

FORTSCHRITTE DER MATHEMATISCHEN WISSENSCHAFTEN
IN MONOGRAPHIEN · HRSG. VON O. BLUMENTHAL

2

LORENTZ · EINSTEIN · MINKOWSKI
DAS RELATIVITÄTSPRINZIP

B. G. TEUBNER  LEIPZIG · BERLIN

Wolfgang Trageser *Hrsg.*

Das Relativitäts- prinzip

Eine Sammlung von Originalarbeiten
zur Relativitätstheorie Einsteins

2. Auflage



Springer Spektrum

Das Relativitätsprinzip

Wolfgang Trageser

Das Relativitätsprinzip

Eine Sammlung von Originalarbeiten
zur Relativitätstheorie Einsteins

2. Auflage

Beruhet auf dem Werk „Das Relativitätsprinzip -
Eine Sammlung von Abhandlungen, 5. Auflage“
von H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski
erschienen bei Vieweg+Teubner Verlag 1923



Springer Spektrum

Wolfgang Trageser
Institut für Kernphysik
Universität Frankfurt
Frankfurt, Deutschland

ISBN 978-3-662-57410-2
DOI 10.1007/978-3-662-57411-9

ISBN 978-3-662-57411-9 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

Ursprünglich erschienen unter: Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H.: Das Relativitätsprinzip - Eine Sammlung von Abhandlungen, 5. Auflage, 1923

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2016, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature. Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany
(www.springer.com)

Vorworte

Vorwort zur ersten und zweiten Auflage

Minkowskis Vortrag „Raum und Zeit“, der im Jahre 1909 mit einem Vorwort von A. Gutzmer als selbständige Schrift erschienen ist, ist bereits vergriffen. Herr Sommerfeld hat die glückliche Anregung gegeben, die von dem Verlage gewünschte Neuauflage zu einer größeren Publikation zu erweitern, in der die grundlegenden Originalarbeiten über das Relativitätsprinzip zusammengestellt werden sollten. Die freundliche Bereitwilligkeit der Herren H. A. Lorentz und Einstein hat die Ausführung dieses Planes ermöglicht. So enthält dieses Bändchen, als eine Sammlung von Urkunden zur Geschichte des Relativitätsprinzips, die Entwicklung der Lorentzschen Ideen, Einsteins erste große Arbeit und Minkowskis Vortrag, mit dem die Popularität des Relativitätsprinzips einsetzt. Als Ergänzung dient das erste Bändchen dieser Sammlung „Fortschritte der mathematischen Wissenschaften in Monographien“, das die beiden ausführlichen Veröffentlichungen Minkowskis enthält.

Aachen, Mai 1913

OTTO BLUMENTHAL

Vorwort zur dritten Auflage

Die erste und zweite Auflage dieser „Sammlung von Urkunden zur Geschichte des Relativitätsprinzips“ sind vergriffen. Seitdem hat die Erkenntnis einen großen Schritt vorwärts gemacht: Einstein hat das lineare Relativitätsprinzip zum allgemeinen erweitert. Dem mußte bei der Neuauflage Rechnung getragen werden. Sie bringt Einsteins bereits als Buch (bei J. A. Barth) erschienene zusammenfassende Abhandlung „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ und außerdem vier Noten desselben Verfassers, die einerseits den Beginn seiner Gedanken über die allgemeine Relativität kennzeichnen, andererseits die jüngsten, noch unabgeschlossenen Ideebildungen vorführen und für die weitere Entwicklung Wege weisen. So

führt dieser Band durch den Bau der Relativitätstheorie, vom Grundgeschoß bis oben hin, wo noch die Balken frei in die Luft ragen.

Aachen, Oktober 1919

OTTO BLUMENTHAL

Vorwort zur vierten und fünften Auflage

Unerwartet und erfreulich rasch ist eine Neuauflage notwendig geworden. Sie bleibt im wesentlichen unverändert. Jedoch ist die bekannte Abhandlung von Weyl „Gravitation und Elektrizität“ neu hinzugekommen.

Aachen, September 1921 u. 1923

OTTO BLUMENTHAL

Vorwort zur erweiterten und Neubearbeiteten Auflage

Vorwort zur 2. Auflage

Die Vergabe des Nobelpreises für Physik 2017 an die Gravitationswellenpioniere Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish für den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen war neben der guten Resonanz bei den Leserinnen und Lesern einer der Gründe zur Neuauflage dieses Buches.

Einstein bezeichnete die Gravitationswellen als „seltsames Ergebnis“ und war der Überzeugung, dass kaum Hoffnung bestehen würde sie jemals beobachten zu können. Seine frühen Arbeiten über Gravitationswellen wurden nun der Sammlung der Originalarbeiten zur Entwicklung der Relativitätstheorie, die den Zeitraum von 1895 bis 1925 umfasst, hinzugefügt.

Neu in dieser 2. Auflage der erweiterten und neubearbeiteten Ausgabe des Buches sind die Beiträge „Eine neue formale Deutung der Maxwellschen Feldgleichungen der Elektrodynamik“, „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation“ sowie „Über Gravitationswellen“.

Frankfurt am Main, März 2018

WOLFGANG TRAGESER

Vorwort zur 1. Auflage

Der 100. Geburtstag der Allgemeinen Relativitätstheorie im November 2015 ist der Grund dieses klassische Werk zur Geschichte der Relativitätstheorie in erweiterter Form und mit einer Einleitung versehen noch einmal herauszugeben. Die Absicht hierbei war, den Denkweg Einsteins von der Speziellen Relativitätstheorie, über die Allgemeine Relativitätstheorie bis hin zur Einheitlichen Feldtheorie zu skizzieren. Der Versuch einer Einheitlichen Feldtheorie von Gravitation und Elektromagnetismus darf heute wohl als gescheitert angesehen werden. Trotzdem wurde auch auf diese Theorie eingegangen, da Einstein bis zu seinem Tode 1955 nach einer

solchen Vereinigung von zwei Grundkräften gesucht hat. Erfolg war ihm nicht beschieden und die physikalische Forschung ist einen anderen Weg gegangen, den Weg der Quantentheorie. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist noch immer unsere Gravitationstheorie. Als klassische Feldtheorie stellt sie im Rahmen der quantenphysikalischen Konzeption einen Fremdkörper dar. Trotz Aufbietung raffiniertester mathematischer Methoden ist es bis jetzt nicht gelungen eine Quantengravitationstheorie zu schaffen, die die Physiker zufriedenstellt. Damit ist das Problem der Gravitation noch immer ein großes Problem der Physik, das seiner Lösung harret.

Frankfurt am Main, Mai 2015

WOLFGANG TRAGESER

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	XI
Der Interferenzversuch Michelsons	1
Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichts nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt . . .	7
Über die Dynamik des Elektrons	29
Zur Elektrodynamik bewegter Körper	35
Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?	61
Raum und Zeit	65
Das Relativitätsprinzip und seine Anwendung auf einige besondere Erscheinungen	85
Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes	103
Zur allgemeinen Relativitätstheorie	113
Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie	127
Die Feldgleichungen der Gravitation	137
Eine neue formale Deutung der Maxwellschen Feldgleichungen der Elektrodynamik	143
Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation	149
Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie	159

Hamiltonsches Prinzip und allgemeine Relativitätstheorie	205
Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie	211
Über Gravitationswellen	223
Gravitation und Elektrizität	239
Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?	253
Äther und Relativitätstheorie	261
Bietet die Feldtheorie Möglichkeiten für die Lösung des Quantenproblems?	277
Einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität	285
Zitat	293

Einleitung

Die Darlegung der Geschichte eines physikalischen Prinzips bedeutet gleichzeitig, die logische Analyse desselben.

Pierre Duhem (1861–1916)

Die Sammlung von Abhandlungen, „Das Relativitätsprinzip“, wurde 1913 in der von dem Mathematiker Otto Blumenthal herausgegebenen Reihe: „Fortschritte der mathematischen Wissenschaften in Monographien“ als Heft 2 veröffentlicht. Als unveränderter Nachdruck der fünften Auflage von 1923 erlebte sie mehrere Auflagen. „Das Relativitätsprinzip“ ist ein Klassiker in der Literatur über die Relativitätstheorie und steht in einer Reihe mit Büchern über diese Theorie von Max Born, Max von Laue und Hermann Weyl. Otto Blumenthal ist es gelungen mit seiner ersten Veröffentlichung dieses Buches die wichtigsten Arbeiten über Relativitätstheorie einem größeren Publikum zugänglich zu machen. Die vorliegende erweiterte Ausgabe, die Veröffentlichungen bis zum Jahr 1925 enthält, verdankt ihre Entstehung der Tatsache, dass die wissenschaftliche Welt im Jahr 2015 den hundertsten Geburtstag der Allgemeinen Relativitätstheorie begeht.

Otto Blumenthal wurde am 20. Juli 1876 in Frankfurt am Main geboren. Er studierte in Göttingen und München und promovierte 1898 mit der Dissertation „Über die Entwicklung einer willkürlichen Funktion nach den Nennern eines Stieltjes'schen Kettenbruchs“ bei David Hilbert (1862–1943). 1901 habilitierte er sich in Göttingen mit der Arbeit „Modulfunktionen von mehreren Veränderlichen“. Er nahm 1905 eine Berufung an die Technische Hochschule in Aachen an, an der er bis 1933 wirkte. Wegen seiner jüdischen Abstammung musste Blumenthal 1933 seine Lehrtätigkeit aufgeben, obwohl er Christ war und als Soldat im Ersten Weltkrieg gekämpft hatte. Um den Verfolgungen zu entgehen ging er 1939 zu Freunden nach Holland. Von 1924 bis 1933 war er Herausgeber des „Jahresberichts der Deutschen Mathematiker-Vereinigung“. 1906 übernahm er die Schriftleitung der „Mathematischen Annalen“, die er dann 32 Jahre behielt. Nach der Besetzung Hollands durch die Deutsche Wehrmacht, wurde er ins Konzentrationslager Theresienstadt deportiert, wo er am 12. November 1944 gestorben ist.

Ein Prinzip (lat. *principium* = Anfang, Ursprung) – in unserem Fall das Relativitätsprinzip – ist eine wohlbegründete Setzung, als Ausgangspunkt einer physikalischen Theorie. In seiner Bedeutung und Tragweite kann das Relativitätsprinzip mit den allgemeinen Prinzipien der Physik, wie z. B. dem Energieprinzip, dem Pauli-Prinzip oder dem Korrespondenzprinzip verglichen werden. Es ist mit der Entwicklung des Relativitätsgedankens in der Physik, d. h. mit der Entwicklung der Relativitätstheorie, auf Engste verbunden.

Die erste Formulierung des Relativitätsprinzips stammt von Galileo Galilei (1564–1642). Galilei hat in seinem Buch „Dialogo sopra i due massimi sistemi . . .“ (Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme . . .), das 1632 erschien, am Beispiel eines bei ruhiger See mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden unbeschleunigten Schiffes dargelegt, dass ein Beobachter im Inneren dieses Schiffes anhand der ablaufenden mechanischen Vorgänge nicht entscheiden kann, ob es sich bewegt oder in Ruhe befindet.

Durch das *Galileische Relativitätsprinzip*, das auf die Mechanik beschränkt ist, wird festgelegt, dass für alle geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegten Beobachter die mechanischen Bewegungsabläufe gleich verlaufen.

Entscheidend war, dass Galilei prinzipiell keinen Unterschied machte zwischen den Erscheinungen am Himmel und auf der Erde, wie es noch Aristoteles angenommen hatte. Es gab für ihn nur eine Physik. Eine Physik in der am Himmel andere Gesetze galten als auf der Erde war für ihn undenkbar. Es sollte auch kein Bezugssystem vor einem anderen bevorzugt sein. Unter gleichen Bedingungen laufen in zwei Bezugssystemen die Vorgänge gleich ab.

Eine exakte mathematische Formulierung erhielt das Galileische Relativitätsprinzip erst, nachdem Sir Isaac Newton (1643–1727) in seinem Buch „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie) von 1687 das Grundgesetz der Mechanik formuliert hatte.

Bevor Newton die Axiome seiner Mechanik definierte, führte er die Grundbegriffe Raum und Zeit ein. Er unterscheidet in den Principia absolute und relative Zeit und absoluten und relativen Raum. Newton definiert:

Die *absolute, wahre und mathematische Zeit* verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch mit dem Namen Dauer belegt.

Die *relative, scheinbare und gewöhnliche Zeit* ist ein fühlbares und äußerliches, entweder genaues oder ungleiches Maß der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat, Jahr.

Der *absolute Raum* bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand, stets gleich und unbeweglich.

Der *relative Raum* ist ein Maß oder ein beweglicher Teil des ersteren, welcher von unseren Sinnen, durch seine Lage gegen andere Körper bezeichnet und gewöhnlich für den unbeweglichen Raum genommen wird. Zum Beispiel ein Teil des Raumes innerhalb der Erdoberfläche; ein Teil der Atmosphäre; ein Teil des Himmels, bestimmt seine Lage gegen die Erde.

Die Axiome der Mechanik bestimmt er wie folgt:

1. Axiom: Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.
2. Axiom: Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.
3. Axiom: Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Durch die Einführung der Grundbegriffe des Bezugssystems (relativer Raum) und der Trägheit (1. Axiom) gelangt man zum Begriff des *Inertialsystems*. Darunter versteht man ein physikalisches Bezugssystem, in dem keine Trägheitskräfte auftreten, in dem sich also jeder kräftefreie Massenpunkt gemäß dem Trägheitsprinzip bewegt.

Das *Galileische Relativitätsprinzip* (Relativitätsprinzip der Klassischen Mechanik) lässt sich jetzt exakter formulieren:

Alle Inertialsysteme sind für die Beschreibung mechanischer Vorgänge gleichwertig, d. h. die Gesetze der Mechanik sind bei dem Übergang von einem Inertialsystem zu einem beliebig anderen Inertialsystem invariant.

Um das Relativitätsprinzip auch mathematisch exakt formulieren zu können führt man eine einfache Koordinatentransformation ein durch die die physikalischen Gesetze von einem Bezugssystem in ein anderes umgerechnet werden können. Diese Koordinatentransformation ist die *Galilei-Transformation*. Sie hat die folgende einfache Form:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

Für die Klassische Mechanik ist das Relativitätsprinzip von grundlegender Bedeutung, weil es fordert, dass die Gesetze der Physik invariant bezüglich der Galilei-Transformation sein sollen.

Die Weiterentwicklung der Physik auf dem Teilgebiet der Optik, wo sich die Anhänger der Teilchentheorie des Lichtes und der Wellentheorie des Lichtes gegenüberstanden, machte es nötig, gemäß dem mechanischen Weltbild, einen Träger für die Lichtwellen in der Wellenoptik einzuführen, eine hypothetische Substanz, den *Äther* (auch Lichtäther oder Weltäther). Man hatte die Vorstellung, dass sich Lichtwellen in ähnlicher Weise in einem Medium ausbreiten müssten, wie Schall- und Wasserwellen.

Einen weiteren großen Schritt in der Entwicklung der Physik bildeten die Entdeckungen von Michael Faraday (1791–1867) und die Arbeiten von James Clerk Maxwell (1831–1879) zum Elektromagnetismus. So konnte Maxwell z. B. Faradays Vermutung bestätigen, dass es sich beim Licht um eine transversale Wellenbewegung handelt. Durch die Ausarbeitung seiner *elektromagnetische Feldtheorie* gelangte Maxwell 1864 zur Grundlage der gesamten Elektrodynamik, zu den *Maxwellschen Gleichungen*, durch die man alle elektromagnetischen Entdeckungen Faradays erklären konnte. Trotzdem blieb das Modell zur Erklärung der elektromagnetischen Erscheinungen immer noch die Mechanik.

Faraday war es auch, der versuchte, angeregt durch eine Arbeit des italienischen Physikers Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791–1863), die Gravitation auf elektrische Kräfte zurückzuführen. 1849 versuchte er experimentell den Zusammenhang zwischen Gravitation und Elektrizität nachzuweisen, was ihm jedoch nicht gelang.

Heinrich Hertz (1857–1894) erbrachte den Nachweis, dass Lichtwellen und elektromagnetische Wellen, sich auf die gleiche Art und mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten und somit wesensgleich sind. Dies war eine weitere Bestätigung für die Maxwellsche elektromagnetische Feldtheorie.

Wie bereits erwähnt, beruhte die Elektrodynamik bis zum Ende des 19. Jahrhunderts auf dem Äther, als dem Träger der elektromagnetischen Wellen, der den ganzen Weltraum gleichmäßig erfüllen sollte. Die Maxwellschen Gleichungen und die aus ihnen resultierende konstante Lichtgeschwindigkeit c als der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen waren jedoch mit der Galilei-Transformation und damit mit dem Relativitätsprinzip der Klassischen Mechanik nicht vereinbar.

Die Vorstellung des Äthers war mit zahlreichen Widersprüchen behaftet. Da das Licht eine transversale Wellenbewegung darstellt, sollte er die Eigenschaften eines Festkörpers haben. Andererseits sollten andere Körper sich unbehindert durch ihn hindurch bewegen können. Er sollte als Träger der Lichtwellen alle lichtdurchlässigen Körper durchdringen und sollte bei der Bewegung eines solchen Körpers mitgeführt werden. Da die Erde sich mit einer Bahngeschwindigkeit von ca. 30 km/s durch den ruhenden Äther bewegt, nahm man an, dass dabei ein Ätherwind entstehen muss.

Henri Poincaré (1854–1912) war davon überzeugt, dass der Äther durch physikalische Messungen nicht erfahrbar und eine absolute Bewegung nicht nachweisbar ist. Er erbrachte auch den Nachweis, dass das Relativitätsprinzip der Klassischen Mechanik nicht ohne eine Modifikation auf die Elektrodynamik übertragen werden kann.

1881 machte Albert Abraham Michelson (1852–1931) einen Versuch mit einem Interferometer, das zum Ziel hatte die Bewegung der Erde relativ zum ruhenden Äther auf ihrer Bahn um die Sonne nachzuweisen. Der Versuch wurde 1887 mit verbesserter Technik von Michelson und Edward W. Morley (1838–1923) mit dem gleichen Ergebnis wiederholt und erlangte als *Michelson-Morley-Experiment* Berühmtheit.

Michelson verglich in seinem Experiment die Zeiten miteinander, die das Licht brauchte, um zwei gleichlange Strecken zu durchlaufen, von denen eine in Richtung

der Erdbewegung und die andere senkrecht zu ihr angeordnet waren. Die Messergebnisse zeigten, dass sich das Licht in beiden Bewegungsrichtungen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitete. Der Ausgang des Experimentes ist mit einem ruhenden Äther als Träger der Lichtwellen nicht vereinbar. Auch ein Ätherwind, der die Ausbreitung des Lichtes beeinflusst haben müsste, konnte damit ausgeschlossen werden. Der negative Ausgang des Michelson-Morley-Experimentes hat nicht nur die weitere Entwicklung der Physik maßgeblich beeinflusst, es ergab sich auch die Schwierigkeit sich eine Wellenbewegung im Raum ohne einen materiellen Träger vorzustellen, denn die Physiker standen ja noch immer unter dem Einfluss des mechanischen Paradigmas. Allmählich begann man sich von der Vorstellung des Lichtes als einer elastischen Wellenbewegung zu lösen und dem Licht als elektromagnetischer Welle eine selbständige Realität zuzuerkennen. Die Vorstellung des physikalischen Feldes trat jetzt immer mehr in den Vordergrund. Es ergab sich die Notwendigkeit ein modifiziertes Relativitätsprinzip zu finden, das sowohl für die Mechanik als auch für die Elektrodynamik gültig war.

Der negative Ausgang des Michelson-Morley-Experimentes widersprach der Annahme eines ruhenden Äthers. Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) konnte dieses Problem der Nichtnachweisbarkeit des ruhenden Äthers, an dem Lorentz in seiner Äthertheorie festhielt, durch die Einführung einer geeigneten Transformation – der *Lorentz-Transformation* – lösen.

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}\end{aligned}$$

Die *Lorentzsche Äthertheorie* behauptete, dass sich die Längenmaßstäbe bei einer Bewegung in Bewegungsrichtung verkürzen (Längenkontraktion) und dass bei bewegten Uhren die Zeit langsamer verläuft (Zeitdilatation). Der Nachteil der Lorentzschen Äthertheorie bestand vor allem darin, dass er an einem bevorzugten Bezugssystem, dem ruhenden Äther, festhielt, was dem Relativitätsprinzip widerspricht. Henri Poincaré, welcher der Lorentz-Transformation in seiner Arbeit „Über die Dynamik des Elektrons“ von 1905 ihren Namen gab, verwarf hingegen das Ätherkonzept. Er war es auch der der Speziellen Relativitätstheorie am nächsten kam.

In seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ von 1905 führte Einstein ein modifiziertes Relativitätsprinzip ein, das auf den folgenden Voraussetzungen beruht:

1. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c . In Bezug auf jedes Inertialsystem wird im Vakuum die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts gemessen.

2. Innerhalb eines abgeschlossenen Systems ist es unmöglich durch Messungen zu entscheiden ob das System sich gleichförmig bewegt oder nicht (Galileisches Relativitätsprinzip oder Klassisches Relativitätsprinzip).

Aus diesen Voraussetzungen entwickelte Einstein die *Spezielle Relativitätstheorie*. Im Mittelpunkt dieser Theorie steht das *Spezielle Relativitätsprinzip* mit der Lorentz-Transformation. Das Spezielle Relativitätsprinzip Einsteins gilt sowohl für die Gesetze der Mechanik als auch für die Gesetze der Elektrodynamik. Es legt den physikalischen Gesetzen eine Beschränkung auf, indem es fordert, dass nur Gesetze gelten sollen, die gegen Lorentz-Transformation invariant sind. Einstein schreibt in seiner Arbeit gleich zu Beginn: „... die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche Voraussetzung einführen, daß sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit V fortpflanze. Diese beiden Voraussetzungen genügen, um zu einer einfachen und widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper zu gelangen unter Zugrundelegung der Maxwellschen Theorie für ruhende Körper. Die Einführung eines „Lichtäthers“ wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelnden Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter „absolut ruhender Raum“ eingeführt, noch einem Punkte des leeren Raumes, in welchem elektromagnetische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird.“

Damit hat der von Newton eingeführte absolute Raum und der in der Lorentz-schen Theorie beibehaltene absolut ruhende Äther ihren Sinn verloren. Das gleiche gilt für die absolute Zeit (Weltzeit). In der Speziellen Relativitätstheorie sind nur die relative Zeit (Uhr) und der relative Raum (Bezugssystem, Inertialsystem) von Bedeutung.

Das *Spezielle Relativitätsprinzip* hat den folgenden Inhalt:

Die Gesetze der Physik besitzen für zwei Beobachter, die sich in geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegten Inertialsystemen befinden, dieselbe Form.

Mit der Begründung der Speziellen Relativitätstheorie hat Einstein eine einschneidende Revision der physikalischen Grundlagen vollzogen. An die Stelle der Klassischen Physik Newtons tritt jetzt die Spezielle Relativitätstheorie, die die Klassische Physik als Grenzfall enthält. Die Beschränkung der Speziellen Relativitätstheorie auf Inertialsysteme empfand Einstein schon 1907 als unbefriedigend und begann sich Gedanken über eine mögliche Verallgemeinerung zu machen.

Bei Newton waren Raum und Zeit zwei getrennte, wohlunterschiedene Bereiche. Hermann Minkowski (1864–1909) hat dies geändert, indem er in seinem Vortrag

„Raum und Zeit“ von 1908 auf die Vierdimensionalität unserer Welt hinwies und das Raum-Zeit-Kontinuum einführte. Minkowski legte folgenden Sachverhalt dar: „Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken, und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.“ Es ist zu bemerken, dass Minkowski auf dem Boden des sogenannten „elektromagnetischen Weltbildes“ stand, einer elektro-magnetischen Theorie der Materie, die besonders nach 1900 an Bedeutung gewann und die auch Einstein eine gewisse Zeit vertrat. Dieses elektromagnetische Weltbild sollte das mechanische Weltbild ersetzen und Minkowski schreibt am Ende seines Vortrages: „Die ausnahmslose Gültigkeit des Weltpostulates ist, so möchte ich glauben, der wahre Kern eines elektromagnetischen Weltbildes, der von Lorentz getroffen, von Einstein weiter herausgeschält, nachgerade vollends am Tage liegt.“

Die neuen Ideen fanden einen konkreten Niederschlag in der Arbeit von Einstein und Grossmann aus dem Jahre 1913, die den Titel „Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation“ trägt.

Als Einstein am 2. Juli 1914 seine Antrittsrede vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften hielt, brachte er ein Forschungsprogramm mit, das in seiner Zielsetzung die Allgemeine Relativitätstheorie enthielt und in späteren Jahren dahingehend erweitert wurde, dass die elektro-magnetische und die gravitative Wechselwirkung vereinigt werden sollten (Einstein-Programm). Auch hier ging es ihm zuerst einmal darum, das Spezielle Relativitätsprinzip von der Beschränkung auf Inertialsysteme zu befreien und auf beschleunigte Bezugssysteme auszudehnen.

Dieses *Allgemeine Relativitätsprinzip* forderte die Gleichberechtigung aller Bezugssysteme und kommt in der Forderung nach Kovarianz zum Ausdruck, die Einstein in seiner berühmten Arbeit „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“ 1916 folgendermaßen formuliert hat:

Die allgemeinen Naturgesetze sind durch Gleichungen auszudrücken, die für alle Koordinatensysteme gelten, d. h. die beliebigen Substitutionen kovariant (allgemein kovariant) sind.

Die im Allgemeinen Relativitätsprinzip ausgesprochene Forderung nach Kovarianz der Naturgesetze bildet den Kern der Allgemeinen Relativitätstheorie, der sich prinzipiell auf die gesamte Physik erstreckt, da hinsichtlich der Form der physikalischen Gesetze schlechthin ein Anspruch erhoben wird.

Wie kam es nun von der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Einstein-Programm?

Der Physiker, der in den Jahren von 1912 bis 1913 eine Überwindung des Gegensatzes von Feld und Materie anstrebte und nach einer feldtheoretischen Lösung dieses Problems im Rahmen einer Materietheorie suchte, war Gustav Mie (1868–1957). Der Einfluss der von den Ideen Mies auf Einstein und das spätere Einstein-Programm ausgegangen ist muss nachdrücklich betont werden. Mie steht in einer Reihe bedeutender Physiker, die die Entwicklung der Elektrodynamik gerade in Deutschland maßgeblich gefördert haben (wie z. B. August Föppl und Max Abraham) und in der Nachfolge von Faraday, Maxwell und Lorentz das mechanistische

Weltbild durch ein elektromagnetisches zu ersetzen trachteten. Von Mie stammt auch die Idee Feld und Teilchen nicht als unterschiedliche Grundgrößen aufzufassen. An diese Ideen Mies hat Einstein unmittelbar angeknüpft.

Nachdem Einstein im April 1914 nach Berlin umgezogen war, ereignete sich zwischen ihm und den Göttinger Mathematikern um Hilbert und Klein ein regelrechter Wettstreit um die Aufstellung der Feldgleichungen der Gravitation. Hilbert legte am 20. November 1915 seine endgültige Fassung der Feldgleichungen der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaft vor. Einstein folgte am 25. November mit seiner Arbeit „Die Feldgleichungen der Gravitation“ und formulierte damit die Vollendung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

David Hilbert (1862–1943) ging es nicht nur um die Gravitationsgleichung, seine Ziele waren weiter gesteckt. Hilbert hatte eingesehen, dass folgender Zustand in der Physik vorlag, den er in seiner Arbeit „Die Grundlagen der Physik“ von 1915 wie folgt formulierte:

„Das mechanische Einheitsideal in der Physik, wie es von den großen Forschern der vergangenen Generation geschaffen und noch während der Herrschaft der klassischen Elektrodynamik festgehalten worden war, muß heute endgültig aufgegeben werden. Durch die Aufstellung und Entwicklung des Feldbegriffes bildete sich allmählich eine neue Möglichkeit für die Auffassung der physikalischen Welt aus. Mie zeigte als der erste einen Weg, auf dem dieses neuentstandene ‚feldtheoretische Einheitsideal‘, wie ich es nennen möchte, der allgemeinen Behandlung zugänglich gemacht werden kann. Während die alte mechanistische Auffassung unmittelbar die Materie selbst als Ausgang nimmt und diese als durch eine endliche Auswahl diskreter Parameter bestimmt ansetzt, dient vielmehr dem neuen feldtheoretischen Ideal das physikalische Kontinuum, die sogenannte Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit, als Fundament. Waren früher Differentialgleichungen mit einer unabhängigen Variablen die Form der Weltgesetze, so sind jetzt notwendig partielle Differentialgleichungen ihre Ausdrucksform.“

Hilbert wollte mit seiner Arbeit eine axiomatische Welttheorie vorlegen, die auch die Geheimnisse der Atomstruktur lösen sollte. Er glaubte mit seiner Theorie die Probleme von Mie und Einstein gelöst zu haben, räumte aber weitblickend ein:

„Ich glaube sicher, daß die hier von mir entwickelte Theorie einen bleibenden Kern enthält und einen Rahmen schafft innerhalb dessen für den künftigen Aufbau der Physik im Sinne eines feldtheoretischen Einheitsideals gegenüber Spielraum da ist. Auch ist auf jeden Fall von erkenntnistheoretischem Interesse zu sehen, wie die wenigen einfachen in den Axiomen I, II, III, IV von mir ausgesprochenen Annahmen zum Aufbau der ganzen Theorie genügend sind. Ob freilich das reine feldtheoretische Einheitsideal ein definitives ist, evtl. welche Ergänzung und Modifikationen desselben nötig sind, um insbesondere die theoretische Begründung für die Existenz des Elektrons und des Protons, sowie den widerspruchsfreien Aufbau der im Atominneren geltenden Gesetze zu ermöglichen, – dies zu beantworten ist die Aufgabe der Zukunft.“

Eine weitere wichtige Station in der Entwicklung des Einstein-Programmes und einer Einheitlichen Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität, bildete die Arbeit „Gravitation und Elektrizität“, die der Mathematiker Hermann Weyl (1885–1955)

1918 an Einstein mit der Bitte um Vorlage bei der Preußischen Akademie übersandte. Weyl hatte in dieser Abhandlung durch die Weiterentwicklung des absoluten Differentialkalküls und der Nichtriemannschen Differentialgeometrie, sowie einer neuen Deutung der Maxwell'schen Gleichungen eine Verallgemeinerung der Allgemeinen Relativitätstheorie des Gravitationsfeldes und des elektromagnetischen Feldes interpretiert. Die Arbeit Weyls umreißt nicht nur in ihrem Titel das Einstein-Programm, sie ist der erste Wirkliche Beitrag zur Einheitlichen Feldtheorie überhaupt. Und dass dieses Programm in der Zeit von 1918 bis 1921 langsam Gestalt annahm, lässt sich daran erkennen, dass die Arbeit Weyls eine Anzahl von Folgearbeiten auslöste, die sich direkt oder indirekt auf seine Veröffentlichung bezogen. Theodor Kaluza (1885–1954) veröffentlichte 1921 seine fünfdimensionale Theorie, die die Raum-Zeit-Struktur der Allgemeinen Relativitätstheorie um eine räumliche Dimension erweiterte, um damit das Problem der Vereinheitlichung von Gravitation und Elektrizität zu lösen. 1922 legte der französische Mathematiker Elie Cartan (1869–1951) eine Nichtriemannsche Geometrie zur Lösung des Problems vor und Erwin Schrödinger (1887–1961) versuchte im gleichen Jahr die Theorie Weyls mit den Quantenbedingungen von Niels Bohr (1885–1962) und Arnold Sommerfeld (1868–1951) zu verbinden. Diese Arbeiten motivierten auch Einstein, der die Einbeziehung der Mikrophysik in die Einheitliche Feldtheorie anstrebte und immer darum bemüht war, das Quantenproblem im Rahmen der Einheitlichen Feldtheorie zu lösen.

In den Jahren 1921 bis 1923 konzentrierte sich Einstein immer mehr auf das Problem der Einheitlichen Feldtheorie und entwickelte eine mit dieser Theorie verbundene philosophische Konzeption die er in mehreren Vorträgen und Aufsätzen der Öffentlichkeit vorstellte, so dass sein Name bald völlig mit diesem physikalischen Forschungsprogramm identifiziert wurde.

Den Ausgangspunkt für die philosophische Konzeption des Einstein-Programmes bildete Einsteins, nach Abschluss der Allgemeinen Relativitätstheorie gewonnene Einsicht, dass nun zwei erfolgreiche physikalische Theorien vorhanden seien, die Quantentheorie und die Relativitätstheorie. Damit war ein Zwischenzustand in der Physik erreicht, ohne dass ein einheitliches theoretisches Fundament für eine zukünftige Physik vorhanden war. Einstein beschäftigte die Frage, wie ein solches Fundament aussehen könnte. Er erkannte die Leistungen der Quantentheorie an, ohne in dieser Theorie einen brauchbaren Ausgangspunkt für eine künftige Entwicklung zu sehen. Einsteins Weg war der des „feldtheoretischen Einheitsideals“ (Hilbert), d. h. er konnte sich eine einheitliche physikalische Grundlage nur im Rahmen einer erweiterten Relativitätstheorie, d. h. im Rahmen einer klassischen Feldtheorie vorstellen. Um dieses feldtheoretische Einheitsideal zu verwirklichen, entwickelte er sein Forschungsprogramm. Es besteht im Wesentlichen aus folgenden Punkten:

1. Lösung des Feld-Teilchen-Problems (Dualismus von Feld und Materie) zugunsten des Feldes, d. h. Betrachtung des Feldes als des einzig Realen.
2. Betrachtung der Teilchen als Regionen im Raum in denen das Feld besonders stark ist.

3. Umwandlung der Feldgesetze, so dass sie auch dort nicht versagen, wo große Energiemengen konzentriert sind.
4. Verknüpfung von Gravitationsfeld und elektromagnetischem Feld zu einem Gesamtfeld (totales Feld).
5. Lösung des Quantenproblems im Rahmen der Einheitlichen Feldtheorie.
6. Entwicklung eines neuen philosophischen Weltbildes, das zu einer Deutung aller Naturvorgänge mittels struktureller Gesetze führt.

Im Mittelpunkt der philosophischen Grundkonzeption des Einstein-Programmes steht Einsteins „Feld-Monismus“, der durch den Begriff des Gesamtfeldes oder totalen Feldes zum Ausdruck kommt.

In Einsteins philosophischer Konzeption ist der Gegensatz zwischen Geometrie und Materie aufgehoben. Wie in den Philosophien von Descartes und Spinoza ist die Substanz gleichzeitig Geometrie und Materie. Im Begriff des Gesamtfeldes verbindet sich die Philosophie Spinozas und die Physik Einsteins zu einer Einheit. Das Gesamtfeld der Einheitlichen Feldtheorie ist – wie die Allsubstanz Spinozas – *causa sui*, d. h. Ursache seiner selbst und *natura naturans* (schaffende Natur) aus dem die *natura naturata* (geschaffene Natur) hervorgeht. Es ist in der Konzeption Einsteins die letzte Realität. Mit der Idee des Gesamtfeldes will Einstein die Überwindung des Dualismus von Materie und Feld zugunsten des Feldes erreichen und den Weg für eine reine Feldphysik frei machen.

Die Grundform einer Einheitlichen Feldtheorie, an der sich alle weiteren Arbeiten Einsteins orientierten, legte er am 9. Juli 1925 der Preußischen Akademie vor. Sie trägt den Titel „Einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität“. Es ist interessant, dass Einstein diese Arbeit mit den Worten beginnt: „Die Überzeugung von der Wesenseinheit des Gravitationsfeldes und des elektromagnetischen Feldes dürfte heute bei den theoretischen Physikern, die auf dem Gebiete der allgemeinen Relativitätstheorie arbeiten, feststehen.“

Der Interferenzversuch Michelsons

Hendrik Antoon Lorentz

aus: Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern (Leiden 1895)

Der Interferenzversuch Michelsons.

VON H. A. LORENTZ.¹⁾

1. Wie zuerst von Maxwell bemerkt wurde und aus einer sehr einfachen Rechnung folgt, muß sich die Zeit, die ein Lichtstrahl braucht, um zwischen zwei Punkten A und B hin und zurück zu gehen, ändern, sobald diese Punkte, ohne den Äther mit sich fortzuführen, eine gemeinschaftliche Verschiebung erleiden. Die Veränderung ist zwar eine Größe zweiter Ordnung; sie ist jedoch groß genug, um mittelst einer empfindlichen Interferenzmethode nachgewiesen werden zu können.

Der Versuch wurde im Jahre 1881 von Herrn Michelson ausgeführt.²⁾ Sein Apparat, eine Art Interferentialrefraktor, hatte zwei gleich lange, horizontale, zueinander senkrechte Arme P und Q , und von den beiden miteinander interferierenden Lichtbündeln ging das eine längs dem Arme P und das andere längs dem Arme Q hin und zurück. Das ganze Instrument, die Lichtquelle und die Beobachtungsvorrichtung miteinander begreifen, ließ sich um eine vertikale Achse drehen, und es kommen besonders die beiden Lagen in Betracht, bei denen der Arm P oder der Arm Q so gut wie möglich die Richtung der Erdbewegung hatte. Es wurde nun, auf Grund der Fresnelschen Theorie, eine Verschiebung der Interferenzstreifen bei der Rotation aus der einen jener „Hauptlagen“ in die andere erwartet.

Von dieser durch die Änderung der Fortpflanzungszeiten bedingten Verschiebung — wir wollen dieselbe der Kürze halber die Maxwellsche Verschiebung nennen — wurde aber keine Spur gefunden, und so meinte Herr Michelson denn schließen zu dürfen, daß der Äther bei der Bewegung der Erde nicht in Ruhe bleibe, eine Folgerung freilich, deren Richtigkeit bald in Frage gestellt wurde. Durch ein Versehen hatte nämlich Herr Michelson die nach der Theorie zu erwartende Veränderung der Phasendifferenzen auf das Doppelte des richtigen Wertes veranschlagt; verbessert man diesen Fehler, so gelangt man zu Verschiebungen, die durch Beobachtungsfehler gerade noch verdeckt werden konnten.

1) Aus: Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern (Leiden 1895), §§ 89—92.

2) Michelson, American Journal of Science (3) 22 (1881) S. 120.

Math. Monogr. 2: Einstein, Lorentz, Minkowski, Relativitätsprinzip.

In Gemeinschaft mit Herrn Morley hat dann später Herr Michelson die Untersuchung wieder aufgenommen¹⁾, wobei er, zur Erhöhung der Empfindlichkeit, jedes Lichtbündel durch einige Spiegel hin und her reflektieren ließ. Dieser Kunstgriff gewährte denselben Vorteil, als wenn die Arme des früheren Apparates beträchtlich verlängert worden wären. Die Spiegel wurden von einer schweren, auf Quecksilber schwimmenden, und also leicht drehbaren Steinplatte getragen. Im ganzen hatte jetzt jedes Bündel einen Weg von 22 Metern zu durchlaufen, und war nach der Fresnelschen Theorie, beim Übergange von der einen Hauptlage zur anderen, eine Verschiebung von 0,4 der Streifendistanz zu erwarten. Nichtsdestoweniger ergaben sich bei der Rotation nur Verschiebungen von höchstens 0,02 der Streifendistanz; dieselben dürften wohl von Beobachtungsfehlern herrühren.

Darf man nun auf Grund dieses Resultates annehmen, daß der Äther an der Bewegung der Erde teilnehme und also die Stokessche Aberrationstheorie die richtige sei? Die Schwierigkeiten, auf welche diese Theorie bei der Erklärung der Aberration stößt, scheinen mir zu groß zu sein, als daß ich dieser Meinung sein könnte, und nicht vielmehr versuchen sollte, den Widerspruch zwischen der Fresnelschen Theorie und dem Michelsonschen Ergebnis zu beseitigen. In der Tat gelingt das mittelst einer Hypothese, welche ich schon vor einiger Zeit ausgesprochen habe²⁾, und zu der, wie ich später erfahren habe, auch Herr Fitzgerald³⁾ gelangt ist. Worin dieselbe besteht, soll der nächste Paragraph zeigen.

2. Zur Vereinfachung wollen wir annehmen, daß man mit einem Instrumente wie dem bei den ersten Versuchen benutzten arbeite, und daß bei der einen Hauptlage der Arm P genau in die Richtung der Erdbewegung falle. Es sei p die Geschwindigkeit dieser Bewegung und L die Länge jedes Armes, mithin $2L$ der Weg der Lichtstrahlen. Nach der Theorie⁴⁾ bewirkt dann die Translation, daß die Zeit, in der das eine Lichtbündel an P entlang hin und zurück geht, um

$$L \cdot \frac{p^2}{V^2}$$

länger ist als die Zeit, in der das andere Bündel seinen Weg vollendet. Eben diese Differenz würde auch bestehen, wenn, ohne daß die Translation einen

1) Michelson and Morley, American Journal of Science (3) 34 (1887) S. 333; Phil. Mag. (5) 24 (1887) S. 449.

2) Lorentz, Zittingsverslagen der Akad. v. Wet. te Amsterdam, 1892—93, S. 74.

3) Wie Herr Fitzgerald mir freundlichst mitteilte, hat er seine Hypothese schon seit längerer Zeit in seinen Vorlesungen behandelt. In der Literatur habe ich dieselbe nur bei Herrn Lodge, in der Abhandlung „Aberration problems“ (London Phil. Trans. 184 A (1893) S. 727), erwähnt gefunden.

4) Vgl. Lorentz, Arch. néerl. 21 (1887) S. 168—176.

Einfluß hätte, der Arm P um $L \cdot \frac{v^2}{2V^2}$

länger wäre als der Arm Q . Ähnliches gilt von der zweiten Hauptlage.

Wir sehen also, daß die von der Theorie erwarteten Phasendifferenzen auch dadurch entstehen könnten, daß bei der Rotation des Apparates bald der eine, bald der andere Arm die größere Länge hätte. Daraus folgt, daß dieselben durch entgegengesetzte Veränderungen der Dimensionen kompensiert werden können.

Nimmt man an, daß der in der Richtung der Erdbewegung liegende Arm um

$$L \cdot \frac{v^2}{2V^2}$$

kürzer sei als der andere, und zugleich die Translation den Einfluß habe, der sich aus der Fresnelschen Theorie ergibt, so ist das Resultat des Michelsonschen Versuches vollständig erklärt.

Man hätte sich sonach vorzustellen, daß die Bewegung eines festen Körpers, etwa eines Messingstabes, oder der bei den späteren Versuchen benutzten Steinplatte, durch den ruhenden Äther hindurch einen Einfluß auf die Dimensionen habe, der, je nach der Orientierung des Körpers in Bezug auf die Richtung der Bewegung, verschieden ist. Würden z. B. die der Bewegungsrichtung parallelen Dimensionen im Verhältnis von 1 zu $1 + \delta$ und die zu derselben senkrechten im Verhältnis von 1 zu $1 + \varepsilon$ geändert, so müßte.

$$(1) \quad \varepsilon - \delta = \frac{v^2}{2V^2} \quad \text{sein.}$$

Es bliebe hierbei der Wert einer der Größen δ und ε unbestimmt. Es könnte $\varepsilon = 0$, $\delta = -\frac{v^2}{2V^2}$ sein, aber auch $\varepsilon = \frac{v^2}{2V^2}$, $\delta = 0$, oder $\varepsilon = \frac{v^2}{4V^2}$, und $\delta = -\frac{v^2}{4V^2}$.

3. So befremdend die Hypothese auch auf den ersten Blick erscheinen mag, man wird dennoch zugeben müssen, daß sie gar nicht so fern liegt, sobald man annimmt, daß auch die Molekularkräfte, ähnlich wie wir es gegenwärtig von den elektrischen und magnetischen Kräften bestimmt behaupten können, durch den Äther vermittelt werden. Ist dem so, so wird die Translation die Wirkung zwischen zwei Molekülen oder Atomen höchstwahrscheinlich in ähnlicher Weise ändern, wie die Anziehung oder Abstoßung zwischen geladenen Teilchen. Da nun die Gestalt und die Dimensionen eines festen Körpers in letzter Instanz durch die Intensität der Molekularwirkungen bedingt werden, so kann dann auch eine Änderung der Dimensionen nicht ausbleiben.

In theoretischer Hinsicht wäre also nichts gegen die Hypothese einzuwenden. Was die experimentelle Prüfung derselben betrifft, so ist zunächst zu bemerken, daß die in Rede stehenden Verlängerungen und Verkürzungen außerordentlich klein sind. Es ist $p^2/V^2 = 10^{-8}$, und somit würde, falls man $\varepsilon = 0$ setzt, die Verkürzung des einen Durchmessers der Erde etwa 6,5 cm betragen. Die Länge eines Meterstabes aber änderte sich, wenn man ihn aus der einen Hauptlage in die andere überführte, um $\frac{1}{200}$ Mikron. Wollte man so kleine Größen wahrnehmen, so könnte man sich wohl nur von einer Interferenzmethode Erfolg versprechen. Man hätte also mit zwei zueinander senkrechten Stäben zu arbeiten und von zwei miteinander interferierenden Lichtbündeln das eine an dem ersten und das andere an dem zweiten Stabe entlang hin- und hergehen zu lassen. Hierdurch gelangte man aber wieder zu dem Michelsonschen Versuch und würde bei der Rotation gar keine Verschiebung der Streifen wahrnehmen. Umgekehrt wie wir es früher ausdrückten, könnte man jetzt sagen, daß die aus den Längenänderungen hervorgehende Verschiebung durch die Maxwellsche Verschiebung kompensiert werde.

4. Es ist beachtenswert, daß man gerade zu den oben vorausgesetzten Veränderungen der Dimensionen geführt wird, wenn man *erstens*, ohne die Molekularbewegung zu berücksichtigen, annimmt, daß in einem sich selbst überlassenen festen Körper die auf ein beliebiges Molekül wirkenden Kräfte, Anziehungen oder Abstoßungen, einander das Gleichgewicht halten, und *zweitens* — wozu freilich kein Grund vorliegt — auf diese Molekularkräfte das Gesetz anwendet, das wir früher¹⁾ für die elektrostatischen Wirkungen abgeleitet haben. Versteht man nämlich jetzt unter S_1 und S_2 nicht, wie an jener Stelle, zwei Systeme geladener Teilchen, sondern zwei Systeme von Molekülen — das zweite ruhend und das erste mit der Geschwindigkeit p in der Richtung der x -Achse —, zwischen deren Dimensionen die früher angegebene Beziehung besteht, und nimmt man an, daß in beiden Systemen die x -Komponenten der Kräfte dieselben seien, die y - und z -Komponenten sich aber durch den Faktor $\sqrt{1 - \frac{p^2}{V^2}}$ voneinander unterscheiden, so ist klar, daß sich die Kräfte in S_1 aufheben werden, sobald dies in S_2 geschieht. Ist demnach S_2 der Gleichgewichtszustand eines ruhenden festen Körpers, so haben in S_1 die Moleküle gerade diejenigen Lagen, in denen sie unter dem Einflusse der Translation verharren können. Die Verschiebung würde diese Lagerung natürlich von selbst herbeiführen und also nach den an der genannten Stelle gegebenen Formeln eine Verkürzung in der Be-

1) Nämlich in § 23 des Buches: Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern.

wegungsrichtung im Verhältnis von 1 zu $\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}$ bewirken. Dieses führt zu den Werten

$$\delta = -\frac{v^2}{2V^2}, \quad \varepsilon = 0,$$

was mit (1) übereinstimmt.

In Wirklichkeit befinden sich die Moleküle eines Körpers nicht in Ruhe, sondern es besteht in jedem „Gleichgewichtszustande“ eine stationäre Bewegung. Inwiefern dieser Umstand bei der betrachteten Erscheinung von Einfluß ist, möge dahingestellt bleiben; jedenfalls lassen die Versuche der Herren Michelson und Morley wegen der unvermeidlichen Beobachtungsfehler einen ziemlich weiten Spielraum für die Werte von δ und ε .

Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichts nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt

Hendrik Antoon Lorentz

Deutsche Übersetzung der in englischer Sprache erschienenen Abhandlung: Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light (Proceedings Acad. Sc. Amsterdam 6 (1904), S. 809)

Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt.

VON H. A. LORENTZ.¹⁾

1. Wenn man durch theoretische Betrachtungen den Einfluß zu bestimmen versucht, den eine Translation, wie sie z. B. alle Systeme durch die jährliche Erdbewegung erfahren, auf elektrische und optische Erscheinungen ausüben könnte, so gelangt man in verhältnismäßig einfacher Weise zum Ziel, solange nur solche Größen betrachtet zu werden brauchen, die proportional der ersten Potenz des Verhältnisses der Translationsgeschwindigkeit w zur Lichtgeschwindigkeit c sind. Fälle, in denen Größen von zweiter Ordnung, also von der Ordnung $\frac{w^2}{c^2}$, wahrnehmbar sein könnten, bieten mehr Schwierigkeiten. Das erste Beispiel dieser Art ist Michelsons wohlbekannter Interferenzversuch, dessen negatives Ergebnis Fitzgerald und mich zu dem Schlusse führte, daß die Dimensionen fester Körper sich infolge ihrer Bewegung durch den Äther ein wenig ändern.

Einige weitere Versuche, in denen eine Wirkung zweiter Ordnung gesucht wurde, sind kürzlich veröffentlicht worden. Einmal haben Rayleigh²⁾ und Brace³⁾ untersucht, ob die Erdbewegung einen Körper doppelbrechend macht; man könnte dies zunächst erwarten, wenn man die eben erwähnte Veränderung der Dimensionen annimmt. Beide Physiker kommen jedoch zu einem negativen Ergebnis.

Dann haben sich Trouton und Noble⁴⁾ bemüht, ein Drehmoment zu entdecken, das auf einen geladenen Kondensator wirkt, dessen Platten einen Winkel mit der Translationsrichtung bilden. Die Elektronentheorie fordert unzweifelhaft die Existenz eines solchen Drehmoments, wenn man sie nicht durch eine neue Hypothese verändert. Um das einzusehen genügt es, einen

1) Deutsche Übersetzung der in englischer Sprache erschienenen Abhandlung: *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light.* (Proceedings Acad. Sc. Amsterdam 6 (1904) S. 809.)

2) Rayleigh, Phil. Mag. (6) 4 (1902) S. 678.

3) Brace, Phil. Mag. (6) 7 (1904) S. 317.

4) Trouton und Noble, London R. Soc. Trans. A 202 (1903) S. 165

Elektromagnet. Erscheinungen in einem System mit beliebiger Geschwindigkeit 7

Kondensator mit Äther als Dielektrikum zu betrachten. Es läßt sich zeigen, daß in jedem elektrostatischen mit einer Geschwindigkeit $w^1)$ bewegten System eine gewisse „elektromagnetische Bewegungsgröße“ besteht. Wenn wir diese nach Größe und Richtung durch einen Vektor $\mathfrak{G}$ bezeichnen, so bestimmt sich das erwähnte Drehmoment durch das Vektorprodukt²⁾

$$(1) \quad [\mathfrak{G} \cdot w].$$

Wenn nun die x -Achse senkrecht zu den Kondensatorplatten gewählt wird, die Geschwindigkeit w eine beliebige Richtung hat, und wenn U die in üblicher Weise berechnete Energie des Kondensators ist, dann sind die Komponenten von $\mathfrak{G}$, bis zur 1. Ordnung genau, durch die folgenden Formeln gegeben³⁾:

$$\mathfrak{G}_x = \frac{2U}{c^2} w_x, \quad \mathfrak{G}_y = \frac{2U}{c^2} w_y, \quad \mathfrak{G}_z = 0.$$

Setzen wir diese Werte in (1) ein, so erhalten wir für die Komponenten des Drehmoments bis zu Größen zweiter Ordnung genau:

$$\frac{2U}{c^2} w_y w_z, \quad -\frac{2U}{c^2} w_x w_z, \quad 0.$$

Diese Ausdrücke zeigen, daß die Achse des Drehmoments in der Ebene der Platten, senkrecht zur Translation liegt. Wenn α der Winkel zwischen der Geschwindigkeit und der Normalen zu den Platten ist, so wird das Drehmoment $\frac{U}{c^2} w^2 \sin 2\alpha$; es sucht den Kondensator so zu drehen, daß die Platten sich parallel zur Erdbewegung einstellen.

Beim Apparat von Trouton und Noble saß der Kondensator am Balken einer Torsionswaage von genügender Empfindlichkeit, um durch ein Drehmoment der erwähnten Größenordnung abgelenkt zu werden. Es konnte aber nichts derartiges beobachtet werden.

2. Die besprochenen Versuche sind nicht der einzige Grund, weshalb eine neue Behandlung der mit der Bewegung der Erde verbundenen Probleme wünschenswert ist. Poincaré⁴⁾ hat gegen die bisherige Theorie der optischen und elektrischen Erscheinungen bewegter Körper eingewandt, daß zur Erklärung des negativen Ergebnisses Michelsons eine neue Hypothese eingeführt werden mußte, und daß dies jedesmal notwendig werden könne, wenn neue Tatsachen bekannt würden. Sicherlich haftet diesem Aufstellen von besonderen Hypothesen für jedes neue Versuchsergebnis etwas Künst-

1) Ein Vektor wird durch einen deutschen Buchstaben bezeichnet, seine Größe durch den entsprechenden lateinischen.

2) Vgl. meinen Artikel: „Weiterbildung der Maxwellschen Theorie. Elektronentheorie“ in der Mathematischen Encyclopädie V 14, § 21 a. (Dieser Artikel wird zitiert mit M. E.)

3) M. E. § 56 c.

4) Poincaré, Rapports du Congrès de physique de 1900, Paris, 1 S. 22, 23

liches an. Befriedigender wäre es, könnte man mit Hilfe gewisser grundlegender Annahmen zeigen, daß viele elektromagnetische Vorgänge streng, d. h. ohne irgendwelche Vernachlässigung von Gliedern höherer Ordnung, unabhängig von der Bewegung des Systems sind. Vor einigen Jahren habe ich schon versucht, eine derartige Theorie¹⁾ aufzustellen. Jetzt glaube ich, den Gegenstand mit besserem Erfolg behandeln zu können. Die Geschwindigkeit wird nur der einen Beschränkung unterworfen, daß sie kleiner als die des Lichtes sei.

3. Ich gehe aus von den Grundgleichungen der Elektronentheorie.²⁾ Sei $\mathfrak{d}$ die dielektrische Verschiebung im Äther, $\mathfrak{h}$ die magnetische Kraft, ϱ die Volumendichtigkeit der Ladung eines Elektrons, v die Geschwindigkeit eines Punktes eines solchen Teilchens und $\mathfrak{f}$ die elektrische Kraft, d. h. die auf die Einheitsladung gerechnete Kraft, die der Äther auf ein Volumenelement eines Elektrons ausübt. Wenn wir ein festes Koordinatensystem benutzen, so ist

$$(2) \quad \begin{cases} \operatorname{div} \mathfrak{d} = \varrho, & \operatorname{div} \mathfrak{h} = 0, \\ \operatorname{rot} \mathfrak{h} = \frac{1}{c} (\mathfrak{d} + \varrho v), \\ \operatorname{rot} \mathfrak{d} = -\frac{1}{c} \dot{\mathfrak{h}}, \\ \mathfrak{f} = \mathfrak{d} + \frac{1}{c} [v \cdot \mathfrak{h}]. \end{cases}$$

Ich nehme nun an, daß das System sich als ganzes in der Richtung der x -Achse mit einer konstanten Geschwindigkeit w bewegt, und bezeichne mit u die Geschwindigkeit, die außerdem ein Punkt eines Elektrons haben möge; dann ist $v_x = w + u_x$, $v_y = u_y$, $v_z = u_z$.

Wenn gleichzeitig die Gleichungen (2) auf Achsen bezogen werden, die sich mit dem System bewegen, so wird:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathfrak{d} &= \varrho, & \operatorname{div} \mathfrak{h} &= 0, \\ \frac{\partial \mathfrak{h}_x}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{h}_y}{\partial x} &= \frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} - w \frac{\partial}{\partial x} \right) \mathfrak{d}_x + \frac{1}{c} \varrho (w + u_x), \\ \frac{\partial \mathfrak{h}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{h}_z}{\partial x} &= \frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} - w \frac{\partial}{\partial x} \right) \mathfrak{d}_y + \frac{1}{c} \varrho u_y, \\ \frac{\partial \mathfrak{h}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{h}_x}{\partial y} &= \frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} - w \frac{\partial}{\partial x} \right) \mathfrak{d}_x + \frac{1}{c} \varrho u_x, \\ \frac{\partial \mathfrak{d}_x}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{d}_y}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} - w \frac{\partial}{\partial x} \right) \mathfrak{h}_x, \\ \frac{\partial \mathfrak{d}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{d}_z}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} - w \frac{\partial}{\partial x} \right) \mathfrak{h}_y, \\ \frac{\partial \mathfrak{d}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{d}_x}{\partial y} &= -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} - w \frac{\partial}{\partial x} \right) \mathfrak{h}_z, \end{aligned}$$

1) Lorentz, Zittingsverlag Akad. Wet. 7 (1899) S. 507; Amsterdam Proc. 1898—99. S. 427.

2) M. E. § 2.