

Vom Regenschirm zur Relativitätstheorie

Dierck-E.Liebscher, Potsdam

www.aip.de/People/deliebscher/ 27. Juli 2010

1 Relativität

Alles beginnt mit der Frage, ob sich die Erde um die Sonne bewegt oder umgekehrt. Bewegung ist relativ, und solange wir nur zwei Körper haben, ist die Frage nicht entscheidbar. Zwei Körper brauchen eine Umgebung, auf die die Bewegung bezogen werden kann. Bewegung (wie auch Ort, Zeit und Orientierung) gibt es nur bezogen auf äußere Gegenstände. Das nennen wir Relativitätsprinzip und sehen Galilei als dessen Proponenten an. Bewegung im Fahrzeug bemerken wir nicht, wenn die Straße keine Unebenheiten, Schlaglöcher oder Kurven hat, wenn neben der Straße keine Bäume, Häuser oder Starkästen zu sehen sind. Das ist zunächst das ganze Relativitätsprinzip. Es liegt dem überwältigenden Erfolg der klassischen Mechanik zugrunde und bewährt sich bis heute, wann immer es auf die Probe gestellt wird.

Wenn es also um die Bewegung von Erde und Sonne geht, brauchen wir äußere Anhaltspunkte. Die Fixsterne sind so weit weg, dass wir unsere Ortsveränderung an ihnen nur unter großen Schwierigkeiten messen können. Die Planeten sind viel näher, aber sie bewegen sich selbst auch. Dennoch hat man schon vor mehr als 2000 Jahren an den Regeln ihrer Schleifenbewegung sehen können, dass diese eine unbewegte Sonne im Zentrum des Planetensystems nahelegen, und dass die Erde selbst ein Planet ist [1]. Diese Argumente ersetzen aber keine Geschwindigkeitsmessung.

2 Der Regenschirmeffekt (die Aberration)

Die Sterne sind zwar weit entfernt, aber ihr Licht kommt bei uns an und kann als Bezugsgegenstand durchaus dienen. Die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne wurde deshalb zuerst mit einem Regenschirmeffekt am Sternenlicht gemessen.

Diesen Effekt kennt jedermann, auch wenn er sich dessen nicht sonderlich bewusst ist. Wer im Regen an der Haltestelle auf den Bus wartet, hält den Regenschirm nach oben, wenn der Regen bei fehlendem Wind von oben auf die Erde fällt. Wer aber eilends an uns vorübergeht, hält den Regenschirm nicht nach oben, sondern nach vorn (Abb. 1). Zwei Beobachter, die sich gegeneinander bewegen, sehen verschiedene Richtungen für denselben Teilchenstrom. Kommt der Strom für den einen von oben, kommt er für den anderen von vorn. Der scheinbare Ort der Quelle ist in Richtung der Relativbewegung verschoben.¹ Je schneller die Bewegung und je langsamer der Regen, desto größer der Effekt. Es geht also um das Verhältnis von Relativgeschwindigkeit der beiden Beobachter und der Geschwindigkeit des Teilchenstroms.

Beobachten wir einen Stern, so wird sich seine scheinbare Position mit der Bewegungsrichtung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne ändern. Blicken wir voraus, rücken die Sterne im aktuellen Gesichtsfeld zusammen. Bewegt sich etwa die Ende November auf das Sternbild Löwe zu, scheint es, dass die Sterne dort zusammenrücken. Der Effekt ist nicht groß, weil das Verhältnis der Geschwindigkeiten ziemlich klein ist. Die Lichtgeschwindigkeit braucht 1000 Sekunden für den Durchmesser der Erdbahn, seine Geschwindigkeit ist also 0.001 Erdbahndurchmesser pro Sekunde. Die Länge der Erdbahn ist gleich 3.1415... mal dem diesem Durchmesser, und die Erde

¹Es geht hier um die Relativbewegung der beiden Beobachter, nicht um die Geschwindigkeit der Quelle. Diese ist in anderen Zusammenhängen wohl von Bedeutung, hier aber nicht.



Abbildung 1: Ein Regen in Wellen

braucht ein Jahr dafür, also etwa 31 558 000 Sekunden. Das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten ist also etwa 1 : 10000. Das entspricht einem Winkel von etwa 20 Bogensekunden. So hat ihn J. Bradley seit 1725 beobachtet und als Aberration beschrieben [2].

Vergleichen wir mit dem Regenschirm, ist alles klar, wenn

1. die Erde sich um die Sonne bewegt,
2. Licht ein Teilchenstrom ist (wie Newton auch annahm), und wenn
3. die Geschwindigkeiten so zusammengesetzt werden, dass sie sich gerichtet addieren.

3 Licht ist eine Welle

Jeder kennt bunte Schmetterlinge, aber nicht jeder weiß, dass ihre Farben auf ähnliche Weise entstehen wie die der Newtonschen Ringe, die sich an transparenten dünnen Schichten mit leicht reflektierenden Oberflächen zeigen (früher gab es Diapositive, die zwischen Glasscheiben gesichert wurden, und die mit Newtonschen Ringen den Amateur ärgerten). Diese Phänomene kann erfolgreich nur durch Interferenz von Wellen erklärt werden und erzwingt schließlich die Aufgabe der Hypothese, Licht sei ein Teilchenstrom. Schon Huygens konnte zeigen, dass Wellen nicht nur Brechung und Reflexion ebenso beschreiben können wie die Teilchenmechanik, sondern auch Interferenz erklären. Aber noch hundert Jahre später ist Thomas Young gezwungen, gegen die fortschrittsfeindliche Rolle der Newtonschen Mechanik zu wettern und erst Fresnel gelang die Berechnung von Beugungsfiguren so überzeugend, dass von nun an das Licht als Welle akzeptiert wurde.

Das erste Problem, das in einer Wellendarstellung auftritt, betrifft das Relativitätsprinzip. Wenn die Ausbreitung des Lichts ein lokales Wellenphänomen ist wie es das schon nach Huygens benannte Prinzip beschreibt, sollte sie richtungsunabhängig sein. Wenn wir aber Geschwindigkeiten additiv zusammensetzen, dann kann das nicht für zwei Beobachter gleichermassen gelten, wenn diese sich gegeneinander bewegen. Wenn der eine Beobachter eine richtungsunabhängige Lichtausbreitung feststellt, muss der andere das ihm entgegenkommende Licht schneller als das ihn überholende messen (Abb. 2).

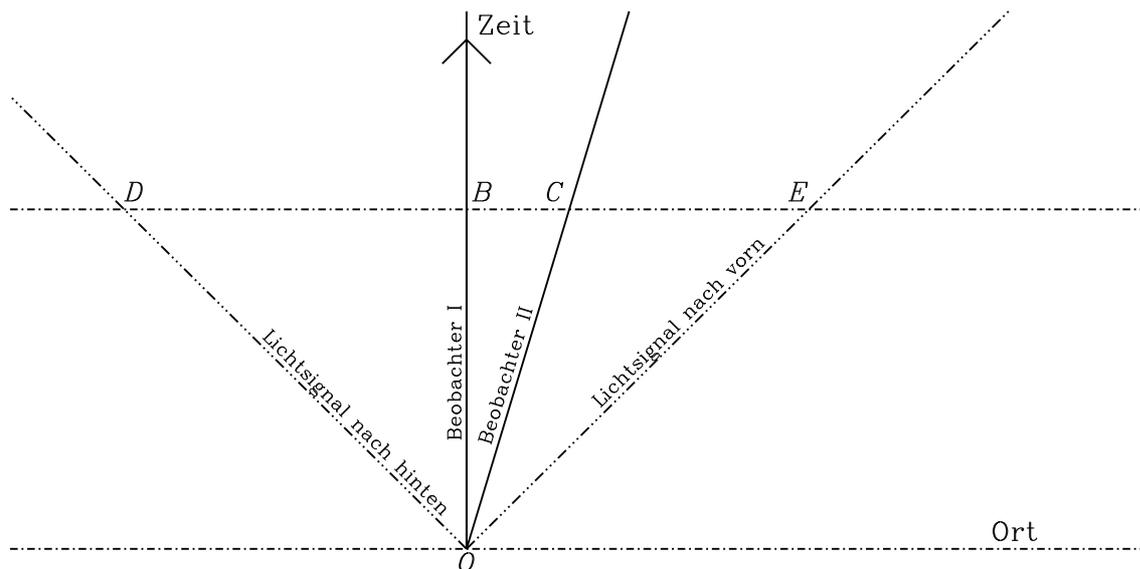


Abbildung 2: Zusammensetzung der Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit des Lichts ist für den ersten Beobachter symmetrisch: $BD/OB = -BE/OB$, für den zweiten aber nicht mehr $CD/OC \neq -CE/OC$. Vielmehr berechnen wir aus der Summe beider eine Geschwindigkeit für den zweiten Beobachter: $CD/OC + CE/OC = -2 CB/OC$. Man beachte, dass das Maß für $OB = OC$ nur die Zeitdifferenz wiedergibt.

Das ist fatal. Jeder Beobachter, so scheint es, kann nun einfach durch Experimentieren mit Licht eine Geschwindigkeit feststellen. Er sucht die Richtung mit der maximalen Lichtgeschwindigkeit, misst in der Gegenrichtung deren Minimum, und die halbe Differenz ist seine Geschwindigkeit, nur wogegen? Ein Objekt muss her, wir nennen es Äther. Wir vermuten, es könne eine Variante des Stoffes sein, mit dessen Wirbeln Descartes die Planetenbewegungen beschreiben wollte, bevor Newton seine Schwerkrafttheorie fand. Die Existenz des Äthers, schon vorher als Träger der Lichtwellen vermutet, wird nun erzwungen durch das Relativitätsprinzip. Die Geschwindigkeit, gemessen an der Richtungsabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit, ist eine Relativgeschwindigkeit gegen diesen Äther.

4 Der Äther darf sich nicht einfangen lassen

Es gibt aber sofort ein neues Problem: Wellenfronten zeigen keine Aberration. Stellen wir uns einen Regen vor, der senkrecht von oben herunterfällt. Wenn wir stehen, halten wir den Schirm nach oben, wenn wir gehen, halten wir ihn etwas nach vorn. Das ist die Aberration. Stellen wir uns vor, der Regen kommt in Schüben, deren Tropfen gleichzeitig auf den Boden fallen, die also eine ebenfalls senkrechte Richtung haben. Daran ändert sich nichts, wenn wir losgehen. Schließlich ist die Richtung der Fronten eine Eigenschaft, die instantan beobachtet wird und mit Bewegung zunächst nichts zu tun hat. Wellenfronten zeigen keine Aberration (Abb. 1).

A.Fresnel, der die Wellentheorie des Lichts zu mathematischer Reife brachte, hielt dieses Fehlen der Aberration der Wellenfronten für das größte Problem der Wellentheorie überhaupt [3]. Er fand aber einen Ausweg. Er stellte fest, dass mit einem Fernrohr nicht die Wellenfront beobachtet wird, sondern der von der Apertur herausgeschnittene Teil, eine Art Schaumkrone. Diese hat nun eine eigene Richtung, die wieder Aberration zeigt. Laufen wir etwa an einem Ufer entlang, sehen

wir die Wellen immer parallel zu Ufer branden, aber um die Schaumkronen einzufangen, halten wir unsere Reuse schräg wie den Regenschirm.

Heute sind wir besser dran. Wellenfronten können wir heute bestimmen. In der Radio-Interferometrie über große Distanzen hat das auch praktische Bedeutung. Fresnel konnte es nicht. Hätte Fresnel es gekonnt, sollte er keine Aberration erwartet haben.

Wenn die Ausrede Fresnel's bei einem Fernrohr funktionieren soll, darf das Fernrohr selbst die Wellenausbreitung auf keinen Fall stören, auch wenn es sich bewegt. Seine Wände müssen widerstandslos durch den Äther gleiten. Die Fresnel'sche Ausrede der Aberration erfordert also einen Äther, den Wände nicht einschließen, nicht behindern. Heute kennen wir Teilchen, die diese Eigenschaft tatsächlich haben, die Neutrinos. Damals aber war das eine ziemliche Kühnheit. Fresnel's Hypothese konnte sich nur durchsetzen, weil Fizeau ein kompatibles Verhalten des Äthers in transparenten Flüssigkeiten fand und weil Fresnel mit der Wellentheorie Beugungsfiguren immer wieder richtig berechnen konnte. Solche Rechnungen sind noch heute schwierige Übungen für die Studenten der Physik.

5 Der Äther lässt sich doch einfangen

Es gibt verschiedene Versuche, die Wirkung von Materie auf den Äther zu studieren, aber erst A.A.Michelson konnte 1881 versuchen, die Bewegung der Erde durch den Äther direkt nachzuweisen [4]. Er versuchte es in einem Keller, schließlich wollte er zeigen, dass der Ätherwind wie von Fresnel verlangt durch die Wände pustet. Zu seiner Enttäuschung fand er keinen Wind im Keller. Er musste schließen, dass der Äther etwas viel Realeres ist als bisher angenommen, dass er im Keller eingefangen ist wie die Luft auch. Das Relativitätsprinzip wird dadurch nicht berührt: Unter Deck misst man auch mit dem Licht keine Bewegung des Schiffs, nicht einmal gegen einen äußeren Äther. Fresnel aber ist dennoch geschlagen. Seine Erklärung der Aberration für die Lichtwellen fällt in sich zusammen.

Was bleibt zu tun? Will man nicht auf neue Hilfskonstruktionen zurückgreifen, muss man untersuchen, was geschieht, wenn man eine Aberration der Wellenfronten selbst fordert. Heute wissen wir, dass es sie wirklich gibt: In der Radio-Interferometrie wird diese Aberration berücksichtigt. Vor über hundert Jahren war sie nur eine Vermutung. H.A.Lorentz verfolgte diese Vermutung und stieß auf die Relativität der Gleichzeitigkeit [5].

Stellen wir uns wieder einen Beobachter vor, der Wellenfronten von oben kommen sieht. Eine Wellenfront erreicht dann den Boden überall gleichzeitig. Zeigen die Wellenfronten selbst Aberration, geschieht nun etwas Entscheidendes: Beginnt der Beobachter sich zu bewegen, sind die Wellenfronten in Bewegungsrichtung geneigt, sie sollen ja selbst den Regenschirmeffekt zeigen (Abb. 3). Dann aber erreicht die Wellenfront den Boden vor dem Beobachter früher und hinter dem Beobachter später als zu seinen Füßen. Was zunächst als gleichzeitig beurteilt wurde, ist es jetzt nicht mehr. Was als gleichzeitig beurteilt wird, hängt von der Bewegung des Beobachters ab. Das ist die Relativität der Gleichzeitigkeit. H.A.Lorentz hat sie wie auch H.Poincaré formelseitig gefasst. Sie wird durch die nach Lorentz benannten Koordinatentransformationen beschrieben. Wenn in einer Darstellung der Relativitätstheorie keine Zeit für die Vorgeschichte ist, wird hier mit diesen Lorentz-Transformation der Aufbau der Theorie begonnen. Lorentz fand ihn konstruiert, nicht viel besser als Fresnel's Ausrede. Dennoch kann man aus der Forderung, Teilchen und Wellen zeigen die gleiche Aberration, die Lorentz-Transformationen herleiten [10].

Wenn es nun aber so ist, dass aus Wellentheorie, additiver Zusammensetzung der Geschwindigkeiten, Relativitätsprinzip und Aberration ein frei strömender Äther ergibt, dieser aber nicht gefunden wird, dann muss von den vier Voraussetzungen eine korrigiert werden. Wellentheorie und Aberration können wir nicht lassen, das Relativitätsprinzip wollen wir nicht lassen, also bleibt

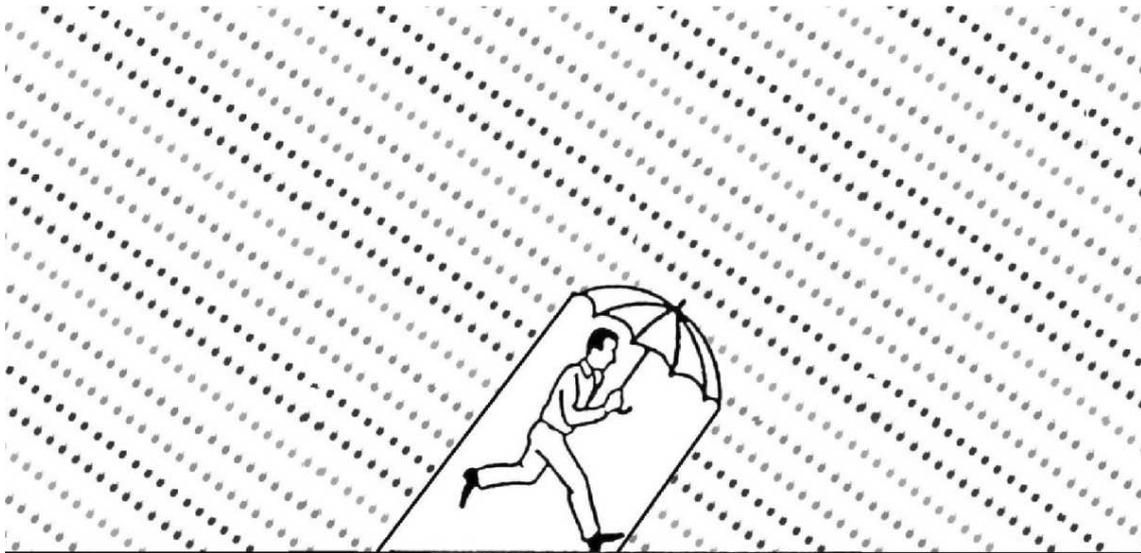


Abbildung 3: Aberration der Wellenfronten

nur die Aufgabe der additiven Zusammensetzung der Geschwindigkeit.

6 Die absolute Geschwindigkeit

Geschwindigkeiten setzen wir wie Strecken zusammen (wir addieren sie gerichtet), weil Geschwindigkeiten Strecken pro Zeit sind und wir uns über die Zeit keine Gedanken machen. Jetzt aber ist die Gleichzeitigkeit relativ, und die Geschwindigkeit eines Dritten gegen den Zweiten wird nach anderer Gleichzeitigkeit bestimmt als die des Zweiten gegen den Ersten (Abb. 4). Eine schlichte Addition beider, um die Geschwindigkeit des Dritten gegen den Ersten zu erhalten, sollte nicht mehr möglich sein. Dies um so mehr, je größer die Geschwindigkeiten sind, um die es sich handelt, und ganz besonders für die Lichtgeschwindigkeit. Aber wer kann da schon etwas messen? Nächst der Lichtgeschwindigkeit war die der Erde auf ihrer Bahn die größte erreichbare, und die war gerade einmal ein Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit.

Es war Einstein, der den Geistesblitz hatte, zu unterstellen, dass der Betrag der Lichtgeschwindigkeit absolut ist, dass die Geschwindigkeit des Lichts bei Zusammensetzung ihren Betrag nicht ändert. Er konnte auf dieser Hypothese eine konsistente Theorie errichten, in der sich alle aufgelaufenen Probleme wie von selbst lösten, eben die Relativitätstheorie. Dieser Geistesblitz kam nicht von ungefähr. Schließlich benutzte die Elektrodynamik bereits eine Konstante mit der Dimension einer Geschwindigkeit ohne irgendeine Richtung. Das soll kurz erläutert werden.

Auf C.F.Gauß geht die Idee zurück, dass die Einheiten der in der Elektrodynamik auftretenden Größen mit mechanischen Mitteln allein definiert werden können. Es müssen keine von Meter, Gramm und Sekunde unabhängigen neuen Einheiten (Ampère, Coulomb) erfunden werden. Für eine solche Definition gab es zwei Wege. Sowohl die elektrische Ladung als auch die magnetische Polstärke können durch das Abstandsgesetz der von ihnen ausgehenden Kraft auf ein entsprechendes Double bestimmt werden. Da die magnetische Polstärke über den Strom in einer Spule auch eine elektrische Ladung definiert, gibt es nun zwei Einheiten für die elektrische Ladung und damit auch einen entsprechenden Umrechnungsfaktor wie zwischen Unzen und Gramm. Dieser Umrechnungsfaktor muss eine Geschwindigkeit sein. R.Kohlrausch und W.Weber haben 1854 versucht, ihn zu bestimmen. Sie fanden, dass er die Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit hat. J.C.Maxwell war daraufhin überzeugt, dass das Licht eine Form elektromagnetischer Wellen ist.

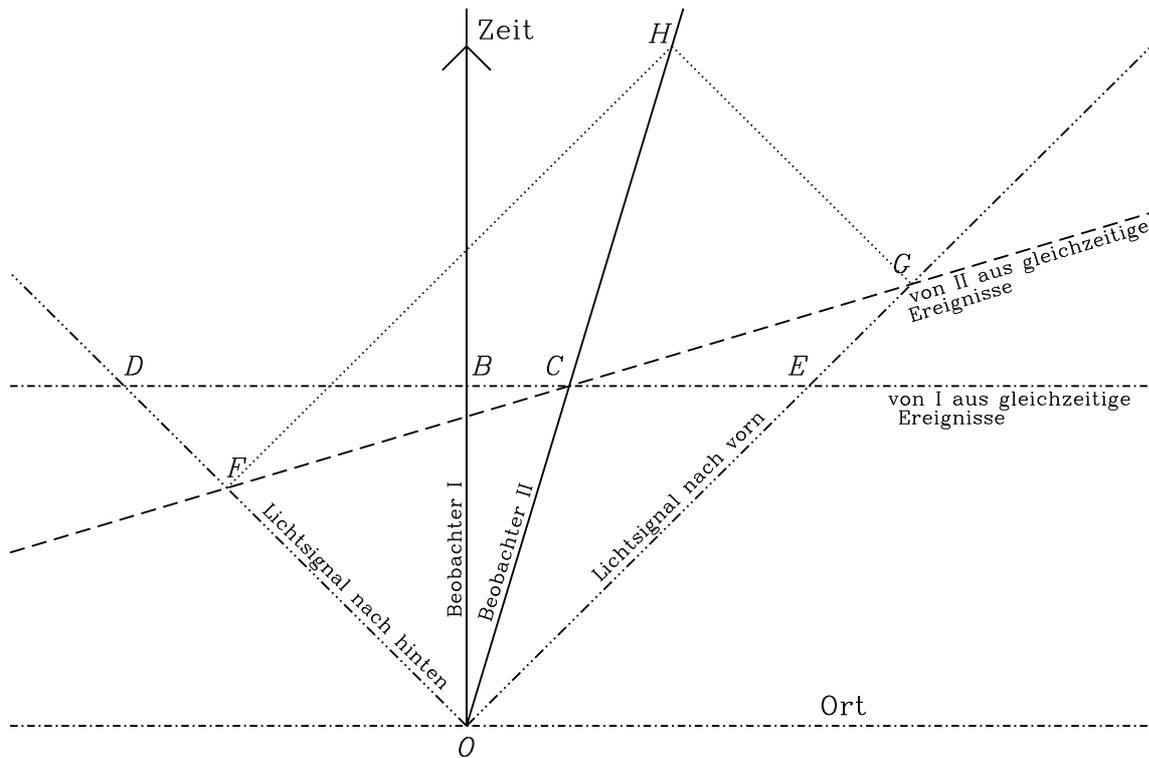


Abbildung 4: Relative Gleichzeitigkeit

Die Ereignisse D und E , gleichzeitig für den ersten Beobachter, sind es für den zweiten nicht mehr, vielmehr ist E früher als C und D später. Die Linie der für den zweiten gleichzeitigen Ereignisse liegt als schräg und geht durch die Punkte F und G . Wo diese genau liegen, bedarf längerer Rechnung, die aber ergibt, dass $FC = CG$, die Lichtgeschwindigkeit auch für den zweiten Beobachter symmetrisch ist. Einstein's Axiom setzt diese Symmetrie voraus und leitet daraus den Ort der Punkte F und G ab, wie auch die Aberration, die nun für Teilchen und Wellenfronten die gleiche ist. Man beachte, dass OC und OB immer noch Zeitmaße sind, die nun aber nicht mehr zusammenfallen. Für den ersten Beobachter sind beide Zeitdifferenzen gleich, für den zweiten ist $OC > OB$ [11].

Seine Gleichungen für das elektromagnetische Feld enthalten diese Konstante.

Mit dieser Konstanten gab es also eine Geschwindigkeit, die - weil ungerichtet - mit den eigentlichen gerichteten Geschwindigkeiten auf keine gescheite Art zusammengesetzt werden konnte. Schon schien es, als müsse man das Relativitätsprinzip aufgeben, wenn elektrodynamische und mechanische Abläufe gemeinsam betrachtet werden. Einstein löste dieses Rätsel, indem er die Richtungsunabhängigkeit des Umrechnungsfaktors als Unabhängigkeit des Betrags der Lichtgeschwindigkeit von der Ausbreitungsrichtung unterstellte.² Nun gibt es prinzipiell keine Richtungsabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit, die zwischen den verschiedenen Bewegungen eines Beobachters unterscheiden könnte, so wie das 150 Jahre früher befürchtet worden war. Das Relativitätsprinzip war gerettet (daher der Name Relativitätstheorie) und bedurfte auch keines Äthers mehr. Die Relativität der Gleichzeitigkeit ergab sich nun auf geometrischem Wege (Abb. 4). Für die Zusammensetzung der Geschwindigkeiten ergab sich eine Formel, die man in schon 50 Jahre alten Versuchen von Fizeau bestätigt fand. Aber all das ist nun eine neue Geschichte.

Literatur

- [1] D.-E.Liebscher: Von den Kepler'schen Gesetzen zu den Newton'schen Axiomen
- [2] Bradley,J. (1728): An account of a new discovered motion of fixed stars, Phil.Trans.London 35, 637, 1729, reprinted in W.Magie ed., A source book of physics, Cambridge MS, Harvard 1935
- [3] Fresnel,A. (1814): Lettre à son frère Léonor, 4.Juillet 1814, Oeuvres complètes 2, 820-824, Paris, Imprimerie impériale 1868.
- [4] A.A.Michelson: The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. American Journal of Science. 22, 1881, S. 120-129.
- [5] Drude,P. (1900): Lehrbuch der Optik, Leipzig, Hirzel.
- [6] R.Kohlrausch und W.E.Weber: Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt. Pogg. Ann.d.Phys.u.Chem. 99 (1856), 10-25.
- [7] F.W.Hehl, Yu.M.Obukhov: Dimensions and units in electrodynamics, Gen.Rel.Grav. 37 (2005), 733-749.
- [8] H.Melcher: Sinn und Bedeutung der Speziellen Relativitätstheorie, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, Heft 4/54 (2005), 2-10.
- [9] Sommerfeld,A. (1959): Vorlesungen, IV. Optik, 2.Aufl., Leipzig, Geest & Portig.
- [10] P.Brosche, D.-E.Liebscher: Aberration and Relativity, Astron.Nachr. 319 (1998), 309-318.
- [11] D.-E.Liebscher: Einsteins Relativitätstheorie und die Geometrien der Ebene Illustrationen zum Wechselspiel von Geometrie und Physik B.G.Teubner, Stuttgart und Leipzig 1999, ISBN 3-519-00278-7.

²Die sogenannte Konstanz der Lichtgeschwindigkeit meint diese Unabhängigkeit, nicht etwa die Universalität des Wertes in Raum und Zeit. Das ist eine andere Frage, die eine Analyse der Messgeräte selbst voraussetzt.