



Dierck-Ekkehard Liebscher

Stille Post, ganz relativ

Veröffentlicht: 08.02.2017

Alles ist relativ! Diesen Satz hört man als erstes, wenn das Wort Relativitätstheorie ins Spiel kommt. Er ist zutreffender, als es Fundamentalisten recht sein kann, und ganz offensichtlich. Wieso braucht es dazu eine Theorie? *Bewegte Uhren gehen langsamer!* Das wird stolz verkündet. Aber Bewegung ist doch relativ und kann überhaupt nichts bewirken, oder? *Die Lichtgeschwindigkeit ist immer und überall die gleiche!* Immer und überall? Woher will man das wissen?

Was man heute hört und liest, ist das Ergebnis von stiller Post durch mehrere Generationen. Wer etwas weitergibt, wer etwas liest, hat nur selten Zeit und Gelegenheit, sich tiefer zu informieren, und muss die Dinge mit der ihm zur Verfügung stehenden Erfahrung deuten und weitergeben. Das führt zur Herausbildung griffiger Formulierungen, die dann regelmäßig wiederholt werden.

Beim Thema Relativitätstheorie wird das besonders deutlich, weil die Kinematik konzeptionell einfach ist und jeder mitreden kann, und weil diese in der aktuellen Forschung ohne besondere Bedeutung ist, also dort niemand mehr Zeit investieren möchte, ständig Dinge richtigzustellen. Wir wollen sie uns hier aber nehmen.

Galilei und Newton

Bedarf die Relativität einer Theorie? Warum eine Theorie zur Relativität? Was ist gemeint? Galilei hat es in seinen Dialogen auf den Punkt gebracht: *Geschwindigkeit gibt es nur in Bezug auf andere Objekte, auf die Erde, auf den Sternhimmel, auf meine Bewegung vor einer Minute.* Ist die Straße glatt und gerade, fühlt der Schlafende im Wageninnern die Geschwindigkeit nicht. Geschwindigkeit gibt es nur gegen äußere Objekte, Schlaglöcher, Starkästen, Alleebäume. Was von diesen nicht beeinflusst wird, spürt keine Geschwindigkeit. Das ist die Relativität der Geschwindigkeit. Sie wurde ein besonders erfolgreiches Konzept der Physik, eben ein Prinzip, das Galileische Relativitätsprinzip. Die viel offensichtlichere Bezugsabhängigkeit von Ort, Orientierung und Zeitpunkt ist dabei immer einzuschließen. Position, Zeitpunkt, Orientierung und Geschwindigkeit eines Prozesses gibt es nur im Bezug auf andere Objekte. Wenn diese den Prozess nicht beeinflussen, kann er allein auch keine Information über Position, Zeitpunkt, Orientierung und Geschwindigkeit liefern.

Warum hat Newton dennoch von einem absoluten Raum geschrieben? Alle Physik, die er erklärt hat, realisiert das Relativitätsprinzip, ja das erste seiner Gesetze entspricht genau dieser Vorstellung, dass nicht die Geschwindigkeit, sondern nur ihre Änderung einer Ursache bedarf. Hier ist der absolute Raum ganz überflüssig. Entscheidend für die Newtonsche Mechanik ist die absolute Zeit in dem Sinne, dass alle Beobachter die Gleichzeitigkeit entfernter Ereignisse übereinstimmend beurteilen. Newton setzt voraus, dass die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse nicht in Frage gestellt werden kann. Absolute Zeit ist dafür das verkürzende Schlagwort. Sie ist der Grund für die Gleichheit von Relativgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsdifferenz und in der Folge für die Galilei-Transformationen.

Absolut ist der Raum in Bezug auf die Rotation. Sie scheint ohne Bezug auf äußere Objekte feststellbar zu sein. Das Foucaultsche Pendel zeigt uns die Rotation der Erde auch in einem geschlossenen Raum. Allerdings gibt es auch in der Relativitätstheorie keine Relativität der Rotation. Betrachten wir die Rotation, ist der Raum in der Relativitätstheorie ebenso absolut wie in der Newtonschen Mechanik. Die genauere Analyse dieses Fragenkomplexes ist mit dem Namen von Ernst Mach verbunden (Barbour 2001).

Der Äther

Die klassische Lichtausbreitung verlangt einen Äther, weil Wellen ja ein Medium brauchen, das diese Wellen schlägt. Wir wissen heute, dass dieser mechanische Schluss falsch ist. Weshalb braucht man also einen Äther, wenn dessen Existenz, wie man allenthalben lesen kann, den absoluten Raum darstellt und damit die Relativität bricht? Newton hat schon bei der Schwerkraft gezeigt, dass solch ein Medium überflüssig ist, nichts zum Schwerkraftgesetz beiträgt, ganz abgesehen davon, dass Newton das Licht eher als Emanation von Teilchen ansah. Man hat den Eindruck, die Verfechter von Newtons Emanationshypothese haben den Verfechtern der Wellenhypothese vorgeworfen, dass sie einen Äther bräuchten, und die letzteren haben den ersteren vorgeworfen, dass sie keinen haben. Relativität war da nicht im Spiel.

Wieso muss man erst einsehen, dass sich die erwarteten Eigenschaften des Äthers als Medium der Lichtausbreitung logisch widersprechen, und wieso führte diese Einsicht gleich auf die richtige Theorie?

Wenn Licht eine Welle ist, die sich genau nach Huygens' Konstruktion Schritt für Schritt unabhängig von ihrer Quelle fortpflanzt, kann man kaum umgehen, eine einheitliche Geschwindigkeit anzunehmen. Damit beginnt das Problem. Denn nun sollte es möglich sein, aus der lokalen Messung der Lichtgeschwindigkeit in entgegengesetzte Richtungen eine Geschwindigkeit bestimmen zu können, die sich *nicht* auf bekannte Objekte bezieht. Also muss es wegen des Relativitätsprinzips ein anderes, noch unbeobachtetes materielles Objekt geben, auf das sich die Lichtausbreitung selbst bezieht. Keiner hat es greifen können, aber man schien es aus der Naturphilosophie bereits zu kennen, und es erhielt einen Namen: Man nannte es Äther. Es rettet die Relativität.

Wo ist also das Problem? Je mehr man über das Licht herausfand, desto komplizierter wurden die Eigenschaften, die der Äther haben müsste. Die entscheidende Eigenschaft zeigte sich jedoch an der beobachteten Aberration des Sternenlichts, auch wenn sie bestenfalls am Rande erwähnt wird (Meschede 2010 erwähnt die Aberration nur als frühe Messung der Lichtgeschwindigkeit, Diehl 2008 zitiert das Problem, Grehn und Krause 1998 lassen es aus). Zur Veranschaulichung dieser Aberration gibt es meist eine Zeichnung, auf der das Licht als Teilchenregen behandelt wird. Diese Zeichnung vertuscht, dass das Licht eine Welle ist und Wellenfronten bei absoluter Gleichzeitigkeit keine Aberration zeigen (Born 2003, Brosche und Liebscher 1998). Fresnel (1818) fand eine Ausrede. Wenn die Lichtausbreitung durch materielle Hindernisse nicht beeinflusst und gestört wird, bewegt sich der von der Aperturblende ausgeschnittene Teil einer Wellenfront wie ein Teilchen durch das Teleskop und zeigt die richtige Aberration. Da man Wellenfronten selbst nicht messen konnte, war damit der Erfahrung genüge getan. Diese Ausrede bedarf zunächst keines Äthers, nur der additiven Zusammensetzung der Geschwindigkeiten. Wenn man aber an das Relativitätsprinzip glaubt und den Äther *deshalb* braucht, so muss dieser auch unverändert durch feste Materie strömen. Das tut er aber nicht, und das ist es, was Michelson positiv bewiesen hat. Mit oder ohne Äther, Fresnels Konstruktion ist widerlegt.

Am Ende des 19. Jahrhunderts hat man die reine Existenz des Äthers schon als Bruch des Relativitätsprinzips verstanden. Was würde man heute sagen, wo man einen alles durchdringenden kosmischen Neutrinohintergrund kennt? Die Existenz materieller Objekte kann Relativität nicht brechen, weil man sich auf materielle Objekte immer beziehen kann. Die stille Post hat dennoch die schöne Formulierung „absolute Geschwindigkeit relativ zum Äther“ (Meschede 2010, Tipler und Mosca 2009, Schroeder 1987) gefunden, einen Widerspruch in sich. Mit einem absoluten Raum hat das nichts zu tun. Solange man an der absoluten Gleichzeitigkeit festhält, rettet der Äther die Relativität. Er hat allerdings genügend andere Schwierigkeiten. Am Ende ging es nicht um ihn, sondern um die Geschwindigkeit des Lichts ganz unabhängig von dessen übrigen Eigenschaften.

Die Relativität

Gibt es etwa doch keinen Äther? Muss das Relativitätsprinzip wegen der Eigenschaften der Lichtausbreitung aufgegeben oder wenigstens auf die Mechanik beschränkt werden? Es ist üblich geworden,

bleibt aber problematisch, eine Galileische und eine Einsteinsche Relativität gegenüberzustellen, so als habe Galilei nur für die Mechanik gesprochen. Gewiss war zu Galileis Zeit alle Physik Mechanik, aber dafür hat Galilei auch Lebendiges einbezogen: *mosche e farfalle*. Es sind also die gleichen Prinzipien.

Einstein konnte zeigen, dass das Relativitätsprinzip nicht aufgegeben werden muss, dass Galileis Prinzip gültig bleibt. Es ist vielmehr die Regel, mit der Geschwindigkeiten zusammengesetzt werden, die präzisiert werden muss. Einsteins Axiom lautet:

*Die Lichtgeschwindigkeit behält ihren Betrag,
wenn sie mit anderen Geschwindigkeiten zusammengesetzt wird.*

Die daraus ableitbare Theorie heißt Relativitätstheorie. Ob man dem Licht entgegenfährt oder von ihm zurückweicht, die gemessene Lichtgeschwindigkeit hängt davon nicht ab. Man kann nun keine eigene Geschwindigkeit mehr von der Lichtausbreitung ablesen. Der Schluss auf einen Äther als Bezugsobjekt der Lichtausbreitung wird deshalb überflüssig. Das heißt nicht, dass es nichts gibt, was man als Äther bezeichnen könnte. Die Existenz von Gegenständen ist keine physikalische Frage. Entschieden wird immer nur, ob die vermuteten Objekte die ihnen zugeschriebenen Eigenschaften haben können. Der unterstellte Äther kann nicht einerseits die Aberration erlauben und andererseits im Keller eingeschlossen sein.

Einsteins Axiom wird in der Regel als Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verkürzt. Das unterschlägt, dass es ausschließlich um die Zusammensetzung geht, und provoziert das Missverständnis, es gehe um Konstanz in Ort und Zeit. Einsteins Axiom kennt auch andere Formulierungen als die angegebene. Sie sind in dem Maße gut, wie sie diese Zusammensetzungsregel enthalten. So wird das Axiom oft (gelegentlich auch vom Meister selbst) als Unabhängigkeit der Geschwindigkeit des Lichts von der Quelle beschrieben. Diese ist aber bereits entschieden, wenn das Licht eine Welle ist (wie auch beim Schall). Nur wenn man das Licht als Teilchenstrom modelliert, kommt die Bewegung der Quelle ins Spiel. Ohne die Hypothese oder Folgerung, dass gegeneinander bewegte Beobachter immer die gleiche Geschwindigkeit messen, wenn sich das Objekt mit der absoluten Geschwindigkeit bewegt, folgt keine Relativitätstheorie. Es sind die Spiegel, die sowohl Beobachter als auch Quelle sind und Gleichwertigkeit der Formen des Axioms herstellen.

Weitgehend vergessen ist das Experiment von Weber und Kohlrausch (1856) zum Umrechnungsfaktor der beiden Gaußschen Einheitensysteme. In diesem Umrechnungsfaktor tritt eine Geschwindigkeit auf (die Lichtgeschwindigkeit), die keine Richtung hat und sich deshalb mit keiner gerichteten Geschwindigkeit zusammensetzen lässt. Damit ist dieses Experiment der logische Vorläufer von Einsteins Axiom.

Der Michelson-Versuch

Hier muss das Michelson-Experiment besprochen werden. Es hat für die Akzeptanz der Relativitätstheorie eine große Rolle gespielt, auch wegen verschiedener Missverständnisse. Was hat Michelson gezeigt? Das ist so gut wie vergessen. Oft wird in widersinniger Verkürzung geschrieben, er habe die generelle Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bewiesen, oder er habe gezeigt, dass es keinen Äther gibt. Das hat er nicht, das konnte er nicht, das geht überhaupt nicht.

Michelson hat vielmehr bewiesen, dass der vom Relativitätsprinzip zunächst geforderte Äther von den Kellerwänden eingeschlossen ist. Die Hypothese des freien Strömens ist widerlegt. Ob und wie der Äther durch Materie mitgenommen wird, spielt keine Rolle. Das ist eine andere Frage. Für Fresnels Konstruktion ist entscheidend, dass nach schließlichem Austritt aus der Materie von einer solchen Mitnahme *nichts übrigbleibt*. Fresnels Erklärung der Aberration ist nun nicht mehr vertretbar. Die Erklärung der Aberration muss neu konstruiert werden.

Muss sie wirklich konstruiert werden? Lorentz (1899) und Drude (1900) untersuchten die Frage, was geschieht, wenn nichts konstruiert wird, wenn die Wellenfronten selbst Aberration zeigen. Er fand, dass es dann eine (von ihm als fiktiv betrachtete) Zeit geben muss, mit der allerdings gegeneinander bewegte Beobachter Gleichzeitigkeit nicht mehr übereinstimmend beurteilen können. Man nennt das Relativität der Gleichzeitigkeit. Das ist der entscheidende Schritt (Liebscher 2011). Jetzt muss man fragen, wie Gleichzeitigkeit denn praktisch festgestellt werden kann, wie man entfernte Uhren stellt. Diese Frage der Synchronisation von Uhren führte nun Einstein zur Relativitätstheorie, speziell zu seinem Axiom: Wenn man nämlich nur mit Lichtsignalen effektiv synchronisieren kann, gehört der Betrag der Lichtgeschwindigkeit zu den Voraussetzungen.

1907 erhielt Michelson für die Entwicklung der Interferometer-Technik den Nobelpreis und es fiel auf, dass Einsteins Axiom das Ergebnis von Michelsons speziellem Versuch vorweggenommen hätte. Gegen den klassischen Fehlschluss, das Ergebnis des Michelson-Versuchs sei *deshalb* Grundlage der Relativitätstheorie, hat sich Michelson Zeit seines Lebens vergeblich gewehrt.

Es ist die Vermutung der Relativität der Gleichzeitigkeit, die den logischen Schritt zwischen Michelson-Experiment und Einsteins Axiom darstellt. Dagegen ist die Vermutung einer realen Längenkontraktion ein Umweg (Melcher 2015), wenn nicht eine Sackgasse. Da aber gerade diese meist ausführlich behandelt wird, bleiben für die Relativität der Gleichzeitigkeit meist nur Nebensätze. Die Längenkontraktion knüpft ja auch an scheinbar verständliche mechanische Begriffe, die Relativität der Gleichzeitigkeit dagegen ist aller Alltagserfahrung fern.

Newton's Mechanik

Eine Theorie kann auf zwei Wegen scheitern. Sie kann innere Widersprüche offenbaren, dann ist sie falsch. Die Beobachtung kann ihr widersprechen, dann ist sie nicht anwendbar. Die Relativitätstheorie ist nun so widerspruchsfrei wie Geometrie eben ist. Die Anwendbarkeit dagegen ist eine Frage der Beobachtung und kann nur für präparierbare oder beobachtbare Umstände geprüft werden. Positive Ergebnisse begründen Vertrauen. Mit der Sicherheit ist das anders, ja geradezu paradox. Im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie wird oft behauptet, sie habe die Newtonsche Mechanik abgelöst, entwertet, abgetan. Tatsächlich hat sie gezeigt, dass die Newtonsche Mechanik zwar bei sehr großen Geschwindigkeiten nicht angewendet werden kann, dass aber die Fehler nicht größer sind als die auf das Licht bezogene Geschwindigkeit (die 30 km/s der Erde auf ihrer Bahn sind nur ein Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit), und dass ihr nun in genau diesem Maße fest vertraut werden kann. Die Relativitätstheorie hat uns also in der Anwendung der Newtonschen Mechanik sicherer gemacht.

Im Gegensatz zu einer oft geäußerten Ansicht bleiben die Newtonschen Gesetze gültig. Einsteins Axiom kommt in einer Frage dazu, über die zu Newtons Zeiten nicht explizit nachgedacht wurde. Es scheint einfach zu selbstverständlich, dass Geschwindigkeiten bei Zusammensetzung addiert werden müssen. Newton hat seine Gesetze in einen Kontext gebettet, in dem dies überhaupt nicht in Frage gestellt werden konnte. Seine große Entdeckung war ja auch etwas anderes, eben die Entwicklung der Planetenbahnen aus seinem Gesetz der Schwerkraft. Newton wollte auch nicht über die Gleichzeitigkeit diskutieren, er fand Alternativen zu einer universell feststellbaren Gleichzeitigkeit überflüssig und störend. Er hat Raum und Zeit einfach als unabhängig von aller Anordnung und Veränderung erklärt (Barbour 2001).

Bezugssysteme kommen dabei zunächst nicht vor, auch bei Newton selbst nicht. Bezugssysteme sind komplizierte Konstruktionen, die deshalb in keinem Axiom etwas zu suchen haben. Das erste Gesetz kann heute auf eine ganz einfache und bezugssystemfreie Form reduziert werden: *Objekte, die nicht beeinflusst werden, können sich nicht zweimal begegnen.*

Daraus folgt, dass ihre Weltlinien (Registrierkurven in Raum und Zeit) Geraden sind. Erst mit diesem Wissen kann man mit ihnen dann Bezugssysteme (Koordinaten) konstruieren, in denen Geradlinigkeit (im Raum) und Gleichförmigkeit den üblichen Sinn haben (Lange 1886, Liebscher 2009).

Newtons Form des zweiten Gesetzes setzt eigentlich eine Erklärung der trägen Masse voraus. Für die Planetenbewegung ist die Masse aber nur als Quelle der Schwerkraft von Bedeutung, deshalb stört das an dieser Stelle noch nicht. Die träge Masse wird erst in seinem dritten Gesetz bestimmt, allerdings nur, wenn man dieses mit den Augen seines Konkurrenten Huygens (1656) betrachtet. Dann lautet es:

Bei einem Stoß (wo man nicht wissen muss, welche Kräfte wie im Einzelnen wirken) bleibt die Summe der Geschwindigkeiten erhalten, wenn sie vor der Bilanz mit einer Masse gewichtet werden.

Es ist diese Masse, die die Geschwindigkeiten wichtet, die in der Formel $E=mc^2$ gemeint ist. Sie könnte nur ballistisch bestimmt werden, wenn es nicht jene strenge Äquivalenz von träger Masse und Ladung im Schwerfeld (schwere Masse genannt) gäbe, die es erlaubt, träge Massen auch auf der Waage zu vergleichen. Newton hatte hier nur die Kräfte im Auge, und der Impulserhaltungssatz ist dann eine Folgerung im Zweikörpersystem.

Für ein von außen nicht beeinflusstes System von Objekten bleibt die Summe der gewichteten Geschwindigkeiten (sie heißen Impulse) erhalten. Einfluss heißt also Änderung des Impulses. Jetzt erst definiert das zweite Gesetz die von der Theorie zu erklärende Kraft als Änderung des Impulses mit der Zeit. In diesen Formen bleiben die Newtonschen Gesetze in der Relativitätstheorie unverändert.

Die Zeit

Nun also zum Thema Zeit. Die populäre Feststellung sagt: Nach der Relativitätstheorie gehen bewegte Uhren langsamer. Sie lässt so viel weg, dass sie nicht richtig sein kann. Nach Galileis Prinzip ist Bewegung relativ, und das Wort *langsamer* kann sich nur auf eine zweite Uhr beziehen, die sich gegen die erste bewegt. Die Aussage kann deshalb nicht richtig sein, denn es müsste dann jede der beiden Uhren langsamer als die andere gehen. Was ist da los? Die Uhren gehen alle gleich. Es geht nur um eine Perspektive aus verschiedenen Zuständen in relativer Bewegung. Die Aufgabe, eine Uhr in Bewegung zu vermessen, ist analog dem Bemühen, die Länge eines Balkens zu beurteilen, der gegen das Gesichtsfeld verdreht ist. Auf dem Registrierstreifen sieht man das leichter als mit Formeln (Born 2003, Liebscher 2005). Alle Autoren loben, dass Minkowski gezeigt hat, wie einfach alles durch den geometrischen Standpunkt wird, aber benutzt wird er bestenfalls als Illustration, die unter einem Berg von Formeln begraben wird.

Eine Uhr ist ein Objekt, in dem ein periodischer Prozess abläuft, dessen Perioden gezählt werden. Der Gang der Uhr wird von ihrem inneren Aufbau bestimmt und kann deshalb nicht von ihrer (gleichförmigen) Bewegung verändert werden. Beschleunigungen verändern den Uhrengang durchaus, und es ist gerade die Kunst, Uhren so zu konstruieren, dass auch Beschleunigung ihren Gang nicht mehr als erlaubt verändert, ob es da um Harrisons Chronometer oder um Atomuhren geht. Mit einer Uhr kann man den Ablauf der Prozesse am Ort der Uhr vergleichen. Die Dauer eines Prozesses wird mit der Anzahl der Perioden der danebenliegenden Uhr gemessen, so wie die Länge einer Strecke mit der Anzahl der Markierungen eines Lineals verglichen wird, das an die Strecke angelegt wird. Die richtige Zeit, die oft als Eigenzeit bezeichnet wird, ist die einer mitbewegten Uhr. Zeitmessung aus anderer Bewegung schließt eine perspektivische Verlängerung ein, die der Verkürzung eines verdrehten Balkens (erinnern wir uns an die Bürger von Schilda) in der gewohnten Geometrie entspricht.

Die viel diskutierte Folge ist, dass die Uhr eines Zugvogels nach Rückkehr weniger Ticks gezählt hat als die des Nesthockers. Die Zeit des Nesthockers überschätzt eben die Rate der Uhr des Zugvogels, so wie man die Länge eines Balkens unterschätzt, wenn man seine Verdrehung gegen das Gesichtsfeld nicht beachtet. Aber hat sich nicht auch der Nesthocker relativ zum Zugvogel bewegt? Findet sich da nicht ein Paradoxon? Sicher, auch die Uhr des Zugvogels überschätzt ihrerseits die Rate der Uhr des Nesthockers. Allerdings fehlt dem Zugvogel in dieser Bilanz ein ganzer Abschnitt der Geschichte des Nesthockers. Die Berücksichtigung dieses fehlenden Abschnitts löst das scheinbare Pa-

radoxon ganz ohne Tricks auf, speziell ohne Rückgriff auf die Beschleunigung beim Entschluss zur Rückkehr.

Ganz abwegig ist die manchmal geäußerte Erwartung, erst die Allgemeine Relativitätstheorie könne dieses Zwillingsparadoxon lösen. Das wäre fatal, denn es bedeutete die Inkonsistenz der (speziellen) Relativitätstheorie. Aber das Zwillingsparadoxon ist nicht paradoxer als die Dreiecksungleichung der euklidischen Geometrie und löst sich analog auf. Auch ist die spezielle Relativitätstheorie durchaus in der Lage, beschleunigte Bewegung zu beschreiben, sonst wäre sie ja gänzlich nutzlos. Nur eine zutreffende Theorie des Schwerfeldes findet sich nicht so leicht.

Die Lichtgeschwindigkeit

Wie ist es mit der Lichtgeschwindigkeit an anderen Orten und zu anderen Zeiten? Man braucht ein Maß, das von der Lichtgeschwindigkeit unabhängig ist. Ein solches Maß findet sich im atomaren Bereich als Produkt der Größe der Atome und der Frequenz ihrer Strahlung, genauer in der Konstantenkombination e^2/h aus Elementarladung und Planckscher Konstante. Das Verhältnis dieses Maßes zur Lichtgeschwindigkeit heißt Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante. Sie ist unabhängig von Maßeinheiten und Etalons und kann an allen Lichtquellen bestimmt werden, wenn nur deren Spektren genügend genau vermessen werden können. Deshalb wissen wir, dass sich bis zu den fernen Quasaren dieses Verhältnis nicht ändert und die Lichtgeschwindigkeit in diesem Sinne auch in Ort und Zeit konstant ist. Für die Relativitätstheorie ist das aber unerheblich. Sie verlangt nur, dass es an jedem Ort eine endliche Geschwindigkeit gibt, die bei Zusammensetzungen ihren Betrag nicht ändert. Es müsste noch nicht einmal die des Lichtes selbst sein.

Neben dem Relativitätsprinzip, dass alle Position in Raum und Zeit, alle Orientierung im Raum und alle Geschwindigkeit nur in Bezug auf andere Objekte einen Sinn haben und ohne deren Einfluss keine Spur in den physikalischen Prozessen eines Objekts hinterlassen können, und der Existenz einer absoluten Geschwindigkeit, deren Betrag sich bei Spiegelung nicht ändert, wie sich der Spiegel auch immer bewegt, bedarf es keiner weiteren Zutaten, um die Relativitätstheorie zu entwickeln. Bezugssysteme und Beobachter sind ein schwieriges Pflaster, und der lockere Umgang mit diesen Begriffen zeitigt dann auch genügend Missverständnisse.

Die Effekte der Relativitätstheorie fallen im täglichen Leben wenig auf und werden selten so wichtig wie beim GPS. Dies erweckt den Eindruck, die Relativitätstheorie sei eine Frage kleiner Effekte von der Ordnung v/c oder kleiner. Das ist ein Irrtum. In der Elementarteilchenphysik werden die Effekte überwältigend. Wichtiger noch, die Struktur der Theorie selbst ist es, die ganz unabhängig von jeder Bewegung eine Erklärung und Beschreibung des Spins der Elementarteilchen (eine Art Drehimpuls, der das Doppelte des mechanisch erwarteten magnetischen Moments erzeugt) gestattet und die die Existenz von Antiteilchen (die sich mit ihren Partnern in Photonen allein umsetzen können) vorher sagt. Das schaffen Alternativen bisher nicht, oder nicht so einfach. Die Kinematik der (speziellen) Relativitätstheorie ist deshalb bestens gestützt.

In diesem Artikel ging es um stille Post nur durch wenige hundert Jahre. Viel dramatischer werden die Auswirkungen über die Jahrtausende, aber das ist eine andere Geschichte (Russo 1997).

Literaturverzeichnis

- Barbour, J.B. (2001): The Discovery of Dynamics: A Study from a Machian Point of View of the Discovery and the Structure of Dynamical Theories. Oxford: University Press.
- Born, M. (2003): Die Relativitätstheorie Einsteins. 7. Auflage. Heidelberg e.a.: Springer.
- Brosche, P.; Liebscher, D.-E.: Aberration and Relativity (1998). In: Astron.Nachr. 319, S. 309-318; Fallstricke beim Thema Aberration (1998). www.dierck-e-liebscher.de/publikationen/366-fallstricke.pdf
- Diehl, B.; e.a. (2008): Physik Oberstufe Gesamtband. Berlin: Cornelsen.

- Drude, P.: Lehrbuch der Optik, Hirzel, Leipzig (1900).
- Fresnel, A.: Lettre a son frère Leonor, 4.Juillet 1814, Oeuvres completes 2 (1814), 820-824, Paris, Imprimerie imperiale 1868; Sur l'influence du mouvement de terre dans quelques phenomenes d'optique, Oeuvres completes 2 (1818), 627, Paris, Imprimerie imperiale 1868.
- Galilei, G.: Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, Batista Landini, Florenz 1632.
- Grehn, J., Krause, J. (1998): Metzler Physik Sekundarstufe II. Hannover: Schroedel.
- Huygens, Ch. (1656): De motu corporum ex percussione, Opuscula Posthuma (Manuscript 1656, Ostwalds Klassiker Bd. 138, Leipzig, 1903).
- Lange, L. (1886): Die geschichtliche Entwicklung des Bewegungsbegriffs und ihr voraussichtliches Endergebnis, Leipzig, zitiert nach Barbour 2001.
- Liebscher, D.-E. (2005): Der kürzeste Weg zu $E=mc^2$. In: Praxis der Naturwissenschaften und Physik in der Schule 54/4, S. 11-17.
- Liebscher, D.-E. (2005 a): Die Relativitätstheorie als Lösung des Fresnelschen Paradoxons, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 78/79(2005), 63–67.
- Liebscher, D.-E. (2009): Von den Kepler'schen Gesetzen zu den Newton'schen Axiomen. In: Praxis der Naturwissenschaften / Physik in der Schule 58/2, S. 5-12.
- Liebscher, D.-E. (2011): Vom Regenschirm zur Relativitätstheorie. In: Praxis der Naturwissenschaften / Physik in der Schule 60/1, S. 45-49.
- Lorentz, H.A.: Simplified theory of electromagnetic and optic phenomena in moving systems, Proc.Kon.Ned.Akad.Weten. 1 (1899), 427.
- Melcher, H.P.H. (2015): Irrtümer und Fehlinterpretationen bei Versuchen vom Michelson-Typ, Leibniz online, Ausgabe 22 (2016).
- Meschede, D. (2010): Gerthsen Physik, 24.Aufl., Springer.
- Michelson, A.A.: The relative motion of the earth and the luminiferous aether, Amer.J.Science (3) 22 (1881), 120-129.
- Russo, L. (1997): La rivoluzione dimenticata. Milano: Feltrinelli; deutsch: Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens. Berlin 2005, Springer.
- Schröder, U.E. (1987): Spezielle Relativitätstheorie, 2.Aufl. Harri Deutsch, Thun.
- Tipler, P.A., Mosca, G. (2009): Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure, 6.Aufl. 2009, Springer, Heidelberg.
- Weber, W.E. und Kohlrausch, R. (1856): Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt. Pogg. Ann. d. Phys. u. Chem. 99 (1856), 10-25; Über die Einführung absoluter elektrischer Maße, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Neue Folge Band 5, Braunschweig, Vieweg.(1968).

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr. Dierck-E. Liebscher, deliebscher@aip.de, www.dierck-e-liebscher.de