

Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers.

Von P. Ehrenfest.

§ 1.

Herr Einstein sagt¹⁾:

[A] „ Daraus folgt, daß man zu einer befriedigenden Theorie nur dann gelangen kann, wenn man auf die Ätherhypothese verzichtet. Die das Licht konstituierenden elektromagnetischen Felder erscheinen dann nicht mehr als Zustände eines hypothetischen Mediums, sondern als selbständige Gebilde, welche von den Lichtquellen ausgesandt werden, gerade wie nach der Newtonschen Emissionstheorie des Lichts. Ebenso wie gemäß letzterer Theorie erscheint ein nicht von Strahlung durchsetzter, von ponderabler Materie freier Raum wirklich als leer“.

Akzeptieren wir diesen Standpunkt, so veranlaßt uns die Annahme, daß der Raum leer ist zu folgender Behauptung über die Kinematik der emittierten Lichtimpulse:

[B] Die Lichtimpulse, welche eine nichtbeschleunigte Lichtquelle L emittiert, wandern auf konzentrischen Kugeln, deren Radius sich mit der konstanten Geschwindigkeit V vergrößert und deren Mittelpunkt dauernd mit L zusammenfällt.

Dies zugegeben, betrachten wir folgende Anordnung: Vor einem nichtbeschleunigten Beobachter B ruhe eine Lichtquelle L_1 , eine Lichtquelle L_2 laufe mit der konstanten Geschwindigkeit v (z. B. gleich $V/2$) auf den Beobachter los. Mit Hilfe zweier Zahnräder, welche mit derselben Winkelgeschwindigkeit rotieren, bestimme der Beobachter die Lichtgeschwindigkeit für beide Lichtquellen²⁾. Eine einfache Überlegung zeigt, daß aus (B) folgt:

[C] Der Beobachter konstatiert für die gegen ihn anlaufende Lichtquelle L_2 eine höhere Lichtgeschwindigkeit als für die vor ihm ruhende Quelle L_1 ³⁾.

1) A. Einstein, diese Zeitschr. 10, 819, 1909.

2) Diese schematische Modifikation der Fizeauschen Anordnung vermeidet die Verwendung eines Spiegels, damit der Erfolg des idealen Experiments nicht davon abhängig wird, mit welcher Geschwindigkeit die Impulse einer bewegten Lichtquelle nach der Reflexion an einem ruhenden Spiegel zurücklaufen sollen. — Man könnte daran denken, dieses Schema durch Anwendung elektrischer Schwingungen zu realisieren, in Nachahmung der Des Couvresseschen Messung der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen unter Verwendung der elektrischen Doppelbrechung in isotropen Medien. Hier wären aber sehr intensive Lichtquellen nötig, und auch die Genauigkeit der Messung würde wohl weitaus zu gering sein.

3) D. h. wenn eine bestimmte Rotationsgeschwindigkeit der Zahnräder eben ausreicht, um das Licht der Quelle L_1 mit maximaler Helligkeit durchzulassen, so geht das Licht der Quelle L_2 noch nicht mit maximaler Helligkeit durch.

Was besagt über die Behauptung (C) erstens die Einsteinsche Relativitätstheorie, zweitens das Experiment?

§ 2.

Herr Einstein hat seiner Relativitätstheorie als zweites Postulat¹⁾ die Annahme zugrunde gelegt,

[D] „ daß sich das Licht im leeren Raum stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustand des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit V fortpflanze“.

Daß das Postulat (D) mit (B) und (C) unverträglich ist, das ist evident. — Damit die beiden Einsteinschen Aussagen (D) und (A) miteinander verträglich bleiben, dafür ist also offenbar notwendig, die Aussage (A) so zu interpretieren, daß (B) nicht als ihre unvermeidliche Folge angesehen werden muß. Zu diesem Zweck muß man in (A) den Vergleich mit der Newtonschen Emissionstheorie durch die folgende Klausel eingeschränkt denken:

[E] Schon die Kinematik der emittierten Lichtimpulse fällt nicht mehr in jener symmetrischen Weise aus, wie bei der Newtonschen Emissionstheorie, sondern gerade so stark unsymmetrisch, daß das Postulat (D) erfüllt ist²⁾.

Man gelangt damit auf einen Standpunkt, dessen Eigentümlichkeiten sich etwa durch folgende Aussage ersichtlich machen lassen³⁾:

[F] Daß die Lichtquellen L_1 und L_2 ihre Lichtimpulse mit der gleichen Geschwindigkeit durch den Meßapparat des Beobachters senden, dafür muß nicht unbedingt durch Einführung des Ätherpostulats gesorgt werden; schon die Einführung des Postulats (D) besorgt das⁴⁾.

Ist dieser Standpunkt „physikalisch befriedigend“? Oder ist man „berechtigt“, wenn nicht gar „verpflichtet“, eine Erklärung zu verlangen, „warum“ sich die Lichtimpulse im leeren (!) Raum gerade so unsymmetrisch aus-

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17, 892, 1905. Die Bezeichnung „zweites Postulat der Relativitätstheorie“ rührt, wenn ich nicht irre, von Tolman her: Phys. Rev. 31, 26, 1910.

2) Der Beobachter B konstatiert, daß sich die von der Quelle L_2 emittierten Impulse in exzentrischen Kugeln ausbreiten, und zwar genau so, „als ob“ es Wellen in einem vor ihm ruhenden Äther wären.

3) Vgl. Einstein, Ann. d. Phys. 17, 892, 1905: „Die Einführung eines ‚Lichtäthers‘ wird sich insofern als überflüssig erweisen“

4) Man betrachte von diesem Standpunkt auch jenes Argument, das kürzlich Prof. Wiechert ausführlich darlegte (diese Zeitschr. 12, 689—707, 737—758, 1911): Wenn es kein Äther gibt, wenn der Raum wirklich „leer“ ist, was ist dann alle Geschwindigkeiten größer als $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec⁻¹ physikalisch unmöglich, wie das die Einsteinsche Relativitätstheorie annimmt?

breiten, daß das Postulat (D) erfüllt wird. Ich vermeide eine Diskussion darüber; denn hier entscheidet in letzter Instanz Geschmack und allmähliche Gewöhnung. Mir kam es nur darauf an, zu betonen: wenn man jener „ätherlosen“ Theorie physikalische Plausibilität zu verschaffen sucht durch den Hinweis auf die Newtonsche Emissionstheorie und zwar ohne explizite Einschränkung dieses Vergleichs durch die Klausel (E), so ist das irreführend: es läßt die Kluft übersehen, die in bezug auf die Kinematik der Impulsausbreitung zwischen beiden Theorien liegt — es läßt den Äther denn doch schon allzu entbehrlich erscheinen!

Es wird sich dementsprechend empfehlen, die Bezeichnung „Emissionstheorie der elektromagnetisch-optischen Erscheinungen“ für solche Theorien zu reservieren, welche in wirklicher Analogie zur Newtonschen Emissionstheorie über die Kinematik der Impulsausbreitung die Annahme (B) machen und das Postulat (D) verwerfen.

§ 3.

Eine solche Emissionstheorie der elektromagnetischen Erscheinungen hat bekanntlich Ritz entwickelt¹⁾. In dieser Theorie emittieren die Elektronen die retardierten Potentiale gemäß (B) und (C) und unter Verletzung des Postulats (D). Ritz erblickt in dem Postulat (D) einfach einen letzten überflüssigen Überrest der sonst schon ganz eliminierten Ätherhypothese!²⁾ Der Zweck der Ritzschen Untersuchung war zu zeigen, daß seine Emissionstheorie eine exakte Relativitätstheorie liefert, die im Gegensatz zur Einsteinschen Relativitätstheorie keinerlei Kontraktion von starren Körpern erfordert, keinerlei Änderung im Gang der Uhren und auch nicht die Annahme von der physikalischen Unmöglichkeit von Fortpflanzungsgeschwindigkeiten größer als $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec⁻¹. In der Tat führt ja die Einsteinsche Relativitätstheorie zu jenen Eigentümlichkeiten nur deshalb, weil sie die negativen Resultate der Experimente vom Typus des Michelsonschen durchaus mit Beibehaltung des — historisch aus der Ätherhypothese stammenden (Maxwell → Lo-

rentz → Einstein) — Postulates (D) erklären will.

§ 4.

Könnte man nicht vielleicht wirklich, wie Ritz es will, das Postulat (D) zugunsten der Annahme (B) aufgeben? Oder gibt es irgendwelche experimentelle Fakten, die dieses verbieten?

Ritz selber legte besonderen Nachdruck auf den Nachweis, daß der Übergang von (D) zu (B) sich innerhalb der experimentell gut erforschten Gebiete wegen der Kleinheit der diesbezüglichen Effekte im allgemeinen nicht bemerkbar macht¹⁾. Wohl weist er in seiner Arbeit auf einige experimentell prüfbare Sonderresultate seiner Theorie hin²⁾, doch handelt es sich dabei nicht um eine Prüfung gerade der Annahme (B).

Eher gehört hierher ein optischer Effekt an Kanalstrahlen, auf den Ritz in einem Brief an Prof. Paschen (1908) als Basis für ein Experimentum crucis hinweist³⁾: „... Nach der Lorentz-Einsteinschen Relativitätstheorie muß die Wellenlänge, die ein bewegtes Atom aussendet, nicht nur in der Richtung der Bewegung nach dem Dopplerschen Prinzip sich verändern, sondern auch bei Beobachtung senkrecht zur Richtung der Geschwindigkeit v muß sich eine Verschiebung nach Roth im Betrag $\frac{1}{2} \lambda (v/V)^2$ ergeben (vgl. Einstein, Ann. d. Phys. **33**, 1907)⁴⁾. — Während die Einsteinsche Theorie unbedingt die Existenz dieses Effekts fordert und die Ritzsche Emissionstheorie unbedingt seine Nichtexistenz, bleibt bei der Maxwell'schen Theorie diese Frage noch offen.

§ 5.

Überlegt man, welche Effekte zu einer möglichst direkten Entscheidung zwischen den Annahmen (D) und (B) führen könnten, so wird man zunächst an Anordnungen denken, die geeignet wären, unmittelbar die Lichtgeschwindigkeit für verschieden rasch bewegte Lichtquellen zu messen oder miteinander zu vergleichen. Hier stellt sich aber, wie die genaue Analyse der Ritzschen Theorie zeigt, folgende Schwierigkeit ein: Sobald die Meßanordnung die Reflexion an einem Spiegel erfordert oder auf Interferenzbestimmungen beruht, hängt der Endeffekt nur in Gliedern zweiter Ordnung von der Geschwindigkeit v ab, mit der sich die Lichtquelle

1) W. Ritz, Rech. crit. sur l'électrodynamique générale. Ann. de chim. et phys. **13**, 145, 1908 [= Gesamm. Werke, S. 317]. Unabhängig von Ritz haben später noch folgende Autoren die Annahme (B) verfolgt: Lewis und Tolman, Phil. Mag. **18**, 510, 1909; Comstock, Phys. Rev. **30**, 267, 1910; Tolman, Phys. Rev. **30**, 291, 1910; **31**, 26, 1910; Stewart, Phys. Rev. **32**, 418, 1911.

2) W. Ritz, Sur les théories électrodyn. de Maxwell-Lorentz. Arch. de Genève **16**, 209, 1908 [Gesamm. Werke, S. 427]; W. Ritz, Du rôle de l'éther en physique. Scientia **5**, 1909 [Gesamm. Werke, S. 447].

1) Siehe in „Electr. générale“ II. partie: § 12, 13, 6.

2) Ebendort, z. B. § 8, Ende.

3) W. Ritz, Gesamm. Werke (Paris 1911), S. 524.

4) Es müßte hier also dafür gesorgt werden, daß die Kanalstrahlen sehr genau normal zur Visierlinie laufen.

dem Meßapparat nähert¹⁾. Danach kann man auf diesem Weg nicht leicht zu einem wirklich durchführbaren Experimentum crucis zwischen der Einsteinschen Annahme (D) und der Ritzschen Annahme (B) gelangen.

§ 6.

Man darf aber hoffen, auf irgendwelchen anderen Wegen zu einer deutlichen Entscheidung zwischen (D) und (B) gelangen zu können. Denn es gibt in der Tat solche Gebiete, in denen sich der Übergang von (D) zu (B) ganz grell bemerkbar machen mußte.

Zu eigentümlichen Folgerungen führt z. B. die Emissionstheorie bezüglich der Kinematik der vorderen und hinteren Front eines Röntgenimpulses²⁾: Ein Elektron laufe von links nach rechts mit der Geschwindigkeit v (z. B. gleich $0,9 V$) und verliere diese Geschwindigkeit innerhalb einer sehr kurzen Bremsstrecke. Die retardierten Potentiale, die am Beginn der Bremsstrecke ausgesendet werden, breiten sich auf Kugeln aus, deren Mittelpunkte mit der Geschwindigkeit v fortfahren, nach rechts zu laufen; für die retardierten Potentiale, die am Ende der Bremsstrecke ausgesendet werden, bleiben die Kugelmittelpunkte stehen. Verfolgt man die Ausbreitung dieser ersten und letzten Potentialkugeln, so sieht man leicht ein, daß in der Richtung nach rechts die Distanz zwischen ihnen mehr und mehr wächst, je weiter sie sich ausbreiten — nach links findet zunächst eine Annäherung statt, dann ein Überholen der früheren durch die späteren Potentiale (in der nächsten Nähe der Bremsstelle) und weiterhin ebenfalls wachsende Distanzierung —, die „Impulsbreite“ des Röntgenimpulses würde also in verschiedenen Entfernungen von der Bremsstelle verschiedene Größe haben, und zwar in der Entfernung von einigen Zentimetern schon die Größenordnung von einem Zentimeter.

1) Die präzise Fassung der obigen Behauptung und ihr Beweis soll an anderer Stelle nachgetragen werden, weil sie mit größeren Umständen verknüpft sind. — Effekte zweiter Ordnung lassen sich leicht angeben. Das einfachste Beispiel dürfte folgendes sein: Auf einen parabolischen Spiegel mögen ebene Lichtimpulse parallel zur Achse einfallen, von einer Lichtquelle stammend, die mit der Geschwindigkeit v parallel zur Achse auf den Spiegel zuläuft. Dann sammeln sich die Strahlen nicht im Brennpunkt des Paraboloides (wie für $v=0$), sondern in einem Achsenpunkt, der um das Stück: $[\text{Brennweite}] \cdot (v/V)^2$ näher zum Scheitel des Paraboloides liegt. (Bei Einstein und Maxwell würde die Lage des Konvergenzpunktes unabhängig sein von der Geschwindigkeit, mit welcher die Lichtquelle sich dem Spiegel nähert.)

2) Man vergleiche mit den folgenden Bemerkungen die Resultate, die Herr Sommerfeld aus der Äthertheorie des Röntgenimpulses gewinnt (diese Zeitschr. 10, 969, 1909; 11, 99, 1910; Bayr. Ak. 7. I. 1911.

Dieses Resultat ist natürlich unannehmbar. Eine überzeugende Reductio ad absurdum der Annahme (B) ist aber auf diesem Wege kaum zu gewinnen; denn es bleiben noch viele Auswege offen, z. B. die Annahme, daß die während des Bremsvorgangs ausgesendeten Potentiale zusammen schon eine physikalische Einheit bilden und sich mit einer mittleren Geschwindigkeit gemeinsam ausbreiten; oder irgendeine andere Modifikation der Hypothese über die Entstehung der Röntgenstrahlen.

Immerhin ist dieses Beispiel charakteristisch für einige Besonderheiten, die sich beim Übergang von (D) zu (B) ergeben.

§ 7.

Die obigen Ausführungen zeigen zumindest die prinzipielle Möglichkeit einer experimentellen Entscheidung zwischen dem Einsteinschen Postulat (D) und der Ritzschen Annahme (B). Stellen wir uns nun vor, es gelänge demnächst irgend jemandem, den Plan eines praktisch ausführbaren Experimentum crucis zwischen (D) und (B) zu finden. Welche Situation würde sich ergeben?

Die Anhänger der Ätherhypothese müssen wünschen, daß sich das Postulat (D) als erfüllt erweist.

Die Anhänger der eigentlichen Emissionstheorie müssen wünschen, daß die Annahme (B) sich bestätigt.

Die Anhänger der Einsteinschen Relativitätstheorie müssen wünschen, daß diesmal die Anhänger der Ätherhypothese gegenüber den Anhängern der eigentlichen Emissionstheorie recht behalten¹⁾.

An Hand dieser Erwägungen kann man sich darüber vergewissern, in welchem Sinne Herr Einstein von seiner Relativitätstheorie sagt: sie könne die Hypothese eines „Lichtäthers“ entbehren, insofern für sie schon vollkommen das Postulat (D) und solche Annahmen ausreichen, wie die betreffs der Unmöglichkeit von Ausbreitungsgeschwindigkeiten größer als $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec⁻¹.

1) In der Tat, man bedenke, was es für die Einsteinsche Relativitätstheorie bedeuten würde, wenn sich plötzlich (D) als unrichtig und (B) als richtig erweisen sollte! Es würde bedeuten, daß die ganze Lehre von der Kontraktion der starren Körper, der Gangordnung der Uhren usw. usw. nichts anderes ist, als eine Kompensation für einen Fehler: eine Kompensation dafür, daß man trotz des Michelsonschen Versuches an der aus der Äthertheorie stammenden Annahme (D) festhielt.

St. Petersburg, November 1911.

(Eingegangen 2. Dezember 1911.)