängig von den Zentrifugalkräften rotierender

¹⁾ Voss, l. c. S. 37 ff.

²⁾ Seeliger, l. c.

Körper konstruiert. Dieses ist auf der sogenannten Laplace'schen Ebene des Planetensystems errichtet und hat die Voraussetzung, daß das Planetensystem nach außen hin isoliert ist. Seeliger kommt zu dem Schluß, daß das empirisch benutzte, auf den Fixsternen basierte System sich in einem Jahrhundert möglicherweise um einige Bogensekunden um dieses Inertialsystem drehen kann. Die Berücksichtigung einer solchen, wenn auch nur kleinen Differenz demonstriert auch dem Nichtastronomen klar, daß das Fixstern-Koordinatensystem zwar mit großer Annäherung, aber keineswegs ganz exakt ein absolutes Koordinatensystem darstellt. Es ist Sache der experimentellen Astronomie, festzustellen, welches auf materielle Systeme aufgebaute System am meisten dem Ideal des Inertialsystems nahe kommt.

Aus den obigen Betrachtungen ergibt sich folgender Schluß: Bei allen Drehbewegungen, welche physikalische Körper gegeneinander ausführen, treten Zentrifugalkräfte auf, deren Größe und Lage an einem Körper unabhängig von der Wahl des phoronomischen Bezugsstandpunktes ist, auf den die Bewegung bezogen werden kann. Da diese Zentrifugalkräfte sich durch eine bestimmte Rotationsbewegung relativ zu einem vor andern ausgezeichneten, auf verschiedene Weisen konstruierbaren Standpunkt erklären lassen, so ist zu schließen, daß jede Rotationsbewegung oder rotatorische Bewegungskomponente eines Körpers als solche, d. h. absolut, Existenz hat. Die absolute Rotationsbewegung muß phoronomisch genau so relativ wie jede andere Bewegung gedacht oder vorgestellt werden; der Bezugsstandpunkt derselben braucht materiell nicht zu existieren und kann auch nur mit gewisser Annäherung an Hand bestimmter, materieller Körper gefunden werden. — Was vor sich ginge, wenn wir einen im Vacuum rotierenden Körper vollständig isoliert im reinen, mathematischen Raum rotieren ließen (vorausgesetzt, daß dies möglich ist), können wir nicht wissen. Die absolute Rotationsbewegung hat daher nur für physikalische Körper im physikalischen Raume der Natur einen bestimmten, angebbaren Sinn.

Die Frage, inwieweit eine ohne Rotation erfolgende, geradlinige oder krummlinige Translation absolut aufgefaßt werden kann, sei hier nur kurz hinsichtlich der ersteren Bewegungsart diskutiert. Da eine im physikalischen Raume vor sich gehende, reine, geradlinige Translation von Naturkörpern keine sicher nachgewiesenen, den Zentrifugalkräften bei der Rotation an die Seite zu stellenden Wirkungen zur Folge hat, so ist zu schließen, daß eine absolute, geradlinige Translation eines Naturkörpers mit unsern heutigen Mitteln unerkennbar ist; ihre Existenz in der Natur kann mithin höchstens als Möglichkeit in Betracht gezogen werden¹⁾. Die Lorentzsche Kontraktionshypothese der Materie nimmt zwar gewisse Effekte, die durch absolute Translation hervorgerufen werden, an, der Nachweis der Richtigkeit dieser Hypothese steht indessen noch aus. Wir können also noch, wenngleich mit Vorbehalt, den Standpunkt Kants teilen, daß zwar absolute Rotationsbewegungen, aber keine absoluten, geradlinigen Translationsbewegungen „möglich“ (soll bedeuten angebbar und erkennbar) sind. Die offenbar schon von Newton geahnte Möglichkeit der physikalischen Erkennung absoluter Translation ist uns aber durch die Lorentzsche Hypothese näher gerückt als je zuvor.

§ 4. Die Möglichkeit absoluter Bewegung ist zuweilen in anderer Form, als oben in § 2 und 3, erörtert worden, indem man die Frage dahin formuliert hat, ob und in wiefern Bewegungen von Körpern relative sind. Man kann z. B. die Erkenntnis Eulers, daß jede translatorische und rotatorische Bewegung eines Körpers ein Substrat erfordert, in die Worte kleiden: alle Bewegungen sind phoronomisch relative. Andererseits folgt aus dem früheren, daß nur die reinen Translationen in bezug auf ihr mechanisches Verhalten als relative anzusehen sind.

Die Relativität der Bewegung ponderabler Körper als besonderer Grundsatz, genannt Relativitätsprinzip, wurde von Einstein²⁾ auf die Elektrodynamik und Optik übertragen, in-

¹⁾ Vgl. Lotze, I. c. S. 7.

²⁾ A. Einstein, Annalen der Physik (4) 17, 891, 1905.

dem er den Satz aufstellte, „daß für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten“. Dieses Prinzip würde man gern recht weit fassen, indem man es außer auf translatorische auch auf rotatorische Bewegungen anwendet. Denn gerade diese letzteren sind für die Wechselwirkungen zwischen Leitern und Magneten von großer Wichtigkeit, und es ist kein physikalischer Grund einzusehen, warum hier ein Unterschied zwischen Translation und Rotation gemacht wird; in der Elektrodynamik sind ja keine Wirkungen, die den Zentrifugalkräften der Mechanik entsprechen würden, bekannt. Trotzdem hat Herr Einstein¹⁾ neuerdings seine Theorie auf genau gleichförmige, geradlinige Translation von Körpern beschränkt. Die Gründe für diese Beschränkung sind keine physikalischen, sondern sie entspringen aus der eigentümlichen Zeitdefinition, die mit der Entwicklung der Theorie verbunden ist. Auch mit der Beschränkung ist aber die Theorie unhaltbar, da sie logisch inkonsequent ist. Denn die Einsteinsche Zeitformel $t' = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, in der t' die Zeit auf einem System bedeutet, das sich gegen ein anderes, auf dem die Zeit t gilt, gleichförmig und geradlinig bewegt, führt m. E. zu einer Bezugnahme auf absolute Translation²⁾; wird doch hiermit ein prinzipieller Unterschied zwischen Ruhe und Bewegung eingeführt. Diesen Unterschied kann man kurz so ausdrücken: die bewegte Uhr läuft langsamer als die ruhende Uhr. Hierdurch wird die Voraussetzung der Relativität zweier Bewegungen ausdrücklich in Hinsicht auf den zeitlichen Ablauf aufgehoben. Um den darin liegenden Widerspruch recht klar zu machen, sei der Fall gleichförmiger, geradliniger Translation zweier Uhren A und B gemäß der Einsteinschen Kinematik betrachtet. Wir wollen voraussetzen, daß die Uhren

1) A. Einstein, Vierteljahrsschr. d. Naturforsch. Gesellsch. Zürich 56, 1, 27. November 1911.

2) Eine Zeitformel $t' = t \cdot a^v$, wo a eine Konstante, wäre mit der Relativität der Bewegungen vereinbar, würde aber die Gleichwertigkeit der Richtungen im Raum ausschließen.

anfangs nebeneinander ruhen, darauf möge die eine von der andern wegbewegt und dann wieder ebenso zurückbewegt werden, sodaß schließlich beide Uhren relativ zueinander wieder ruhen. Diesen Vorgang wollen wir uns einmal so ausgeführt denken, daß wir A als ruhend und B relativ zu A in irgend einer Richtung bewegt auffassen, und das zweite Mal so, daß B ruht und A relativ zu B in entgegengesetzter Richtung, wie zuvor die Uhr A , bewegt gedacht wird. Diese beiden Vorgänge sind dann in relativer Hinsicht völlig gleich. Trotzdem muß gemäß der Einsteinschen Zeitformel im ersten Falle die Zeigerstellung der Uhr B hinter derjenigen von A , im zweiten Falle die Zeigerstellung der Uhr A hinter derjenigen von B zurück sein; zwei relativ zueinander identische Vorgänge führen also hier zu verschiedenen Endzuständen. Dies ist eine unvermeidliche Folgerung, welche besagt, daß die Einsteinsche Zeitdefinition und das Relativitätsprinzip miteinander unvereinbar sind¹⁾. Es mag nochmals betont werden, daß sich dieser Schluß auch bei Beschränkung der Theorie auf genau gleichförmige und geradlinige Translation ergibt. Ich hebe dies besonders hervor, weil nach der von Herrn Einstein vorgenommenen Beschränkung auf genau gleichförmige und geradlinige Translation, aus welcher eigentlich die physikalische Unhaltbarkeit der Theorie zur Genüge erhellt²⁾, vielfach die Ansicht vertreten wird, daß eine besondere, experimentelle Widerlegung der auf gleichförmige Translation beschränkten Theorie (z. B. durch das Dopplersche Prinzip³⁾) nötig wäre. — Ich möchte in diesem Zusammenhang

1) Diese Konsequenz scheint Herrn Einstein trotz seiner, den obigen sehr nahe kommenden Betrachtungen (z. B. Vierteljahrsschrift der Naturforsch. Gesellsch. Zürich, Heft 1 und 2 (ausgegeben am 27. November 1911), S. 12) entgangen zu sein. — In dem Buche von Laue, Das Relativitätsprinzip, Braunschweig 1911 (Vieweg u. Sohn) wird auf S. 40 geäußert, daß in der Einsteinschen Kinematik der Gang zweier relativ zueinander bewegten Uhren unabhängig davon sei, auf welche Uhr man „die Begriffe Ruhe und Bewegung bezieht“.

2) Verhandl. Deutsch. Physikal. Gesellsch. 14, 294, 1912.

3) Vgl. z. B. Einstein, Vierteljahrsschr. d. Naturforsch. Gesellsch. Zürich, S. 13. — M. Laue, l. c. S. 89.

noch kurz erwähnen, daß, falls man in Anlehnung an den oben genannten Einsteinschen Ansatz setzen wollte: $t' = f(v, t)$, wo $f(v, t)$ eine zunächst unbekannte Funktion sein mag, daraus notwendig $f(v, t) = t$ folgt, sobald man die Relativität der Bewegungen und die Gleichartigkeit aller Richtungen im Raume voraussetzt. Die Annahme des Relativitätsprinzips für gleichförmige Translationen schließt also allgemein die Annahme einer Zeit, die vom Bewegungszustand abhängig wäre, aus; in ihr steckt bereits die Voraussetzung, daß die Zeit eines Systems vom Bewegungszustand unabhängig ist.

§ 5. Eine besondere Frage ist die, ob sich ein allgemeines Prinzip der Relativität aufstellen läßt, welches für die Mechanik, Elektrodynamik, Optik usw. gilt und welches besagt, daß immer nur relative Lagen und Bewegungen irgendwelcher Naturkörper zueinander für die beobachtbaren, physikalischen Wirkungen in Betracht kommen. Ein solches allgemeines, physikalisches Prinzip ist zwar undurchführbar, wenn man sich im Anschluß an Herrn Einstein, der den Äther abschaffen wollte, auf ponderable Körper beschränkt, möglicherweise hat es aber Gültigkeit, wenn man sich zu den ponderablen noch geeignete, hypothetische, imponderable Körper (Äther) hinzudenkt. Dann müßten auch die Zentrifugalkräfte durch die phoronomische Bewegung der rotierenden Körper relativ zum Äther gegeben sein¹⁾. Den Gedanken eines derartigen, neuen Relativitätsprinzips finde ich bei Seeliger²⁾. — Im Zusammenhang hiermit sei erwähnt, daß Wiechert³⁾ versucht hat, die reale Existenz des Äthers aus „Relativitätsgesetzen“ zu folgern.

1) E. Gehrcke, Verh. D. Physik. Gesellsch. **13**, 667, Anm. 1, 1911.

2) Seeliger, l. c. S. 91.

3) E. Wiechert, Physikal. Zeitschr. **12**, 687, 737, 1911.