

# Die klassische Physik vom Kopf auf die Füße gestellt

Wie Einstein die Spezielle Relativitätstheorie fand

Jürgen Renn

**Albert Einstein, dessen 125. Geburtstag wir dieses Jahr feiern, hat mit seiner Relativitätstheorie unsere Begriffe von Raum und Zeit zweimal grundlegend verändert: zuerst im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie von 1905 und dann im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie von 1915. Wie kam der junge Albert Einstein dazu, diese Revolution auszulösen?**

Nach der Speziellen Relativitätstheorie verhalten sich relativ zu einem Bezugssystem bewegte Uhren und Maßstäbe anders als in einem solchen System ruhende Maßstäbe und Uhren. Bewegte Uhren gehen langsamer und bewegte Maßstäbe schrumpfen in Bewegungsrichtung. Während in der klassischen Physik Raum und Zeit ein für alle physikalischen Vorgänge unveränderliches und absolut feststehendes Gerüst jedes Experiments und jeder Theorie vorgeben, ist dieses Gerüst nach der Speziellen Relativitätstheorie abhängig vom Bezugssystem, aus dem heraus ein bestimmter Vorgang gemessen wird, und nach der Allgemeinen Relativitätstheorie sogar von der Verteilung von Materie und Energie im Universum. Schon die Veränderung der Begriffe von Raum und Zeit durch die Spezielle Relativitätstheorie widerspricht unseren Alltagsvorstellungen. Aber nur durch diese Veränderung gelang es ihr, zwei Annahmen miteinander in Übereinstimmung zu bringen, die sich beide auf Grund einer langen Geschichte als unabweislich herausgestellt hatten: das Relativitätsprinzip und das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Das Relativitätsprinzip besagt, dass sich die physikalischen Gesetze nicht ändern, wenn man von einem ruhenden zu einem gleichförmig und gradlinig bewegten Laboratorium übergeht. Das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist ein solches physikalisches Gesetz; es besagt, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen solchen Systemen die gleiche ist. Also sollte sich auch ein Lichtstrahl, der z. B. von einem mit der Geschwindigkeit  $v$  fahrenden

den Zug ausgesendet wird, für einen Beobachter am Bahnsteig mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  bewegen und nicht etwa mit  $c+v$ . Nur durch eine revolutionäre Veränderung der klassischen Begriffe von Raum und Zeit ließ sich dieser Widerspruch auflösen.

## Ein Gespräch im Mai

Nachdem Einstein sein Studium als Physiklehrer am Polytechnikum in Zürich abgeschlossen hatte, lebte und arbeitete er seit 1902 in Bern. Hier stand er, wie wir aus einem späteren Bericht schließen können,<sup>1)</sup> an einem schönen Maitag jenes Jahres auf und besuchte seinen Freund und Patentamtskollegen Michele Besso, um mit ihm wieder einmal über sein Steckenpferd, die Elektrodynamik bewegter Körper, zu diskutieren, einem scheinbar entlegenen Spezialgebiet der damaligen Physik, in dem es vor allem um bewegte Ladungen und die Wechselwirkungen elektrischer und magnetischer Felder ging. Besso war Ingenieur und kein Physiker. Aber er war ein an physikalischen Problemen interessierter Laie und gehörte zu den Gesprächspartnern, die der junge Einstein besonders schätzte. Wie können wir uns die Begegnung zwischen Einstein und Besso vorstellen? Einstein wurde nicht müde, dem Freund sein Problem mit der Elektrodynamik bewegter Körper immer wieder in allen Einzelheiten zu erläutern. Er gestand ein, dass er kurz davor stehe, aufzugeben. Dennoch rang er sich dazu durch, Besso noch einmal seine schier ausweglose Lage zu schildern. Vielleicht hatte Besso ja eine Idee. „Ich liebe ihn wegen seines Scharfsinns und seiner Einfachheit“ schrieb Einstein einmal an seine Frau Mileva.<sup>2)</sup>

Besso folgte wie gewohnt geduldig und aufmerksam Einsteins Erläuterungen, auch wenn manche Einzelheiten jenseits seines Laien-Horizonts lagen. Aber diesmal unterbrach Besso seinen Freund häufiger als sonst mit Zwischenfragen, sodass die Diskussion wie im Kreise verlief und immer wieder zum Anfang zurückkehrte. Die beiden



**Albert Einstein (1879–1955) als Angestellter am Berner Patentamt um 1906.**

diskutierten das Verhalten von Körpern in relativ zueinander bewegten Bezugssystemen und stellten Überlegungen an, welche Veränderungen elektrischer und magnetischer Größen man innerhalb solcher Bezugssysteme messen würde. Einstein glaubte aus grundsätzlichen Erwägungen heraus nicht, dass die Relativbewegung zwischen zwei zueinander gleichförmig bewegten Beobachtern sich bei Messungen elektromagnetischer und optischer Erscheinungen physikalisch bemerkbar machen würde. Doch die Verwirklichung einer Theorie, in der alle relativ zueinander gleichförmig bewegten Bezugssysteme für die Beurteilung jedes einzelnen physikalischen Vorganges prinzipiell gleichberechtigt sind, erwies sich als äußerst schwierig. Dabei fehlte es keineswegs an einer überzeugenden Theorie, die praktisch alle bekannten elektromagnetischen und damit auch optischen Erscheinungen, auch die aus gleichförmig sich bewegenden Bezugssystemen heraus beobachteten, erklären konnte. Es war die Theorie, die der holländische Altmeister der Physik Hendrik Antoon Lorentz seit den achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts entwickelt hatte. Allerdings genügte sie Einsteins Vorstellung von der Gleichberechtigung der Bezugssysteme bei der Beurteilung elektromagnetischer Prozesse nicht. Auch deshalb spielte die Theorie

Zitiert wird nach J. Stachel et al. (Hrsg.), *Collected Papers of Albert Einstein (CPAE)*, Bd. 1: *the Early Years 1897-1902* bzw. Bd. 2: *The Swiss Years: Writings 1900-1909*, Princeton University Press, Princeton, 1987 bzw. 1989

1) Einsteins Vortrag in Kyoto am 14. Dezember 1922, vgl. auch die Editorische Notiz in CPAE 2, S. 255-274 (hier S. 264)

2) *A. Einstein an Mileva Marić*, 30. Aug. od. 6. Sept. 1900, in: CPAE 1, Doc. 74, S. 258, s. a. J. Renn und R. Schulmann (Hrsg.), *Albert Einstein / Mileva Marić. Am Sonntag küsst' ich Dich mündlich. Die Liebesbriefe 1897-1903*, Piper, München 1994

**Prof. Dr. Jürgen Renn, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Wilhelmstraße 44, 10117 Berlin**

von Lorentz in dem Gespräch zwischen Einstein und Besso an jenem entscheidenden Tag im Mai 1905 wohl eine wichtige Rolle. Selbst in der Erklärung Einsteins, der sie in allen Details durchdrungen hatte,

**Einsteins Freund und Patentamtskollege Michele Besso (1873–1955, hier mit seiner Frau Anna), ein Ingenieur, war Einsteins wichtigster Gesprächspartner bei der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie.**



war diese Theorie technisch so komplex, dass sie Besso immer wieder zu Nachfragen herausforderte. Was bedeutet diese oder jene Größe eigentlich genau? Kann man sie auch direkt messen?

Solche scheinbar naiven Fragen waren typisch für Besso. Er war es auch, der Einstein noch in der gemeinsamen Züricher Zeit auf die Werke des Physikers, Philosophen und Wissenschaftshistorikers Ernst Mach aufmerksam gemacht hatte, der alle Begriffe aus der Physik ausschließen wollte, die sich nicht auf direkte empirische Erfahrung stützten.<sup>3)</sup> Und was man auch an Positivem von der überaus erfolgreichen Theorie Lorentz' sagen konnte, an solchen Begriffen war sie nicht gerade arm. Da war insbesondere jener obskure Begriff des Äthers, gedacht als Träger der elektromagnetischen Erscheinungen und damit auch der Lichtausbreitung, in Analogie zu den Medien, die die Ausbreitung von Wasserwellen oder Schallwellen tragen; es gab eine nicht der direkten Messung zugängliche Hilfsvariable für die Zeit, die so genannte lokale Zeit, die man für ein Theorem brauchte, mit dessen Hilfe sich elektromagnetische Erscheinungen in bewegten Körpern berechnen ließen, und da gab es auch die Hypothese einer ominösen Längenverkürzung, der Körper in Richtung ihrer Bewegung durch den Äther ausgesetzt waren. Diese Annahme hatte Lorentz einführen müssen, um zu erklären, warum das berühmte Experiment von Michelson und Morley nicht den kleinsten Hinweis auf diese vermutete Bewegung der Erde durch den Äther finden konnte.

Einstein und Besso redeten sich die Köpfe heiß. Plötzlich ging ein Leuchten über Einsteins Gesicht, doch er schwieg dazu und verließ Besso alsbald unter einem Vorwand. Dieser schneuzte sich etwas verlegen, kannte aber seinen Freund gut genug, um die Sache nicht persönlich zu nehmen. Am nächsten Tag kehrte Einstein mit einem verschmitzten Lächeln zu Besso zurück, grüßte gar nicht erst, sondern bemerkte nur lakonisch: „Danke Dir, ich habe mein Problem vollständig gelöst!“ Etwa fünf Wochen später, am 30. Juni 1905, reichte Einstein die Epoche machende Arbeit mit dem Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ bei den Annalen der Physik ein – und begründete damit die Spezielle Relativitätstheorie. Die Arbeit enthält keinerlei Referenzen – nur eine Danksagung an den treuen Freund und Patentamtskollegen Michele Besso.<sup>4)</sup>

Unglücklicherweise sind historische Aufzeichnungen, die den entscheidenden Augenblick der Entstehung der Relativitätstheorie derart plastisch schildern, nicht vorhanden. Aber selbst wenn sich alle Details eines solchen Gesprächs, etwa aus den Aufzeichnungen einer Haushälterin, rekonstruieren ließen – was würde ein solcher Bericht zum Verständnis einer wissenschaftlichen Revolution wie der Entstehung der Relativitätstheorie beitragen? Im Folgenden soll versucht werden, diese wissenschaftliche Revolution auf eine Weise verständlich zu machen, die die aus den Quellen bekannten biografischen

Details in den Kontext der Veränderungen von Wissenssystemen stellt, wie sie am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte untersucht werden. Solche Wissenssysteme verändern sich typischerweise in langfristigen Prozessen, an denen nicht nur das wissenschaftliche Wissen, sondern auch andere Schichten des Wissens beteiligt sind. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach der Entstehung der Relativi-

tätstheorie nicht nur als die Frage nach den Umständen von Einsteins „Heureka“ im Mai 1905, sondern als die Frage, wie seine theoretischen Einsichten mit diesen anderen Schichten des Wissens zusammenhängen, insbesondere mit jener Schicht, die unser Alltagsverständnis von Raum und Zeit bestimmt.

### Grenzprobleme der klassischen Physik

Wie aber war es möglich, dass ein Gespräch zwischen Einstein und Besso im Mai 1905 eine Entwicklung mit derart weitreichenden Konsequenzen für den Wandel von Wissenssystemen in Gang gesetzt hat? Natürlich war dieses Gespräch nur der Endpunkt einer längeren Entwicklung. Einstein hatte sich praktisch seit seiner Jugend mit Problemen der Elektrodynamik befasst – seine Familie stellte schließlich elektrotechnische Geräte her. Schon mit sechzehn schrieb der junge Albert einen Aufsatz über den Äther als Träger elektromagnetischer und optischer Erscheinungen.<sup>5)</sup> Schon im darauf folgenden Jahr fragte er sich, wie eine Lichtwelle für

einen Beobachter aussehen würde, der sich selbst mit Lichtgeschwindigkeit neben dieser Lichtwelle entlang bewegt.<sup>6)</sup> Es müsste eine Art stehende Welle zu sehen sein, aber so etwas schien es nicht zu geben. Dieses jugendliche Gedankenexperiment warf auch die Frage auf, welche Lichtgeschwindigkeit ein bewegter Beobachter messen würde. Die Antwort auf diese Frage hing offensichtlich vom zugrunde gelegten Äther-

modell ab. In einem ruhenden, also von dem bewegten System und seinem Beobachter nicht mitgeführten Äther müsste sich jedenfalls die Relativgeschwindigkeit des Lichtes relativ zum bewegten System ändern.

Dieses Gedankenexperiment macht deutlich, dass die Probleme, mit denen sich Einstein beschäftigte, von einer ganz besonderen Art waren, die mit der inneren Struktur des Wissenssystems der klassischen



**Auch Mileva Marić (1875–1947), eine ehemalige Kommilitonin, die Einstein 1902 geheiratet hatte, war für Einstein zunächst eine intellektuelle Partnerin – einmal sprach er sogar von „unsere(r) Arbeit über die Relativbewegung“ – bevor sie immer mehr in die Rolle von Hausfrau und Mutter gedrängt wurde. (Foto: Schweizerische Landesbibliothek Bern)**

3) Michele Besso an Aurel Stodola, 22. August 1941, SzZE Bibliothek (ETH Zürich), Hs. 496:5

4) A. Einstein, Annalen der Physik 17 (1905), in: CPAE 2, Doc. 23, S. 275–317

5) A. Einstein, Sommer? 1895, in: CPAE 1, Doc. 5, S. 6–9

6) A. Einstein und P. A. Schilpp (Hrsg.), Autobiographical Notes: a centennial edition, Open Court, La Salle 1992, S. 48 (Im Folg. Autobiographical Notes)

Physik zusammenhängt. Probleme wie das der Wellenausbreitung in einem bewegten System liegen nämlich – wie überhaupt die Probleme der Elektrodynamik bewegter Körper – im Grenzbereich von Elektrodynamik und Mechanik und gehören damit zu der Klasse von Problemen, an denen sich der Wandel von der klassischen zur modernen Physik vollzog.

Die klassische Physik gliederte sich im Wesentlichen in drei Teilbereiche mit eigenständigen begrifflichen Grundlagen: Mechanik, Wärmelehre und Elektromagnetismus. An den Grenzen zwischen diesen Teilbereichen lagen jeweils die Probleme, an denen unterschiedliche begriffliche Grundlagen aufeinander trafen. Erst in der Behandlung dieser Grenzprobleme konnte sich erweisen, inwieweit die verschiedenen Begrifflichkeiten der drei Teilbereiche überhaupt miteinander verträglich waren. Andererseits wirkt die Entdeckung von begrifflichen Unverträglichkeiten anhand eines konkreten Problems typischerweise als Motor wissenschaftlicher Innovation. Denn jeder Versuch, ein solches konkretes Problem zu lösen, zwingt zugleich dazu, die beteiligten Begriffe neu zu überdenken und kann bei der Umgestaltung dieser Begriffe und sogar ganzer Theorien wegweisend sein.

Aus diesem Grunde konnten die Grenzprobleme der klassischen Physik zu den Ausgangspunkten zur Überwindung genau dieser Grenzen werden. Das Problem der Wärmestrahlung im Gleichgewicht, an dem Max Planck arbeitete, war ein solches Grenzproblem, das zwischen der Wärmelehre und der zum Elektromagnetismus gehörigen Strahlungslehre liegt. Es stand im Mittelpunkt einer weiteren der drei revolutionären Arbeiten Einsteins aus dem Jahre 1905 und wurde – nicht zuletzt durch diesen Beitrag – zur Keimzelle der Quantentheorie.<sup>7)</sup> Das Problem der Brownschen Bewegung, ebenfalls Gegenstand einer Arbeit Einsteins aus seinem annus mirabilis,<sup>8)</sup> war ein Grenzproblem zwischen Mechanik und Wärmelehre und wurde zu einem Ausgangspunkt der modernen statistischen Physik. Die Elektrodynamik bewegter Körper schließlich, Einsteins besonderes Steckenpferd, umfasste, wie bereits ausgeführt, Grenzprobleme zwischen Mechanik und Elektromagnetismus, aus deren Behandlung sich die Relativitäts-

theorie entwickelte. Mit anderen Worten, alle wichtigen begrifflichen Umbrüche der Physik des frühen zwanzigsten Jahrhunderts sind aus solchen Grenzproblemen der klassischen Physik hervorgegangen.

Am Beispiel der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie lässt sich zeigen, wie sich ein solcher Umbruch als Ergebnis der Wechselwirkung zwischen den verfügbaren Wissensressourcen der damaligen Physik und der individuellen Perspektive eines Forschers vollzogen hat. Was immer die Perspektive Einsteins im Einzelnen bestimmt hat, sie muss jedenfalls dazu beigetragen haben, seine Aufmerksamkeit auf jene Grenzprobleme der klassischen Physik zu lenken. Diese Perspektive entwickelte sich, wie im Folgenden gezeigt werden soll, in drei Phasen:

- ▶ Experimentierphase,
- ▶ Theoriephase und
- ▶ Reflexionsphase.

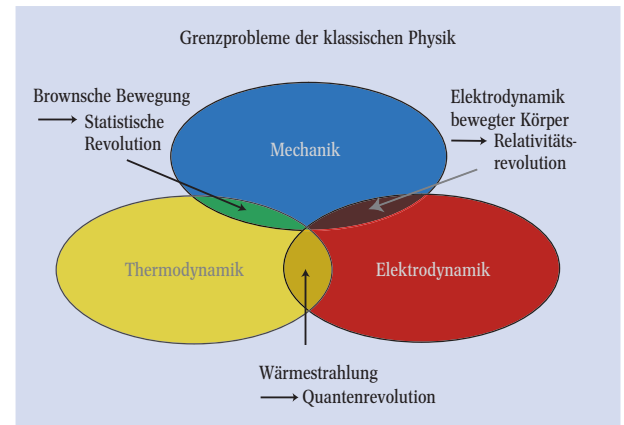
In einem gewissen Sinne waren alle drei Phasen revolutionär. Die ersten beiden Phasen waren es allerdings nur subjektiv, für Einstein persönlich, während erst die dritte Phase, die Reflexionsphase, zu einer Revolution in der Geschichte des physikalischen Wissens Anlass gab.

### Die Experimentierphase

Die Experimentierphase war vor allem durch die unablässigen Bemühungen Einsteins gekennzeichnet, die Bewegung der Erde durch den Äther experimentell nachzuweisen, um damit an der damaligen Forschungsfront eine ehrgeizige Pionierleistung zu erbringen. Soviel jedenfalls ist klar, auch ohne dass die verfügbaren Dokumente genaueren Aufschluss über diese Experimente geben. Schon im Sommer 1899 plante er Strahlungsversuche mit seinem ehemaligen Lehrer Conrad Wüest in Aarau, einem der frühen Pioniere von Röntgenstrahl-Untersuchungen in der Schweiz.<sup>9)</sup> Von diesen gemeinsamen Experimenten erhoffte Einstein sich zunächst eine Antwort auf die Frage, welche von den zwei großen Strömungen der Elektrizitätslehre der damaligen Zeit der physikalischen Wirklichkeit entspricht: die atomistische Auffassung der Elektrizität, wie sie vor allem auf dem europäischen Kontinent verbreitet war, oder die Auffassung, die in der Tradition Maxwells ausschließlich von einem kontinuierlichen Medium der Elektrizität ausging. Die Realisierung

der geplanten Experimente verzögerte sich jedoch. Der Prinzipal der Schule von Aarau, Rektor Wüest, hatte offenbar andere Prioritäten.<sup>10)</sup> Doch schon bald, im Spätsommer 1899, hatte Einstein eine Idee zur Untersuchung, welchen Einfluss die Relativbewegung der Körper gegen den Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in durchsichtigen Körpern hat.<sup>11)</sup> Ein starkes Argument dafür, dass dieser Lichtäther ruht, war das Phänomen der so genannten Aberration (siehe Abb. auf der folgenden Seite).

Wenn man die Position eines Sterns im Laufe des Jahres aus verschiedenen Positionen in der Erdbahn betrachtet, unterliegt sie bestimmten regelmäßigen Schwankungen. Wenn der beobachtete Stern sehr weit entfernt ist, können diese Schwankungen seiner



**Erst in der Behandlung der Grenzprobleme der klassischen Physik konnte sich erweisen, inwieweit die verschiedenen Begrifflichkeiten ihrer Teilbereiche miteinander verträglich waren. Die Entdeckung von begrifflichen Unverträglichkeiten anhand eines konkreten Problems wirkt dabei als Motor wissenschaftlicher Innovation.**

scheinbaren Position nicht von der Parallaxe herrühren, also von der sich verändernden Blickrichtung auf den Stern. Sie können vielmehr, wie schon Bradley Anfang des 18. Jahrhunderts bemerkt hat, auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass sich die Geschwindigkeit des Lichts, das vom Stern kommt, und die Geschwindigkeit der Erdbewegung so zusammensetzen, dass das Licht des Sterns je nach Bewegungsrichtung der Erde aus einer verschiedenen Richtung zu kommen scheint.<sup>12)</sup>

Bei genauerer Behandlung des Aberrationsproblems treten allerdings zwei Schwierigkeiten auf: Erstens gilt bei der Annahme, dass Licht eine Wellenbewegung in einem Trägermedium wie dem Äther darstellt, die beschriebene Zusammensetzung der Geschwindigkeiten nur, wenn man außerdem noch die

7) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17 (1905), in: CPAE 2, Doc. 14, S. 149–169

8) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17 (1905), in: CPAE 2, Doc. 16, S. 223–236.

9) Albert Einstein an Julia Niggli, 28. Juli 1899, in: CPAE 1, Doc. 48, S. 218–219; siehe auch Albert Einstein an Mileva Marić, 10. August 1899, in: CPAE 1, Doc. 52, S. 225–227

10) Vgl. Albert Einstein an Mileva Marić, 28. September 1899, in: CPAE 1, Doc. 57, S. 233

11) Albert Einstein an Mileva Marić, 10. September 1899. In: CPAE 1, Doc. 54, S. 229–231.

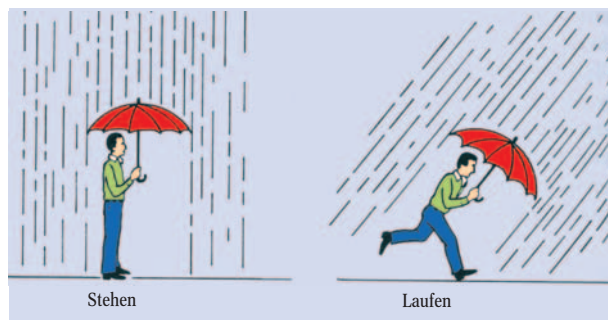
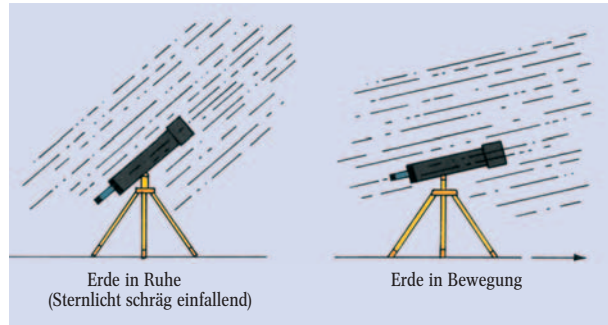
12) Vgl. auch für das Folgende, M. Janssen und J. Stachel, The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies, in: John Stachel Going Critical, Kluwer, Dordrecht (im Druck)

13) „Aber auch (...) das Phänomen der Aberration führte (...) mich.“ Nachricht von *Albert Einstein* für *R. S. Shankland*, in: CPAE 2, S. 253–274 (hier S. 262)

14) *Albert Einstein* an *Mileva Marić*, 10? August 1899, in: CPAE 1, Doc. 52, S. 226

Hypothese einführt, dass dieses Licht-Medium in Ruhe ist – denn sonst würden sich Komplikationen ergeben. Einstein erinnerte sich später, dass Überlegungen zur Aberration ihn auf seinem Wege zur Speziellen Relativitätstheorie begleitet haben.<sup>13)</sup> Sie standen jedenfalls in Übereinstimmung mit der Überzeugung, der er in seinem Brief vom Sommer 1899 Ausdruck gab, dass es keinen Sinn mache, von einer Bewegung des Äthers zu sprechen.<sup>14)</sup>

Die zweite Schwierigkeit beim Verständnis der Aberration ergibt



Die Aberration lässt sich darauf zurückführen, dass sich die Geschwindigkeit des Lichts, das vom Stern kommt, und die Geschwindigkeit der Erdbewegung so zusammensetzen, dass das Sternlicht je nach Bewegungsrichtung der Erde aus einer verschiedenen Richtung zu kommen scheint. Dieses Phänomen tritt z. B. auch im Alltag auf, wenn sich die Bewegung des senkrecht von oben fallenden Regens mit der Bewegungsrichtung eines Fußgängers so zusammensetzt, dass dieser seinen Regenschirm leicht nach vorne neigen muss, um trocken zu bleiben, weil für ihn der Regen schräg von vorn herunterfällt (Quelle: *Hoffmann, Banesh, Relativity and its Roots*, Dover 1983, S. 59).

15) *W. Wien*, Ann. d. Phys. u. Chem. 65 (1898), Nr. 3 (Beilage), S. xvii

16) Vgl. *Albert Einstein* an *Marcel Grossmann*, 14. April [1901], in: CPAE 1, Doc. 100, S. 290–291, s. a. *J. Renn*, *Einstein's Controversy with Drude and the Origin of Statistical Mechanics*, in: *D. Howard* und *J. Stachel* (Hrsg.), *Einstein: The Formative Years 1897–1909*, Birkhäuser, Boston 2000, S. 107–157

sich, wenn man in Betracht zieht, dass man zur Beobachtung von Sternen auch Teleskope braucht, dass man also nicht nur mit der Lichtausbreitung im angenommenen Äther, sondern auch mit einer Lichtausbreitung in optisch transparenten Stoffen, wie zum Beispiel Glas, rechnen muss. Innerhalb eines solchen Stoffes bewegen sich aber Lichtstrahlen mit einer geringeren Geschwindigkeit als im Äther, so dass sich eigentlich der Effekt der Aberration verändern müsste, wenn ein transparentes Medium dazwischen tritt. Die Beobachtung zeigt aber, dass die Aberration völlig

unabhängig davon ist, ob das Licht durch transparente Medien verläuft oder nicht. Diese Tatsache hat Fresnel schon 1818 durch die Annahme erklärt, dass solche Medien, die sich mit der Erde durch den ansonsten ruhenden Äther bewegen, diesen mit einem gewissen Bruchteil ihrer Geschwindigkeit mitführen.

Was aber bedeutet diese Mitführung des Äthers durch ein bewegtes Medium eigentlich? Lässt sie sich vielleicht auch direkt nachweisen oder ist sie eine hypothetische Kompensation, um das Ausbleiben der Abweichungen von der normalen Aberration zu erklären? Diese Fragen stehen in enger Beziehung zu Einsteins Versuch zum Einfluss der Relativbewegung der Körper gegen den Lichtäther auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in durchsichtigen Körpern. Ein Experiment wie das von Einstein geplante konnte möglicherweise diese Mitführung direkt nachweisen.

Ein solches Experiment war allerdings schon 1851, also einige Jahrzehnte vorher, von Fizeau durchgeführt worden und hatte eine ungefähre Bestätigung des Fresnelschen Mitführungskoeffizienten gebracht. Wir wissen nicht, wie genau Einstein damals mit dieser Entwicklung vertraut war und ob er das Fizeau-Experiment selber mit größerer Genauigkeit durchführen oder in irgend einer Form variieren wollte. Einstein ließ sich jedenfalls durch die Schwierigkeiten, sein Vorhaben zu realisieren, nicht entmutigen und stürzte sich mit Begeisterung auf einen Übersichtsartikel von Wilhelm Wien, in dem dieser die wichtigsten Experimente zur Frage, ob der Lichtäther an den Bewegungen der Körper teilnehme oder nicht, zusammenstellte.<sup>15)</sup>

Bis etwa zum Herbst 1901 gibt es weitere Hinweise auf Einsteins experimentelle Bemühungen. Dabei hat er wohl kaum nennenswerte empirische Ergebnisse erzielt, aber er dürfte darin bestärkt worden sein, dass die Elektrodynamik bewegter Körper nach wie vor ein Gebiet mit offenen Fragen war, insbesondere mit Bezug auf die zweifelhafte Rolle des Äthers, dessen Relativbewegung zur Erde offenbar experimentell nicht nachweisbar war. Letztlich machte sich Einstein in seiner Experimentierphase wohl vor allem bewusst, dass alle empirischen Fakten für eine Elektrodynamik bewegter Körper bereits auf dem Tisch lagen.

## Die Theoriephase

Am Ende der Experimentierphase fühlte Einstein sich jedenfalls dazu ermutigt, über eine Elektrodynamik ohne Äther nachzudenken. Mit diesem Vorhaben beginnt die zweite Phase der Entwicklung seiner Beschäftigung mit der Elektrodynamik bewegter Körper, die Theoriephase. Einsteins Perspektive war in dieser Phase durch die Suche nach einer begrifflichen Grundlage der gesamten Physik gekennzeichnet, die er mit Hilfe einer Art von interdisziplinärem Atomismus zu finden hoffte.<sup>16)</sup> Viele der Überlegungen, von denen wir aus seinen Briefen wissen, beruhen in der Tat auf Versuchen, atomistische Vorstellungen zur Erklärung von Zusammenhängen zwischen scheinbar ganz verschiedenen physikalischen Eigenschaften einzusetzen, z. B. zwischen der elektrischen und der thermischen Leitfähigkeit von Metallen.

Einsteins interdisziplinärer Atomismus führte irgendwann zwischen 1900 und 1905 zu einem radikalen Bruch mit der Tradition von Optik und Elektrodynamik des 19. Jahrhunderts. Dieser Bruch war allerdings noch keineswegs gleichbedeutend mit der durch die Arbeiten von 1905 ausgelösten Revolution. Er repräsentierte vielmehr den Versuch, innerhalb des begrifflichen Rahmens der klassischen Physik einen Weg zu Ende zu gehen, der in einer früheren Entwicklungsphase zwar eine Zeit lang beschritten, dann jedoch abgebrochen wurde. Einstein entschloss sich, an einer Teilchentheorie der Strahlung zu arbeiten ähnlich der, die Newton im 17. Jahrhundert aufgestellt hatte – trotz der zahlreichen Belege, die seit Anfang des 19. Jahrhunderts eindeutig für eine Wellentheorie des Lichtes sprachen. Einsteins Teilchentheorie der Strahlung schien den Schlüssel für eine ganze Reihe von Phänomenen zu enthalten, mit denen er sich während seiner Studentenzeit beschäftigt hatte, darunter Prozesse der Entstehung und Transformation von Licht, zu denen neue experimentelle Untersuchungen vorlagen. Sie passte darüber hinaus in eine Zeit, in der sich die Frage „Welle oder Teilchen“ aufs neue stellte – zwar nicht unbedingt für das Licht, aber z.B. für neu entdeckte Strahlungsarten wie die Röntgenstrahlung.<sup>17)</sup>

Es muss jedenfalls ein schlüssiges Argument für Einstein gewesen sein, dass sich mit einer

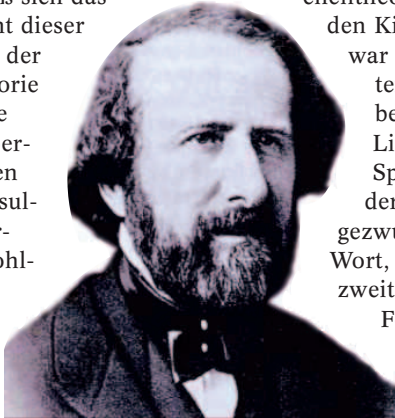
Teilchentheorie des Lichtes so viele Probleme gleichzeitig aus einem neuen Blickwinkel betrachten ließen, darunter auch das Problem des Wärmegleichgewichts der Strahlung, dem herausragenden Grenzproblem zwischen Wärmelehre und elektromagnetischer Strahlungstheorie, für das Max Planck seine berühmte Formel aufgestellt hatte. Wenn man nämlich die in einem Hohlraum enthaltene Strahlung als eine Ansammlung von Lichtteilchen im Sinne einer solchen Teilchentheorie betrachtete, ließ sich das Wärmegleichgewicht dieser Strahlung mit Hilfe der kinetischen Gastheorie bestimmen und eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit den experimentellen Resultaten über das Energiespektrum der Hohlraumstrahlung erzielen. Einsteins spekulative Teilchentheorie des Lichts bildete in der Tat den gemeinsamen heuristischen Hintergrund sowohl seiner

Arbeit zur Lichtquantenhypothese als auch seiner Elektrodynamik bewegter Körper. Auch seine übrigen Arbeiten aus dem Wunderjahr 1905, über die Brownsche Bewegung und die Bestimmung molekularer Dimensionen, verdanken sich seinem Interesse an der Möglichkeit, mit Hilfe des Atombegriffs Brücken zwischen den Spezialgebieten der damaligen Physik zu errichten.<sup>18)</sup>

Auch die Elektrodynamik bewegter Körper erschien vor diesem Hintergrund in einem neuen Licht. Denn es lag nahe, dass in einer Teilchentheorie des Lichtes die Gesetze der Mechanik, insbesondere auch das Galileische Relativitätsprinzip und die vertraute Zusammensetzung von Geschwindigkeiten galten. Eine Teilchentheorie lieferte dann nämlich auch die einfachste denkbare Erklärung für die Aberration als Konsequenz der Zusammensetzung der Lichtgeschwindigkeit mit der Erdgeschwindigkeit, ohne die Annahme der Existenz irgendeines Äthers, über dessen Bewegungszustand man nur spekulieren konnte. In einer nach den Grundsätzen der Mechanik konstruierten Teilchentheorie des Lichtes ist die Licht-

geschwindigkeit allerdings keine Konstante mehr wie in der Theorie des ruhenden Äthers, sondern hängt von der Geschwindigkeit der Lichtquelle in ähnlicher Weise ab wie die Geschwindigkeit einer Kanonenkugel von der Bewegung der Kanone, aus der sie abgeschossen wurde.

Während aber die Äthertheorie, insbesondere in der Form, die Lorentz ihr gegeben hatte, praktisch allen bekannten Phänomenen der Optik und des Elektromagnetismus gerecht wurde, steckte die Teilchentheorie bestenfalls in den Kinderschuhen und war schon bei einfacheren Problemen wie bei der Reflexion von Licht durch einen Spiegel zu den sonderbarsten Annahmen gezwungen. Mit einem Wort, auch in dieser zweiten Phase seiner



Armand Fizeau (1819–1896) führte 1851 ein Experiment zur Mitführung des Äthers durch und fand eine ungefähre Bestätigung des Fresnelschen Mitführungskoeffizienten.

Forschungen befand sich Einstein auf dem Holzweg. Während es also das Hauptergebnis der ersten Phase war, dass alle relevanten experimentellen Fakten bereits auf dem Tisch lagen, war es das Hauptergebnis der zweiten Phase, dass dies in gewisser Hinsicht auch für die theoretischen Einsichten zur Elektrodynamik der Fall war und jedenfalls kein Weg an der Theorie von Lorentz vorbeiführte.

### Die Reflexionsphase

Im Zentrum der dritten, entscheidenden Phase der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie stand Einsteins Uminterpretation der Lorentzschen Theorie. Technisch war diese Theorie jedenfalls kaum noch zu verbessern. Selbst Transformationen, mit deren Hilfe man die Erscheinungen in einem bewegten Bezugssystem aus den bekannten Gesetzen für ein ruhendes System ableiten kann, waren 1895 zunächst näherungsweise und 1899 dann exakt von Lorentz aufgestellt worden. 1904 hatte Lorentz schließlich eine umfassende, systematische Theorie aufgestellt und konnte mit Hilfe seiner Transformationen im Prinzip alle Erscheinungen der Elektrodynamik bewegter Körper erklären.<sup>19)</sup> Der französische Mathematiker Henri Poincaré nannte diese Transformationen, die zu

einem Herzstück der späteren Relativitätstheorie werden sollten, deshalb auch „Lorentz-Transformationen“. In ihrer entwickelten Form umfasste die Theorie von Lorentz bereits viele der merkwürdigen Phänomene, für die die Relativitätstheorie heute bekannt ist, also die Längenkontraktion ebenso wie die Verlangsamung von Prozessen in Abhängigkeit vom Bezugssystem des Beobachters, aber auch die Zunahme der Masse eines Körpers mit seiner Geschwindigkeit.

Allerdings verband Lorentz seine Transformationen mit einer Interpretation, die sich fundamental von der der späteren Relativitätstheorie unterschied. Für ihn handelte es sich nicht um Transformationen, die sicherstellen sollten, dass die gleichen Gesetze in einem ruhenden Bezugssystem und in einem dazu gleichförmig bewegten gelten, so dass dem klassischen Relativitätsprinzip Genüge getan wird. Für Lorentz galten hier vielmehr immer noch die so genannten Galilei-Transformationen der klassischen Physik, die die Gültigkeit des Relativitätsprinzips allerdings nur für die Mechanik gewährleisten konnten. Die von ihm aufgestellten Transformationen waren für Lorentz keineswegs eine Alternative zu diesen klassischen Transformationen, sondern eine Ergänzung. Sie gehörten in erster Linie zur Elektrodynamik und waren Teil eines von ihm so genannten Theorems der korrespondierenden Zustände, das durch die Einführung bestimmter Hilfsgrößen gestattete, die elektrodynamischen Prozesse in einem bewegten System vorherzusagen. Gemäß Lorentz' Verständnis verlaufen diese Prozesse zwar eigentlich nach ganz anderen Gesetzen als die gleichen Prozesse in einem ruhenden Äther. Durch die Einführung seiner raffinierten Hilfsgrößen gelang ihm nun aber die Erklärung dafür, dass sich dieser andersartige Verlauf keineswegs in beobachtbaren Erscheinungen, wie z. B. im Zusammenhang des Michelson-Morley Experiments, niederschlägt. Für direkt beobachtbar hielt Lorentz diese Hilfsgrößen – wie etwa die lokale Zeit – jedoch nicht.

Die Theorie von Lorentz zeichnet sich sowohl durch ihren außerordentlichen empirischen Erfolg als auch durch die komplexe Konstruktion und verschlungene Argumentationsweise aus, durch die sie diesen Erfolg erzielt. Sie bot deshalb einen natürlichen Ansatzpunkt für einen

17) Vgl. B. R. Wheaton, *The Tiger and the Shark, Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*, Cambridge University Press, Cambridge 1983, S. 17

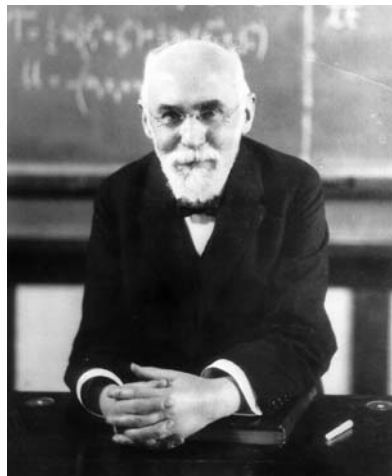
18) Vgl. J. Renn, *Einstein as a Disciple of Galileo: A Comparative Study of Concept Development in Physics*, in: M. Beller, R. S. Cohen und J. Renn (Hrsg.), *Einstein in Context (Science in Context, Bd. 6)*, Cambridge University Press, Cambridge 1993, 511–541, siehe auch J. Büttner, J. Renn und M. Schemmel, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* 34, 37 (2003)

19) Vgl. M. Janssen und J. Stachel, *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies*, in: John Stachel *Going Critical*, Dordrecht: Kluwer, (im Druck), siehe auch M. Janssen, *PhD Dissertation*, Univ. of Pittsburgh (1995)

Reflexionsprozess, den man an entscheidenden Stellen der Wissenschaftsgeschichte immer wieder am Werk sieht, und der den Kern der dritten Phase von Einsteins Entwicklung ausmacht. Dieser Prozess führt dazu, dass randständige Elemente eines komplexen und von inneren Spannungen zerrissenen Wissensgebäudes zu den Ausgangspunkten eines Umbaus werden, bei dem zwar eine weitgehend neue Struktur entsteht, die aber im Wesentlichen mit den bereits verfügbaren Bausteinen errichtet wird, ganz ähnlich wie dies in der Architektur- und Baugeschichte immer wieder der Fall war. Mit einer philosophiehistorischen Metapher könnte man diesen Prozess als ein vom Kopf über die Füße Stellen bezeichnen, oder – mit Hilfe einer wissenschaftshistorischen Metapher – schlicht als den Kopernikus-Prozess beschreiben. Denn auch begriffliche Umbüche vollziehen sich ähnlich wie die Revolution des Kopernikus, der ja ein neues Weltsystem schuf, in dem er ein zwar zuvor randständiges Gestirn, die Sonne, ins Zentrum rückte, dabei aber im Wesentlichen das zuvor ausgearbeitete komplexe Getriebe der planetaren Astronomie übernahm, statt mit einer tabula rasa zu beginnen.

Für die Lorentzsche Theorie waren der Äther ein Zentralbegriff und die neuen Variablen für Raum und Zeit nur Hilfsgrößen. In der Relativitätstheorie dagegen spielt der Begriff des Äthers keine Rolle mehr, während die Lorentzschens Hilfsgrößen zu den neuen, grundlegenden Begriffen von Raum und Zeit werden. Das deduktive Getriebe dagegen, insbesondere die Lorentz-Transformationen zwischen zueinander gleichförmig sich bewegenden Bezugssystemen, blieb von dieser Verschiebung des begrifflichen Zentrums zunächst weitgehend unberührt. Obwohl es eine jüngere Generation oft leichter hat, einen solchen Reflexionsprozess zu vollziehen, ist dieser Prozess nicht notwendigerweise mit einem Generationenwechsel verbunden. In jedem Falle aber setzt er einen Perspektivenwechsel voraus. Einstein verfügte über eine solche neue Perspektive vor allem durch seine Arbeit an den oben erwähnten Grenzproblemen der klassischen Physik. Durch seine Beschäftigung mit dem Problem der Wärmestrahlung kam er insbesondere zu der Einsicht, dass die Annahme eines

kontinuierlichen Äthers nicht mit der Existenz eines Wärmegleichgewichts der Strahlung vereinbar war. Diese Einsicht hatte gleich zwei revolutionäre Konsequenzen, sie legitimierte eine Quantentheorie des Lichtes, wie Einstein sie zunächst nur spekulativ entwickelt hatte, und sie transformierte seine ursprünglich ebenfalls nur spekulative Zurückweisung des Ätherkonzepts in eine unumgängliche Voraussetzung seines weiteren Denkens. Die Spezielle Relativitätstheorie von 1905 entstand aus diesem Zusammentreffen der besonderen Perspektive Einsteins auf die Grundlagenkrise der klassischen Physik mit der umfassenden Antwort von Lorentz auf die Probleme der Elektrodynamik bewegter Körper.



Der holländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) hatte eine technisch komplexe Theorie aufgestellt, die praktisch alle bekannten elektromagnetischen und optischen Erscheinungen erklären konnte. Ihre Uminterpretation im Rahmen eines „Kopernikusprozesses“ war der Schlüssel zur Relativitätstheorie von 1905. (Foto: Museum Boerhaave, Leiden)

Aus Einsteins Perspektive war die Situation weitaus kritischer als aus der von Lorentz. Weil für Einstein der Äther als Träger elektromagnetischer Erscheinungen nicht mehr in Frage kam, fehlte ihm nämlich im Gegensatz zu Lorentz nicht nur eine Grundlage für die physikalische Interpretation der Hilfsgrößen, die dieser eingeführt hatte, sondern auch die Grundlage für die entscheidende Annahme der Lorentzschens Theorie, dass die Lichtgeschwindigkeit im Äther konstant ist. Andererseits sprachen gerade die Aberration und das Fizeau-Experiment für die prinzipielle Richtigkeit der Verwendung einer Lokalzeit, wie sie Lorentz eingeführt hatte. Einsteins Perspektive rückte also

gerade diejenigen Elemente in das Zentrum seiner Aufmerksamkeit, die den Schlüssel für die abschließende Lösung boten. Im Gegensatz zu Lorentz waren darüber hinaus für Einstein Relativitätsprinzip und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit von gleicher Wichtigkeit, obwohl sie nicht ohne weiteres miteinander vereinbar waren – jedenfalls solange man die klassische Addition von Geschwindigkeiten zugrunde legt.

Den Elementen der Theorie von Lorentz, die sich als besonders problematisch herausgestellt hatten, war gemeinsam, dass sie der Kinematik angehörten. Auf diese Weise machte Einsteins besondere Perspektive einen Ebenenwechsel plausibel – von der Elektrodynamik zur Kinematik. Was also waren die Implikationen der Lorentzschens Elektrodynamik für das kinematische Verhalten bewegter Körper? Ganz offensichtlich war aus ihr zu schließen, dass Körper und Prozesse in einem gleichförmig bewegten System sich anders als in Ruhe verhalten. Wenn man dieses seltsame Verhalten nicht mehr auf der Ebene der Elektrodynamik, sondern auf der der Kinematik erklären konnte, dann hätte man vielleicht den Schlüssel zur Lösung in der Hand.

Bis zu diesem Punkt ergab sich praktisch jeder Abschnitt des Einsteinschen Gedankenweges geradezu zwangsläufig aus dem Zusammentreffen seiner speziellen Perspektive mit der Lorentzschens Theorie der Elektrodynamik. Jetzt aber erweist sich ein Reflexionsschritt als notwendig, der substantiell über diese Theorie hinausgeht, oder – besser gesagt – vor sie zurückgeht. Denn nun kommt es auf die Frage an, wie man dieses seltsame Verhalten von Körpern und Prozessen in einem bewegten Bezugssystem zuerst einmal überhaupt feststellen kann. „Wie verhalten sich denn eigentlich Maßstäbe und Uhren in einem solchen System?“ „Was heißt es überhaupt, wenn man sagt, ‚dieses Ereignis findet gleichzeitig mit einem anderen statt‘ und wie stellt man das überhaupt fest?“ Es ist gut möglich, dass es Besso war, der Einstein diese klugen Kinderfragen an jenem schönen Tag im Mai 1905 gestellt hat.

Solche Fragen ließen Einstein jedenfalls das Problem der Feststellung von Gleichzeitigkeit in zwei zueinander gleichförmig bewegten Bezugssystemen als den entscheidenden Schritt zur Lösung seines

Problems erkennen. Solche Fragen fielen auch auf den Resonanzboden seiner philosophischen Lektüre, insbesondere der Schriften von David Hume und Ernst Mach, die er zuvor gemeinsam mit seinen Freunden aus der Akademie Olympia, einem Les- und Diskussionszirkel, den Einstein in Bern begründete, intensiv



Die „Akademie Olympia“ – Conrad Habicht, Maurice Solovine, Albert Einstein lasen gemeinsam vorwiegend wissenschaftliche Literatur mit disziplin-übergreifender Thematik wie Mach, Hume, Spinoza, Helmholtz und Poincaré, aber auch Sophokles, Dickens und Cervantes. (Foto: Bildarchiv ETH Zürich)

studiert hatte. Vor dem Hintergrund dieser Lektüre machte er sich klar, dass der Zeitbegriff nicht einfach als gegeben betrachtet werden kann, sondern ein recht kompliziertes Konstrukt darstellt, und dass schon zur Feststellung von Gleichzeitigkeit an verschiedenen Orten eine Definition erforderlich ist, die auf einer praktischen Methode beruhen muss. Die Methode, die Einstein fand – der Abgleich von räumlich entfernten Uhren durch Lichtsignale – hat allerdings zunächst wenig mit den komplizierten physikalischen Problemen zu tun, um deren Lösung er sich bemühte. Sie ist vielmehr durchaus mit unseren Alltagsvorstellungen über die Messung von Zeitpunkten und Zeitspannen verträglich und wurde sogar in der zeitgenössischen technischen Praxis verwendet, wie Einstein u. a. aus der Lektüre populärwissenschaftlicher Schriften wusste.<sup>20)</sup>

Der Rückgriff auf dieses praktische Verfahren führte zur Offenlegung einer gewissen Willkür in der Feststellung von Gleichzeitigkeit in zueinander gleichförmig bewegten Bezugssystemen. Denn das von Einstein betrachtete Verfahren galt ja zunächst nur innerhalb eines Bezugssystems – sei es nun ruhend oder bewegt. Vor diesem Hintergrund wurde überhaupt erst einmal denkbar, dass das Verhalten von Uhren und Maßstäben von der Bewegung eines Bezugssystems relativ zu einem anderen abhängen könnte, wie es die Lorentzsche Theorie ja nahe legte.

Die Willkür in der Beziehung zwischen Zeitdefinitionen in verschiedenen Bezugssystemen, die Einstein sich auf diese Weise bewusst gemacht hatte, konnte nun auf zweierlei Arten beseitigt werden. Man konnte entweder die Hypothese einführen, dass die Feststellung von Gleichzeitigkeit nach

dem Einsteinschen Verfahren zu den gleichen Ergebnissen unabhängig vom Bewegungszustand eines Bezugssystems führen sollte und so auf die Gültigkeit einer absoluten Zeit schließen, wie sie in der klassischen Physik angenommen wurde. Oder man konnte die Hypothese einführen, dass nicht die Zeit, sondern die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bewegungszustand des Bezugssystems die gleiche bleiben würde – eine Hypothese, die Einstein mit Blick auf den Erfolg der Lorentzschen Elektrodynamik vorzog, trotz ihrer nicht-intuitiven Konsequenzen. Akzeptierte man nämlich die letztere Hypothese, dann ergab sich eine Relativität der Gleichzeitigkeit in Abhängigkeit vom Bewegungszustand der Bezugssysteme und überhaupt die ganze verblüffende Kinematik der Speziellen Relativitätstheorie.

### Der Anfang einer Revolution

Vor dem Hintergrund dieser Rekonstruktion könnte Einsteins Gespräch mit Besso im Mai 1905 am Ende doch der entscheidende Moment in der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie gewesen sein. Es half Einstein möglicherweise bei dem ausschlaggebenden Reflexionsschritt, durch den es ihm gelang, zwei Schichten des Wissens – eine theoretische und eine praktische – auf neue Weise miteinander zu verbinden. Denn sein Nachdenken über die Grundlagen des Zeitbegriffs verknüpfte ja, wie wir

gesehen haben, ein im praktischen Wissen verankertes Modell über die Messung von Zeit an verschiedenen Orten mit theoretische Aussagen über die Lichtfortpflanzung, die ihre Grundlage in Spezialstudien über die Elektrodynamik bewegter Körper hatten. Erst durch eine solche Verknüpfung konnten diese Studien auf unsere Begriffe von Zeit und Raum zurückwirken und Einsteins Arbeit von 1905 zum Ausgangspunkt einer wissenschaftlichen Revolution werden lassen, die nicht auf die spezialistische Wissenschaft beschränkt blieb. Das Hervorgehen dieser Revolution aus einer Wechselwirkung zweier Wissensschichten erklärt auch ihre historische Spezifik, also den Grund, warum nicht schon das Nachdenken über die Zeit durch einen Hume oder sogar durch einen Aristoteles zur Erkenntnis der Relativität der Gleichzeitigkeit geführt hat. Denn das Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, das den Einsteinschen Zeitbegriff letztlich festlegt, war erst das Ergebnis der langfristigen Entwicklung des Wissenschaftssystems der klassischen Physik und stellt die Quintessenz der Elektrodynamik des 19. Jahrhunderts und ihrer Probleme an der Grenze zur Mechanik dar.

\*

Dieser Artikel ist die gekürzte Fassung eines Vortrages, gehalten am 15. Januar 2004 im Rahmen der Einstein-Vorlesungen<sup>21)</sup> der Universität Ulm, die vollständig in Buchform erscheinen werden.

### Literatur

Der vorliegende Aufsatz verdankt folgenden Titeln wertvolle Anregungen

- ▶ *M. Wertheimer*, Produktives Denken. Kramer, Frankfurt/Main 1957
- ▶ *R. Rynasiewicz*, The Construction of the Special Theory: Some Queries and Considerations, in: *D. Howard und J. Stachel* (Hrsg.), Einstein – The Formative Years, 1879–1909 (Einstein Studies Bd. 8). Birkhäuser, Boston 2000, S. 159–202
- ▶ *J. Stachel*, What Song the Syrens Sang: How Did Einstein Discover Special Relativity?, in: *John Stachel*, Einstein from „B“ to „Z“ (Einstein Studies Bd. 9), Birkhäuser, Boston 2002, S. 157–171
- ▶ *P. Galison*, Einsteins Uhren, Poincarés Karten: die Arbeit an der Ordnung der Zeit. Fischer, Frankfurt/Main 2003
- ▶ *J. D. Norton*, Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics prior to 1905 (Entwurf)

20) *A. Bernstein*, Naturwissenschaftliche Volksbücher: Wohlfeile Gesamt-Ausgabe, Bd. 4, Duncker, Berlin 1869 (3. Aufl.), S. 88–98. Bernstein beschreibt die elektromagnetische Synchronisation von Uhren durch eine „Hauptuhr“, die ein elektrisches Signal aussendet (S. 91) und wirft die Frage nach der Gleichzeitigkeit von Geschehnissen an verschiedenen Orten auf (insbes. S. 94 u. S. 96). Einstein las die Bernsteinschen Volksbücher zwischen 1892 und 1894: CPAE I, S. 1xi–1xiii, insbes. Anm. 54.

21) Programm siehe [www.physik.uni-ulm.de/dpg-tagung2004/v Einstein.html](http://www.physik.uni-ulm.de/dpg-tagung2004/v Einstein.html)