

Der Weg zu einer neuen Kinematik

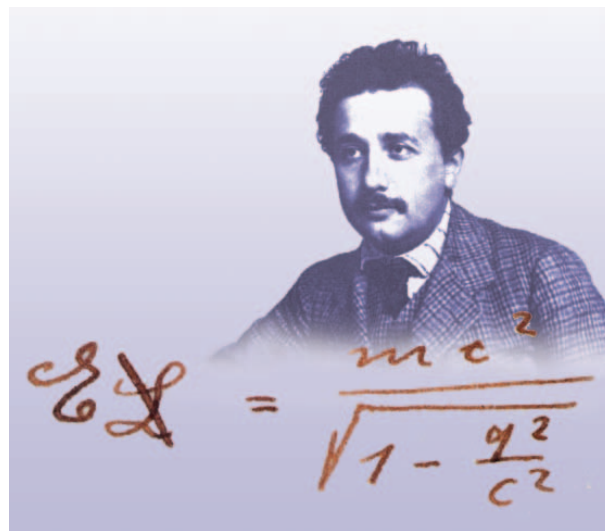
Die optischen und elektrodynamischen Ursprünge der Speziellen Relativität

Robert Rynasiewicz

Einsteins Spezielle Relativitätstheorie wurde vor allem durch optische und elektrodynamische Probleme, insbesondere im Zusammenhang mit seiner kurz zuvor publizierten Lichtquantenhypothese angeregt. Aber der Versuch, eine grundlegende Alternative zu Maxwells Theorie des Elektromagnetismus zu entwickeln, führte Einstein schließlich zu einer revolutionär neuen Kinematik.

Es wird mir immer mehr zur Überzeugung, dass die Elektrodynamik bewegter Körper, wie sie sich gegenwärtig darstellt, nicht der Wirklichkeit entspricht, sondern sich einfacher darstellen lassen. Die Einführung des Namens ‚Äther‘ in die elektrischen Theorien hat zur Vorstellung eines Mediums geführt, von dessen Bewegung man sprechen könne, ohne dass man wie ich glaube, mit dieser Aussage einen physikalischen Sinn verbinden kann.⁽¹⁾ schrieb Albert Einstein bereits 1899 an seine spätere Frau Mileva. Damit bezog er sich auf die Frage, ob der Äther von bewegten Körpern in gewissem Maße mitgeführt wird oder ob er absolut ruht. Für beide Alternativen ließen sich damals stützende Experimente anführen. Ein Artikel von Wien [1] enthält einen Überblick über sowohl optische als auch rein elektrodynamische Experimente zum Nachweis einer Ätherbewegung, wie z. B. Fizeaus Messung der Lichtgeschwindigkeit in fließendem Wasser [2] und das Phänomen der stellaren Aberration, die beide gegen einen vollständig mitgeführten Äther sprachen. Andere Experimente jedoch widerlegten auf den ersten Blick einen gänzlich ruhenden Äther, wie etwa das Michelson-Morley-Experiment zur Messung der Geschwindigkeit der Erde durch den Äther [3] und Röntgens erfolgloser Versuch, einen magnetischen Effekt zu finden, der von der Orientierung eines geladenen Kondensators bezüglich der Erdbewegung abhing [4].

Im Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“⁽²⁾ präsentiert Einstein schließlich die Lösung einer ganzen Reihe von miteinander verknüpften Problemen. Den Äther machte er dabei völlig „überflüssig“, indem er eine revolutionär neue



Die Gleichung für die Äquivalenz von Masse und Energie ist sicherlich die bekannteste Formel der Physik. Der verschlungene Pfad zu ihr nahm seinen Ausgangspunkt in Einsteins Unzufriedenheit über den „Äther.“ (Quelle: Picture-Allianz, akg-Images)

Kinematik vorschlug. Im ersten, „kinematischen“ Teil seiner wohl berühmtesten Arbeit leitet Einstein die Lorentz-Transformationen aus Postulaten und Definitionen her und erkundet deren unmittelbare Folgen wie Längenkontraktion und Zeitdilatation. Im „elektrodynamischen“ Teil zeigt Einstein, wie sich die Maxwell'schen Gleichungen in diesem neuen Rahmen verstehen lassen und so eine Reihe von Problemen der Optik und Elektrodynamik bewegter Körper behandelt werden kann.

Die Spezielle Relativitätstheorie wird heute als letzter, abschließender Schritt angesehen bei der mit Maxwell und Faraday beginnenden Entwicklung der ersten physikalischen Feldtheorie. In den letzten Jahren wurden immer wieder Zweifel geäußert, ob sich Maxwells Theorie überhaupt vor dem Hintergrund der klassischen Vorstellung von Raum und Zeit der Newtonschen Mechanik konsistent formulieren lasse. Entsprechend wird üblicherweise vermutet, dass Einstein beabsichtigte, die krönende Perfektion von Maxwells Theorie zu sichern, als ob Maxwells Gleichungen streng gültig seien.

Nur wenige Monate vor der Formulierung der Relativitätstheorie sandte Einstein jedoch eine Arbeit an die Annalen der Physik, welche schon die bloße Vorstellung von Strahlung, wie sie die Maxwell'sche Theorie des Lichts vermittelt,

KOMPAKT

- ▶ Ausgangspunkt für Einsteins Beschäftigung mit optischen und elektrodynamischen Problemen war die Frage nach der physikalischen Bedeutung des hypothetischen „Äthers“.
- ▶ Da er an der exakten Gültigkeit der Maxwell-Gleichungen zweifelte, versuchte Einstein eine neue grundlegende Theorie zu entwickeln im Einklang mit dem Prinzip der Relativität sowie seinen Ideen über die Lichtquanten.
- ▶ Aus diesen erfolglosen Bemühungen entstand die Spezielle Relativitätstheorie als Ordnungsprinzip analog zum Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

1) CPAE 1, Doc. 52, S. 225

2) CPAE 2, Doc. 23, S. 276 (891)

Prof. Dr. Robert Rynasiewicz, Department of Philosophy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA

herausfordert. Weit davon entfernt, ein Anhänger der exakten Gültigkeit von Maxwells Theorie zu sein, wie es die meisten Physiker bis in die 1920er-Jahre blieben, hatte Einstein bereits die Überzeugung entwickelt, dass sie in bestimmten Bereichen höchst inadäquat war.

Die große Ironie von „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ liegt darin, dass Einstein die Relativitätstheorie entwickelt, weil es ihm misslungen war, eine grundlegende Alternative zu Maxwells Theorie zu finden. Dies wirft ein neues Licht auf den „elektrodynamischen Teil“ der 1905er-Arbeit. Obwohl sie keine offenkundige Skepsis in Bezug auf die Gültigkeit von Maxwells Theorie ausdrückt, spricht sie genau jene Anwendungen an, die Einstein vorher ausgearbeitet hatte, um die Gültigkeitsgrenzen dieser Theorie zu erkunden. Die im elektrodynamischen Teil angesprochenen Probleme brachten Einstein, wenn auch auf Umwegen, zur Entdeckung der eigenständigen Theorie, wie sie im kinematischen Teil dargelegt wird und die den Löwenanteil der optischen und elektrodynamischen Ergebnisse lieferte. Zu der Zeit als Einstein „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ schrieb, war es ihm zwar in den Sinn gekommen, dass die neue Kinematik auch Konsequenzen außerhalb der optischen und elektrodynamischen Probleme haben könnte. Doch erst einige Monate später dämmerten ihm die Folgen für die Beziehung zwischen Masse und Energie.

Die Postulate und ihre Stützen

Die Spezielle Relativitätstheorie gründet auf zwei Postulaten, dem Prinzip der (speziellen) Relativität und einem Postulat, das Einstein „das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ nannte. Letzteres wird oft falsch angegeben als die Annahme, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen gleich sei. Typischerweise wird das Michelson-Morley-Experiment als prinzipieller experimenteller Beleg dafür angeführt.

Dies förderte den Mythos, dass Einstein die Spezielle Relativitätstheorie als direkte Reaktion auf das Null-Resultat dieses Experiments entwickelt habe.³⁾ Das Licht-Postulat, wie es Historiker nennen [5], nimmt jedoch nur an, dass die Geschwindigkeit des Lichts unabhängig von der Bewegung seiner Quelle in irgendeinem gegebenen Bezugssystem ist, das die zeitgenössischen Leser natürlich mit dem Ruhesystem des Äthers identifizierten. Das Licht-Postulat ist tatsächlich eine triviale Folge der Maxwellschen Theorie bzw. jeder Wellentheorie des Lichts, die auf der Annahme eines stationären Äthers basiert, und somit völlig unstrittig. Einstein fand es nur notwendig, das Relativitätsprinzip zu begründen, und hier beruft er sich in späteren Schriften namentlich auf das Michelson-Morley-Experiment. In der 1905er-Arbeit erwähnt er nur „die misslungenen Versuche eine Bewegung der Erde relativ zum ‚Lichtmedium‘ zu konstatieren“. Die wichtigste Überlegung, die er darin zur Unterstützung des Relativitätsprinzips angibt, drehte sich jedoch um das Phänomen der elektromagnetischen Induktion, wie wir später sehen werden.



Albert Einstein war von klein auf von elektrotechnischen Apparaten umgeben wie diesem Dynamo aus dem Familienunternehmen „Electrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie.“. Eine Diskussion der Induktion steht am Anfang seiner berühmten Arbeit. (aus L. Pyenson, *The Young Einstein*)

Eine Alternative zum Lichtpostulat, im Zusammenhang mit der Korpuskulartheorie des Lichts, ist die Emissions-Hypothese. Demnach entspricht die Lichtgeschwindigkeit (in zumindest einem Bezugssystem) der Vektorsumme der Geschwindigkeit der Quelle und der Geschwindigkeit der Emission relativ zur Quelle. Die klassische Geschwindigkeitsaddition beinhaltet, dass sie in allen Bezugssystemen gilt, und erfüllt damit automatisch das Relativitätsprinzip. Da die Lichtquelle, die im Michelson-Morley-Experiment verwendet wird, auf dem Interferometer angebracht ist und somit relativ zu diesem stationär ist, befindet sich das Null-Ergebnis in vollem Einklang mit der Emissions-Hypothese. Dies macht deutlich, dass das Experiment allein das Relativitätsprinzip stützt.

Die Asymmetrie der Induktion

Wir nehmen es heute als selbstverständlich an, dass dem elektromagnetischen Feld ein einziges mathematisches Objekt, der Maxwell-Tensor, entspricht, der an jedem Raum-Zeit-Punkt in eine elektrische und eine magnetische Komponente zerlegt werden kann. Dagegen ging man 1905 davon aus, dass die elektrischen und magnetischen Feldvektoren einen intrinsischen Zustand des Äthers darstellen. Der Gedanke, dass diese Größen vom Bezugssystem abhängen, war der Elektrodynamik so fremd wie die Vorstellung, dass die Temperatur eines kontinuierlichen Mediums vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt.

Der Anfangsparagraph der Arbeit von 1905 präsentiert Einsteins ausgereifteste Argumentation für das Relativitätsprinzip anhand der Faradayschen Induktion, bei welcher diese Vorstellung des Feldes eine asymmetrische Erklärung erfordert, obwohl das Phänomen selbst diese Asymmetrie nicht zeigt: Wenn sich ein Magnet und ein Leiter relativ zueinander bewegen, dann hängt der induzierte Strom nur von der Relativbewegung ab. Je nach eingenommenem Blickwinkel kann man dem induzierten Strom jedoch völlig unterschiedliche Ursachen zuordnen, abhängig davon, ob der Leiter oder der Magnet relativ zum Äther ruht. Ruht der Leiter, während sich der Magnet bewegt, so gilt nach der Maxwell-Gleichung

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \mathbf{E},$$

dass das zeitlich veränderliche magnetische Feld ein elektrisches Feld erzeugt, auf das die freien Ladungen im Leiter reagieren. Wenn der Magnet ruht und sich der Leiter bewegt, dann entsteht kein elektrisches Feld, sondern die freien Ladungen im Leiter erfahren vielmehr eine „elektromotorische Kraft“ proportional zum $(\mathbf{v} \times \mathbf{H})$ -Term in der hypothetischen Lorentz-Kraft $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + (q/c)(\mathbf{v} \times \mathbf{H})$, wobei \mathbf{v} die Geschwindigkeit der Ladung q durch den Äther ist. Einstein erinnerte sich: „Der Gedanke, dass es sich hier um zwei wesensverchiedene Fälle handle, war mir aber unerträglich. Der Unterschied zwischen beiden konnte nach meiner Überzeugung nur ein Unterschied in der Wahl des Standpunktes sein, nicht aber ein realer Unterschied. ... Die[se] Erscheinung der magnetoelektrischen Induktion zwang mich dazu, das (spezielle) Relativitätsprinzip zu postulieren.“⁴⁾

Auf den ersten Blick erschien es Einstein jedoch, dass es das Prinzip der Relativität erfordert, die Maxwell-Gleichungen durch eine Elektrodynamik zu ersetzen, die mit der Emissions-Hypothese konform ist. In

3) CPAE 7, Doc. 51, S. 264–265

4) Eine wichtige Quelle für die Frage, inwieweit Einstein das Michelson-Morley-Experiment vor 1905 bekannt war, ist ein Vortrag, den er 1922 in Japan gehalten hat. Einstein trug in deutsch vor, der Physiker Jan Ishiwara machte sich Notizen auf Japanisch. Eine Übersetzung ins Englische findet sich z. B. in A. Ono, *Phys. Today*, August 1982, S. 45; vgl. auch R. Itagaki, *Science* 283, 1457 (1999)

einer Fußnote zum obigen Abschnitt heißt es: „Die zu überwindende Schwierigkeit lag dann in der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, die ich zunächst aufgeben zu müssen glaubte. Erst nach jahrelangem Tasten bemerkte ich, dass die Schwierigkeit auf der Willkür der kinematischen Grundbegriffe beruhte.“⁵⁾

Ironischerweise versuchten einige andere Physiker, Emissions-Theorien zu entwickeln, aber nur um die klassischen Begriffe von Raum und Zeit nach dem Erscheinen der Speziellen Relativität zu bewahren. Direkte experimentelle Tests des Lichtpostulats tauchten erst ein Jahrzehnt später auf, beginnend mit De Sitters Beobachtungen von Doppelsternen [6]. Einstein nahm bereits vor 1905 – aus schierer Frustration – Abstand von der Emissions-Hypothese. Er fand, dass selbst bei der Behandlung von einfachsten Phänomenen, wie dem Verhalten von reflektiertem Licht, zusätzliche willkürliche Annahmen erforderlich waren. Es erschien daher eine abschreckende Aufgabe, irgendeine Emissionstheorie zusammenzustückeln, die die folgende Bandbreite bekannter Phänomene adäquat beschrieb:

- ▶ 1. ponderomotive Kräfte, die ein äußeres Feld auf elektrische oder magnetische Körper ausübt;
- ▶ 2. das Verhalten von Strahlung im freien Raum, und
- ▶ 3. die elektromagnetischen Eigenschaften von Materie und ihr Einfluss auf optische Phänomene.

Im Folgenden soll in umgekehrter Reihenfolge dargestellt werden, wie Einstein diese drei Fälle behandelte.

Die Theorie von Lorentz

Schon als junger Mann hatte Einstein die elektromagnetische Theorie des Lichts, und insbesondere Hertz' Entdeckung der elektromagnetischen Wellen, kennen gelernt. Doch damals verstand er den Äther noch als ein mechanisches, elastisches Medium. In einem Essay, geschrieben 1895 für seinen Onkel Caesar Koch, schlug er vor, den Zustand dynamischer Spannung, der einem magnetischen Feld entspricht, zu untersuchen, indem man nach Variationen in der Geschwindigkeit des Lichts Ausschau hält, welche durch eine Änderung im Elastizitätsmodul hervorgerufen werden sollten.⁶⁾

Einstein hatte sich bis 1899 mit Hertz' Wiedergabe der Theorie Maxwells vertraut gemacht⁷⁾, die Äther und Materie als gleichwertig behandelte, als elektromagnetische Kontinua, welche sich nur bezüglich induktiver Kapazität, magnetischer Permeabilität und Beweglichkeit unterschieden [7]. Wenn dieser makroskopische, phänomenologische Ansatz auch den Vorteil der Anschaulichkeit hat, so konnte er doch keine grundlegende Erklärung für die elektro-optischen Eigenschaften verschiedener Substanzen, die Dispersion oder den Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren liefern. Er bot jedoch eine symmetrische Erklärung für die elektromagnetische Induktion an, insofern als alle induzierten Ströme das Ergebnis der relativen Bewegung magnetischer Kraftlinien sind.

Lorentz brachte ein grundsätzlich anderes Bild ins Spiel. Ein entscheidender Schritt bestand darin, das elektromagnetische Feld völlig von der Materie loszulösen; im Kontext der Zeit bedeutete dies, den Äther von der Materie zu trennen. Lorentz betrachtete den Äther als vollkommen ruhend, d. h. er sollte das Innere der Materie durchdringen und seine Bestandteile sollten sich relativ zueinander nicht bewegen. Ein weiterer



James Clerk Maxwell (1831–1879) entwickelte ab 1855 seine grundlegende Theorie des Elektromagnetismus (Quelle: Smithsonian Institution Library/Dibner Library)

entscheidender Schritt war die Einführung unsichtbarer Ladungsdichten von atomarer oder subatomarer Größe; diese bezeichnete er anfangs als „Ionen“, später jedoch als „Elektronen“. Sie dienten einerseits als Quellen der elektrischen und magnetischen Kräfte, die sich durch den Äther ausbreiten. Da sie aber mit der Materie verknüpft waren, boten sie andererseits den Mechanismus, mit dem das elektromagnetische Feld ponderomotorische Kräfte auf Körper ausübt; quantitativ wird dies durch die Gleichung für die Lorentz-Kraft ausgedrückt. Demnach war elektrischer Strom nichts anderes als die Übertragung freier Elektronen, während gebundene Elektronen durch Oszillation als Strahlungssender oder -empfänger fungieren konnten, oder alternativ, bei statischer Verschiebung, als Polarisationsquellen. Dieses elektronentheoretische Bild erwies sich als äußerst fruchtbar für die Erklärung

sowohl der elektromagnetischen und optischen Eigenschaften ruhender Materie als auch der Phänomene im Zusammenhang mit bewegten Medien.

In seiner kanonischen Formulierung im „Versuch“ [8] von 1895 begründete Lorentz, dass es keine große Bandbreite von Experimenten geben könne, mit denen sich die Erdbewegung durch den Äther bis zur ersten Ordnung von v/c genau messen ließe. Für rein elektrische und magnetische Phänomene zeigte er dies, indem er der Reihe nach allgemeine Fälle der Elektrostatik, der ruhenden Ströme und der Induktion betrachtete. Für optische Phänomene entwickelte er ein ausgeklügeltes formales Werkzeug, das Theorem der korrespondierenden Zustände, mit dessen Hilfe er Lösungen für ein System bewegter Körper (z. B. Linsen, Prismen etc.) aus den Lösungen für ein entsprechendes System ruhender Körper ableiten konnte. Aber der Zweck dieses Theorems der korrespondierenden Zustände beschränkte sich nicht darauf, optische Null-Ergebnisse abzuleiten. Ein besonders herausragendes Beispiel ist die Ableitung von Fizeaus Ergebnis [2], später durch Michelson und Morley in noch größerer quantitativer Exaktheit bestätigt [9], wonach für die Lichtgeschwindigkeit in einer transparenten Substanz, die sich mit einer Geschwindigkeit v relativ zur Quelle bewegt, gilt

$$V = c/n + v(1 - 1/n^2) \quad (1)$$

mit dem Brechungsindex n .

Lorentz benötigte hierfür keine weiteren Annahmen außer der grundlegenden Theorie für Null-Ergebnisse erster Ordnung. Er war jedoch gezwungen, eine besondere Hypothese zur Erklärung des Null-Ergebnisses zweiter Ordnung des Michelson-Morley-Experiments

5) CPAE 7, Doc. 31, Anm. 34, S. 280

6) CPAE 1, Doc. 5, S. 6–9

7) CPAE 1, Doc. 52, S. 226

einzuführen [3], nämlich die berühmte Kontraktions-Hypothese, wonach ein starrer Körper sich entlang seiner Bewegungsrichtung durch den Äther um einen Faktor von $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ verkürzt. Lorentz zeigte die Plausibilität seiner Hypothese auf: Der Gleichgewichtszustand eines bewegten Systems von Ladungen, die mittels elektrodynamischer Kräfte interagieren, muss im Vergleich zu einem entsprechenden ruhenden System von Ladungen um genau diesen Faktor verkürzt sein. Somit muss in dem Maß, wie intermolekulare Kräfte die Ursache für den Gleichgewichtszustand starrer Körper sind, ein solcher Kontraktionsfaktor erwartet werden.

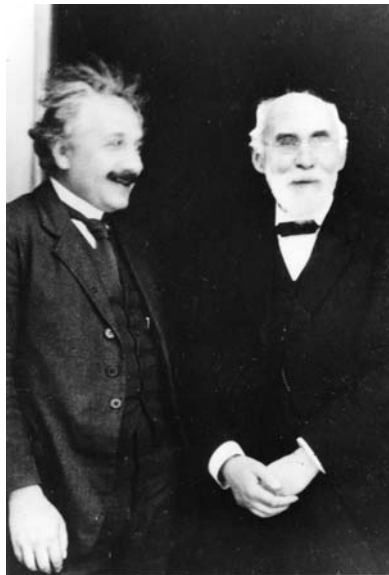
Wiens Artikel von 1898 zum Ätherproblem [1], den Einstein 1899 gelesen hatte, erwähnt, wie Lorentz im „Versuch“ eine ganze Reihe herausragender Probleme anging. Doch selbst Ende 1901 war Einstein noch nicht mit dem „Versuch“ selbst vertraut.⁸⁾ Alles weist jedoch darauf hin, dass er, als er diese Arbeit schließlich in Händen hielt, tief beeindruckt war. In späteren Schriften verwies Einstein wiederholt auf den großen Erfolg von Lorentz' Theorie als Grundlage für die Akzeptanz des Lichtpostulats [10] und nennt ausdrücklich Fizeaus Ergebnis.⁹⁾ Ein Manuskript von 1912 diskutiert das Experiment speziell in Bezug auf die Emissions-Hypothese.¹⁰⁾

Wenn Fizeaus Experiment und Lorentz' Theorie im Allgemeinen auch eine bedeutende Rolle dabei gespielt zu haben scheinen, Einstein davon zu überzeugen, dass die Emissions-Hypothese nicht plausibel ist, erwähnt er doch Fizeaus Experiment in dem Artikel von 1905 nirgends ausdrücklich, und auch Lorentz' Theorie taucht nur in §9 auf, wo Einstein zeigt, dass die grundlegenden Gleichungen der Theorie mit dem Relativitätsprinzip in Einklang sind. Da letzteres allein schon ausreicht, sämtliche Null-Ergebnisse zu erklären, liegt der Zweck vermutlich darin zu zeigen, dass Lorentz' Erklärungen zu anderen Phänomenen – darunter auch Fizeaus Experiment – ohne Veränderung übernommen werden können. Laue zeigt 1907 [11], dass Fizeaus Ergebnis unmittelbar aus der Regel der relativistischen Geschwindigkeitsaddition folgt, ganz ohne Umweg über Lorentz' Theorie. Es gibt keinen Hinweis darauf, dass Einstein diese Möglichkeit 1905 bereits klar war.¹¹⁾

Das Elektronen-Problem

Am Anfang seines 1905er-Artikels beschreibt Einstein das Problem, eine systematische Darstellung der Faradayschen Induktion zu geben. Die Lösung dieses Rätsels erscheint in §6, wo Einstein die Vorstellung des elektromagnetischen Feldes als einer autonomen Größe einführt, deren elektrische und magnetische Komponenten sich je nach Bezugsrahmen unterscheiden. Die Kraft, welche auf eine Ladung wirkt, hängt demnach ausschließlich vom äußeren elektrischen Feld ab, welches die Ladung in ihrem momentanen Ruhesystem spürt. Dies liefert den entscheidenden Schritt für eine einfache Ableitung der Dynamik des Elektrons in §10.

Die Vorstellung, welche man um 1900 vom Elektron



Albert Einstein mit Hendrik Antoon Lorentz, der 1895 einen wichtigen Versuch unternahm, um eine Elektrodynamik bewegter Körper zu entwickeln. (Quelle: Emilio Segrè Visual Archives)

hatte, war eine gänzlich andere als die heutige oder selbst die in den 1920er-Jahren. Der Begriff „Elektron“ war im Zusammenhang mit einer minimalen – negativen oder positiven – Ladungseinheit eingeführt worden. Ob solche Elementarladungen mit einer wie auch immer gearteten materiellen Einheit in Verbindung gebracht werden mussten, blieb offen.¹²⁾

Weit verbreitet war das Wissen, dass die geringe scheinbare Masse der Bestandteile von Kathoden- und Betastrahlen auf einen aus der Selbstinduktion der Ladungen resultierenden Widerstand gegenüber Bewegungsänderung zurückzuführen ist. Drude vertrat diese Position in seiner Elektronentheorie der Metalle [12]. Einstein kam Anfang 1901 unabhängig davon zur selben Ansicht.¹³⁾ Wenn alle elementaren Bestandteile von Materie positive oder negative Elektronen sind und deren scheinbare Massen elektroma-

gnetischen Ursprungs, dann spielt die Idee von Masse als einer „Menge von Materie“ keine entscheidende Rolle. Tatsächlich hatte Wien vorgeschlagen, die Mechanik durch eine „elektromagnetische Weltanschauung“ als alternative Basis für die gesamte Physik zu ersetzen [13]. Sowohl die Vorstellung von träger Masse als auch die Gesetze der Mechanik würden sich so aus der Elektrodynamik ableiten lassen.

Der Erfolg dieses Programms hing ab von den Messergebnissen zur scheinbaren Masse des Elektrons bei extrem hohen Geschwindigkeiten. In die zu erwartende elektrodynamische Masse ging jedoch ein, wie man das Elektron bezüglich Form und Ladungsverteilung bei hohen Geschwindigkeiten modellierte. Ein Problem ergab sich im Hinblick auf die Erklärung der Stabilität des Elektrons angesichts der elektrostatischen Selbstabstoßung seiner Ladungsdichte. Abraham sprach sich zum Beispiel dafür aus, die Starrheit des Elektrons einfach als nicht-reduzierbares, nicht-dynamisches Faktum anzunehmen [14]. Einstein gab einer dynamischen Erklärung den Vorzug und schloss daher, dass Maxwells Gleichungen auf der Ebene des Elektrons versagen.

Zeitgenössische Herangehensweisen an die Dynamik des Elektrons erforderten detaillierte Annahmen bezüglich der Form und Ladungsverteilung des Elektrons, um die durch Selbstinduktion bei hohen Geschwindigkeiten entstehende elektromagnetische Masse des Elektrons zu berechnen. Einstein gelang es, dies in seiner Behandlung des Elektrons in §10 völlig zu vermeiden, da es bei einer ruhenden Ladung gar keine Selbstinduktion gibt, und die relativistische Sichtweise des Feldes es ihm ermöglichte, die momentane Beschleunigung im Ruhezustand des Elektrons zu berechnen. Dies gestattete es ihm, das Elektron näherungsweise als Punktladung zu betrachten und so eine Spekulation über die räumliche Verteilung der Ladungsdichte zu umgehen.

Er stellt somit in §10 das Elektron als „ein punktförmiges Teilchen mit einer elektrischen Ladung e “ vor. Dies steht in krassem Gegensatz zu der allgemeinen Vorstellung des Elektrons, wie sie in §9 im Zusammenhang mit Lorentz' grundlegenden Gleichungen dargestellt ist

8) CPAE 1, Doc. 131, S. 50

9) CPAE 3, Doc. 2

10) CPAE 1, Doc. 1, S. 35

11) Bemerkenswerterweise findet sich in dem Artikel von 1905 der einzige Hinweis auf die Regel der Geschwindigkeitsaddition in §9, bei der Feststellung der Kovarianz der Gleichungen Lorentz'.

12) Einstein selbst spielte 1899 mit der Idee von Elektrodynamik als der Wissenschaft körperloser Ladungen (in der „Lehre von den Bewegungen bewegter Elektrizitäten & Magnetismen [...] im leeren Raum“); CPAE 1, Doc. 52, S. 227

13) CPAE 1, Doc. 96, S. 284–285

14) *Einstein an Michele Besso*, 22. Januar 1905, CPAE 5, Doc. 5, S. 11

15) CPAE 2, Doc. 14, S. 150–166 (152–148)

– „[eine] elektrische Ladung [Dichte ρ], welche permanent mit einem kleinen starren Körper verbunden ist“.

Im Januar 1903 schrieb Einstein an Michele Besso, er plane für die nahe Zukunft eine umfassende Untersuchung der Elektronentheorie.¹⁴⁾ Zu diesem Zeitpunkt oder kurz darauf hatte Einstein bereits eine relativistische Vorstellung des elektromagnetischen Feldes. Sobald die Emissions-Hypothese in Zweifel gezogen wird, sind es nur noch ein paar Schritte, um mittels reiner Symmetrie-Überlegungen zu den Feldtransformationsgleichungen und zu diesem neuen eleganten Umgang mit der Dynamik des Elektrons zu gelangen.

Danach liegt es nahe, das Verhalten der Maxwell-Hertz-Gleichungen im Vakuum unter den Feldtransformationen zu untersuchen. Gemäß dem Prinzip der Relativität müssen die Gleichungen kovariant sein. Die Lorentz-Transformationen ergeben sich nun, indem man die umgekehrte Linie der Argumentation verfolgt, mit der Einstein die Feldtransformationen aus den Lorentz-Transformationen in §6 hergeleitet hat. Mehr braucht man nicht, um die Bewegungsgleichungen für ein sich in einem angelegten Feld bewegendes Elektron aufzustellen.

Das Problem der Strahlungsstruktur

Einsteins Lichtquanten-Artikel¹⁵⁾ lieferte insbesondere eine Erklärung des photoelektrischen Effekts und zwar durch einen elementaren Prozess der direkten Umwandlung von Lichtenergie in Bewegungsenergie und umgekehrt, ohne Vermittlung von Resonatoren. Diese Idee verfolgte Einstein¹⁶⁾ bereits Anfang 1901 in seiner Kritik¹⁷⁾ an Plancks Versuchen, Wiens Spektralgesetz aus dem statistischen Verhalten von Resonatoren abzuleiten [15]. Die Idee der Lichtquanten spielte also wohl bereits einige Jahre vor 1905 eine Rolle im Hintergrund.

In §7 und §8 des Artikels zur Relativität von 1905, welche sich mit den Eigenschaften von Strahlung im freien Raum befassen, geht es nicht, wie man erwarten könnte, um die Interpretation von Null-Ergebnissen optischer Experimente zum Nachweis der Erdbewegung. Diese können sofort durch das Prinzip der Relativität erklärt werden. Doch die beiden Abschnitte sind auch nicht nur ein Potpourri von Ergebnissen relativistischer Optik. Die Kette der Ableitungen zeigt ein klares Muster, das zu zwei Ergebnissen führt, welche sich unmittelbar auf die Vorstellung von Strahlung als der Ausbreitung von Lichtquanten beziehen: die Transformation von Energie und die Berechnung des Strahlungsdrucks. Letztere ist dabei konzeptionell einfacher.

Strahlungsdruck

Maxwell hatte 1873 auf der Grundlage seiner elektromagnetischen Theorie des Lichts vorhergesagt, Strahlung müsse Druck auf nichtleitende Oberflächen ausüben [16]. Kurz darauf argumentierten Bartoli [17] und Boltzmann [18], und zwar auf rein thermodynamischer Grundlage und unabhängig von Maxwells Theorie, Licht müsse auf vollständig reflektierende Oberflächen einen Druck ausüben, welcher der zweifachen Energiedichte der Strahlung entspricht. Strahlungsdruck spielte daneben auch eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Theorie der Schwarzkörper-Strahlung. So berechnete Wien zum Beispiel im Zuge der Ableitung seines berühmten Verschiebungsgesetzes die Veränderung thermischer Strahlungsdichte als Folge der Reflexion an einem bewegten Spiegel [19].

Einsteins Aufgabe in seinem Artikel von 1905 war in etwa das Gegenteil davon: Er musste den Druck berechnen, den monochromatische Strahlung durch Veränderung ihrer Energie bei Reflexion an einem bewegten Spiegel ausübt: Wenn v die Geschwindigkeit des Spiegels und P der Strahlungsdruck ist, dann stellt die Energiedifferenz die Arbeit Pv dar, welche auf, oder durch den Spiegel wirkt. Als Problem der Wellenoptik wird die Veränderung der Strahlungsdichte aus dem Quadrat der Veränderung der Wellenamplitude zusammen mit Einfallswinkel und Reflektionswinkel berechnet, wie sie sich aus der Formel für die Aberration ergeben.

Betrachtet man Licht dagegen als bestehend aus Lichtquanten, benötigt man lediglich die resultierende Doppler-Verschiebung der reflektierten Strahlung. N sei die Anzahl der Lichtquanten pro Volumeneinheit im Ruhesystem und φ der Winkel zwischen der x -Achse und der Ausbreitungsrichtung: Dann ist die Zahl n der Lichtquanten, welche pro Zeiteinheit auf den Spiegel treffen, $N(c \cos \varphi - v)$, und die Einfallenergie ist $nh\nu$. Da die Anzahl der einfallenden und der reflektierten Lichtquanten identisch ist, entspricht die reflektierte Energie $nh\nu_r$ (ν_r : Frequenz nach Reflexion). Der Strahlungsdruck ergibt sich demnach aus

$$Pv = nh(\nu - \nu_r) \quad . \quad (2)$$

Um nach P aufzulösen, braucht nur noch ν_r bestimmt zu werden. Das Ergebnis stimmt exakt mit dem aus dem Artikel zur Relativität überein, wenn man $Nh\nu$ als die Energie pro Volumeneinheit mit dem Wellenoptik-Begriff $A^2/8\pi$ gleichsetzt. Man kann sich nur schwer vorstellen, dass Einstein diese Berechnung nicht durchgeführt hat, und wenn auch nur zur Konsistenzkontrolle. Wenn man bedenkt, wie kompliziert die Berechnung ist, wenn man sie als Problem der Wellenoptik betrachtet, so ist die Motivation, sie erst einmal als Lichtquanten-Problem anzugehen, umso größer.

Der Strahlungsdruck geht jedoch mit einer grundlegenden Herausforderung für die Lichtquanten-Hypothese einher. Angenommen, ein Strahl von Lichtquanten, der sich in positiver x -Richtung bewegt, trifft auf einen Spiegel, der sich mit Geschwindigkeit v in dieselbe Richtung bewegt. Die Zahl von Lichtquanten, welche pro Zeiteinheit auf den Spiegel treffen, ist $N(c-v)$, wobei N der Quantendichte pro Volumeneinheit im ruhenden System entspricht. Vom Ruhesystem des Spiegels aus gesehen ist die Zahl der Quanten-Einfälle pro Zeiteinheit $N'c$, wobei N' die Quantendichte pro Volumeneinheit im Bezugssystem des Spiegels darstellt. Davon ausgehend, dass die Messung der Zeiteinheit in beiden Bezugssystemen gleich ist, müssen diese beiden Werte gleich sein. Demnach gilt

$$N' = N(1 - v/c) \quad . \quad (3)$$

Da sich daraus ergibt, dass die korrespondierenden Volumenmaße wie

$$S' = S/(1 - v/c) \quad (4)$$

transformieren müssen, scheint die Kompatibilität von Lichtquanten-Hypothese und Lichtpostulat damit zunächst ausgeschlossen zu sein.

Doch zu der Zeit, als Einstein den Lichtquanten-Artikel entwarf, hatte er seine Suche nach einer Emissions-Theorie bereits aufgegeben. Wenn also aus Lichtpostulat und Lichtquanten-Hypothese die bizarre Volumentransformations-Gleichung (4) folgt, woher nahm dann Einstein die Zuversicht, diese so offensichtlich

16) CPAE 1, Doc. 102, S. 295

17) CPAE 1, Doc. 97, S. 286

ketzerische Ansicht über die Mikrostruktur der Strahlung zu behaupten?

Die Transformation der Energie von Lichtstrahlen

Wenn die Energie pro Volumeneinheit \mathcal{E} der Quantenstrahlung sich aus $Nh\nu$ ergibt, so folgt aus Gl. (3) in Verbindung mit der klassischen Doppler-Formel

$$\mathcal{E}' = \mathcal{E} (1 - v/c)^2. \quad (5)$$

Falls die Lichtquanten-Hypothese mit dem Relativitätsprinzip und den zeitgemittelten Werten gemäß Maxwells Theorie im Einklang ist, sollte Gl. (5), zumindest in erster Ordnung, mit der Transformation der Energie pro Volumeneinheit einer monochromatischen ebenen Welle der Frequenz ν übereinstimmen, die sich in gleicher Richtung ausbreitet. Gemäß den Feldtransformationen erster Ordnung gilt für die Wellenamplitude die Transformation $A' = A(1 - v/c)$ und infolgedessen

$$\frac{A'^2}{8\pi} = \frac{A^2}{8\pi} (1 - v/c)^2 \quad (6)$$

in Übereinstimmung mit Gl. (5). Verwendet man die genauen Feldtransformationen zur Berechnung von A'^2 und der relativistischen Doppler-Transformation \mathcal{E}' , dann muss Gl. (3) durch

$$N' = N \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}. \quad (7)$$

ersetzt werden. Wenn Gl. (3) auch, im Gegensatz zu Gl. (7), eine klassische Ableitung hat, so existiert doch für keine der beiden eine klassische Interpretation. Aber das gilt ebenso für die Feldtransformationen. Die mit Gl. (7) korrespondierende Transformationsgleichung für das Volumen ist

$$S' = S \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}. \quad (8)$$

Wenn E' die Energie einer gegebenen Anzahl von Lichtquanten ist, gemessen im bewegten System, so ist ihr Verhältnis zur Energie E derselben Lichtquanten, gemessen im ruhenden System:

$$\frac{E'}{E} = \frac{(A'^2/8\pi)S'}{(A^2/8\pi)S} = \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}} = \frac{v'}{v}. \quad (9)$$

Deshalb verkündete Einstein im Artikel von 1905: „Es ist bemerkenswert, daß die Energie und die Frequenz eines Lichtkomplexes sich nach demselben Gesetze mit dem Bewegungszustand des Beobachters ändern.“¹⁸⁾ Trotz dieses konsistenten Ergebnisses blieb eine Frage: Wie kann der Fluss von Lichtquanten durch eine gegebene Oberfläche vom Bezugssystem unabhängig sein? Die Lösung dieses Problems erforderte die Anerkennung des relativen Charakters entfernter Gleichzeitigkeit.

Die neue Heuristik

Quellen belegen, dass diese entscheidende Entdeckung einige Monate nach Vollendung des Lichtquanten-Artikels kam. Mehrere Berichte erwähnen eine lange Diskussion mit seinem Mitstreiter Michele Besso an einem Nachmittag im späten Mai. Einstein breitete seine Ratlosigkeit vor Besso aus, in der Hoffnung, im Verlauf des Gesprächs eine Einsicht gewinnen zu können. Dies gelang zwar nicht, doch einer Quelle zufolge kam der Durchbruch beim Aufwachen am nächsten Morgen. Die Einsicht war durchschlagend genug, um alle Zweifel an der Lösbarkeit der Probleme zu zerstreuen.

Zuvor hätte Einstein, allein auf der Basis von Lor-

entz' Theorie der korrespondierenden Zustände und des Relativitätsprinzips, sicher erwartet, dass die Transformationen effektiver Koordinaten, die für die Elektrodynamik benötigt werden, andere sind als die Galilei-Transformationen. Mit Näherungen in erster Ordnung der Lorentz-Transformation wäre es ihm, angesichts der Kontraktionshypothese, bestenfalls gelungen, die Hoffnung auf Übereinstimmung der Lichtquanten-Hypothese mit der Wellenoptik zu begründen. Dabei wäre nichts Vielversprechendes zur Dynamik des Elektrons herausgekommen. Tatsächlich wäre nicht einmal die mathematische Konsistenz der relativistischen Konzeption des Feldes garantiert gewesen, trotz der Abschaffung des Äthers mittels der Lichtquanten-Hypothese.

Das belegt indirekt, dass Einstein bereits im Besitz der gesamten Lorentz-Transformationen war. Damit hätte er nämlich einen formalen Beweis für die Konsistenz der relativistischen Konzeption des Feldes gehabt sowie einen Beweis für die zeitgemittelte Konsistenz der Wellenoptik mit der „sehr revolutionären“¹⁹⁾ Lichtquanten-Hypothese. Die Auflösung der Asymmetrien der Induktion durch die Interpretation der äußeren



Einsteins Freund und Arbeitskollege am Patentamt, Michele Besso (1873–1955, hier mit Ehefrau Anna) war Einsteins wichtigster Gesprächspartner bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie.

Kraft, welche auf eine Ladung einwirkt, legt es nahe, die Idee des Elektrons als entscheidenden Testfall zu verwenden. Die gewonnenen Ergebnisse würden die Zuversicht steigern, dass die Lichtquanten-Hypothese mit der Wellenoptik innerhalb des angemessenen zeitgemittelten Grenzwertes in Einklang steht. Ob Einstein auch eine Version der Regel der relativistischen Geschwindigkeitsaddition abgeleitet hatte, ist schwerer zu beurteilen. Doch ohne die vollständigen Lorentz-Transformationen gibt es keinen erkennbaren Grund für Einstein, den Transport einer Uhr als operationaler Methode zur Schaffung absoluter Simultaneität zu verwerfen.

Entweder die Lorentz-Transformationen oder ihre Näherungen in erster Ordnung im Hinblick auf effektive Koordinaten zu interpretieren, bedeutete, dass man die Ergebnisse räumlicher oder zeitlicher Messungen als systematisch beeinflusst durch die grundlegenden dynamischen Gesetze auslegt, welche die als Maßeinheiten angenommenen physikalischen Systeme beherrschen. Lorentz' (Längen-)Kontraktions-Hypothese war praktisch ein Schuldschein über eine Transformation effektiver Koordinaten. Einstein hatte sich, bereits deutlich vor 1905, davon überzeugt, dass weder die Mechanik noch die Elektrodynamik als grundlegende Theorie genügen konnten.

Doch im Frühling 1905 hatte Einstein die Möglichkeit aufgegeben, eine grundlegende Theorie auf der Basis bekannter Fakten zu errichten. Die Lichtquanten-Hypothese diente nur als „Heuristik“, insofern, als man nicht davon ausgehen konnte, dass sie jenseits des Wienschen Anteils des Schwarzkörper-Spektrums Gültigkeit hatte. Eine wirklich grundlegende Theorie

18) CPAE 2, Doc. 23, S. 299 (914)

19) CPAE 5, Doc. 27, S. 31

würde wahrscheinlich eine noch seltsamere Vorstellung von Strahlung erfordern und das Bild von den Lichtquanten in angemessen beschränkten Bereichen wiederholen. Doch könnte es in Abwesenheit einer grundlegenden Theorie nicht doch auch ein Übergangsprinzip basierend auf induktiv begründeten Idealisierungen, für die Transformationen effektiver Koordinaten, geben, welche die Elektrodynamik erforderte? Das war der Leitstern für Einsteins Diskussion mit Besso.

Die Lösung überstieg alle Erwartungen, doch nicht, indem sie eine neue grundlegende Theorie lieferte, als welche die Spezielle Relativität heute angesehen wird. Einstein hatte nie Zweifel an der unbeschränkten Gültigkeit des Relativitätsprinzips und des Lichtpostulats (aus letzterem wird in der Allgemeinen Relativität die Forderung, dass von jedem Raum-Zeit-Punkt nur ein Lichtkegel ausgeht). Doch beruhte die relativistische Kinematik, wie er es ausdrückte, auch auf einer operationalen Analyse räumlicher und zeitlicher Messmethoden, welche die Idealisierung starrer Maßstäbe und natürlicher Uhren beinhaltet. Diese ließ sich nicht begründen. Die Vorstellung eines völlig starren Körpers stand in der Tat im Gegensatz zur konventionellen Lehre von der Gleichzeitigkeit, weil sie die Übertragung von Signalen mit Überlichtgeschwindigkeit ermöglichte. 1907 verglich Einstein den Stellenwert der Theorie mit dem des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und beschrieb sie als „heuristisches Prinzip“ zur Herstellung von Beziehungen zwischen scheinbar unabhängigen Regelmäßigkeiten, sodass bestimmte Gesetze auf andere zurückgeführt werden konnten.

Es war jedoch sofort klar, dass der Geltungsbereich dieser Heuristik weit über die Optik und Elektrodynamik hinausreichte. Der Artikel von 1905 hatte einen janusköpfigen Charakter: Das erklärte Ziel, laut Titel und Einleitung, ist die Entwicklung einer Elektrodynamik bewegter Körper. Aber der Schlüssel zu diesem Ziel, der kinematische Teil, leht sich von der Elektrodynamik nur die Minimalvoraussetzung, dass die Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle unabhängig ist. Davon ausgehend, dass diese Voraussetzung erfüllt ist, können Verbindungen zwischen Regelmäßigkeiten völlig ungleichartiger Bereiche hergestellt werden. Wenn sich auch Überreste des ursprünglichen, begrenzteren Projekts in dem Artikel finden – zum Beispiel die Erklärung in §6, dass die übliche Bezeichnung der Lorentz-Kraft als ein „Hilfskonzept“ im „ruhenden“ System nur bis zur ersten Ordnung von v/c korrekt ist – stellte Einstein doch in §10 klar, dass die Ergebnisse zur Elektronenmasse auf jede Art von Punktmasse anwendbar sind. Ein wägbare materieller Punkt, erklärte er, kann in ein Elektron („in unserem Sinne“) verwandelt werden, indem man „eine beliebig kleine elektrische Ladung“ hinzufügt – ein Verweis auf die Tatsache, dass Maxwells Theorie keine Erklärung für die Quantelung von Ladung liefert, und damit weit entfernt von einer grundlegenden Theorie ist. Weil jedoch Einstein Kraft als invariante Größe in der Anwendung des zweiten Newtonschen Gesetzes behandelte, ist es unklar, ob er am Anfang bereits abschätzen konnte, welche Nachbesserungen die Spezielle Relativität außerhalb des Bereichs der Elektrodynamik erfordern würde.

Es vergingen mehrere Monate, bis Einstein erkannte, dass weitreichende Nachbesserungen folgen mussten. Conrad Habicht vertraute er an: „Eine Konsequenz der elektrodynamischen Arbeit ist mir noch in den Sinn gekommen. Das Relativitätsprinzip im Zusammenhang

mit den Maxwellschen Grundgleichungen verlangt nämlich, daß die Masse direkt ein Maß für die im Körper enthaltene Energie ist; das Licht überträgt Masse. Eine merkliche Abnahme der Masse müßte beim Radium erfolgen. Die Überlegung ist lustig und bestechend; aber ob der Herrgott nicht darüber lacht und mich an der Nase herumgeführt hat, das kann ich nicht wissen.“²⁰⁾

Im darauf folgenden, im September fertig gestellten Artikel, „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“²¹⁾, legte er dar, dass sich die Masse eines Körpers – falls man Terme mit Potenzen von vier und mehr in v/c vernachlässigt – um E/c^2 reduziert, wenn er Licht der Energie E aussendet. Hier führt er aus, es sei offensichtlich nicht relevant, ob die Energie in Form von Strahlung (oder anders) abgegeben wird. Doch er liefert keine Begründung. In den folgenden anderthalb Jahre bemühte sich Einstein u. a., die begriffliche Beziehung zwischen den im Bereich der Elektrodynamik erforderlichen Nachbesserungen und der Dynamik im Allgemeinen klarzustellen. Doch erst in seinem maßgeblichen Übersichtsartikel-Artikel von 1907 für das Jahrbuch der Radioaktivität gelangte er zur kanonischen Formulierung der Äquivalenz von Masse und Energie. Zu diesem Zeitpunkt war er auf das Äquivalenzprinzip gestoßen und hatte sich der Gravitation zugewandt.

*

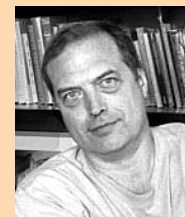
Dieser Artikel beruht auf einem englischen Artikel, der in „Einstein's Annalen Papers“²²⁾ erscheint, und wurde von Jutta Pistor übersetzt.

Literatur

- [1] *W. Wien*, Ann. Phys. **65**, Beilage, i–xviii (1898)
- [2] *H. Fizeau*, Comptes Rendu **33**, 349 (1851)
- [3] *A. Michelson* und *E. Morley*, Amer. J. Sci. **34**, 333 (1887)
- [4] *W. Röntgen*, Ann. Phys. **35**, 264 (1888)
- [5] *J. Stachel*, Astronom. Nach. **303**, 47 (1982)
- [6] *W. de Sitter*, Phys. Z. **14**, 429 (1913)
- [7] *H. Hertz*, Wied. Ann. **40**, 577 (1890); **41**, 369 (1890)
- [8] *H. A. Lorentz*, Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, E. J. Brill, Leiden (1895)
- [9] *A. Michelson* und *E. Morley*, Amer. J. Sci. **31**, 377 (1886)
- [10] *A. Einstein*, Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Vieweg, Braunschweig (1917), §7
- [11] *M. Laue*, Ann. Phys. **23**, 989 (1907)
- [12] *P. Drude*, Ann. Phys. **1**, 566 (1900)
- [13] *W. Wien*, Ann. Phys. **5**, 501 (1900)
- [14] *M. Abraham*, Ann. Phys. **10**, 105 (1903)
- [15] *M. Planck*, Ann. Phys. **1**, 69 (1900)
- [16] *J. C. Maxwell*, A Treatise, On Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford (1873), §792
- [17] *A. Bartoli*, Nuovo Cimento **15**, 195 (1883)
- [18] *L. Boltzmann*, Wied. Ann. **22**, 31 (1884)
- [19] *W. Wien*, Sitzungsber. der Berl. Akad. **55** (1893); Ann. Phys. **52**, 132 (1894)

Der Autor

Robert Rynasiewicz gilt als international anerkannter Philosoph und Wissenschaftshistoriker. Er ist Professor für Philosophie an der John Hopkins University (Baltimore, Maryland). Rynasiewicz hat sich in zahlreichen Publikationen mit Themen zur Geschichte der Physik vom 17. Jahrhundert bis heute beschäftigt. Zu seinen Forschungsinteressen zählen aber auch Logik und Sprachphilosophie.



FRANK DÖRING

20) CPAE 5, Doc. 28, S. 33

21) CPAE 2, Doc. 24, S. 312–314 (53–55)

#) *J. Renn* (Hrsg.), Einstein's Annalen Papers, The Complete Collection 1901–1922, Wiley-VCH, ISBN 3-527-40564-X (2005)