Spezielle Relativitätstheorie

Von Maxwell bis Minkowski

Vorwort

Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) ist für immer mit dem Namen Albert Einstein verbunden und dies ungeachtet dessen, dass Einstein nicht der erste, sondern der letzte in einer Reihe namhafter Physiker war, der sich mit der zugrunde liegenden Problematik auseinandersetzte.

Natürlich folgten ihm andere nach wie z.B. Minkowski, welcher der Theorie den nötigen mathematischen Unterbau verlieh oder Laue und später Born, die sich darum bemühten, den Inhalt der SRT auch für den nichtakademischen Leser verständlich aufzubereiten.

Obwohl die SRT eine mit grösster Präzision untersuchte Theorie ist und bisher allen Angriffen erfolgreich widerstand, gibt es noch immer Personen, die an ihrem Inhalt zweifeln. Darunter befinden sich selbst gestandene Physiker wie das Gespann Galeczki-Marquardt¹. In den ersten Jahrzehnten nach 1905 war die Kritik noch grösser, um dann langsam abzuflachen. Es konnte nicht ausbleiben, dass sich auch weniger kompetente Personen dazu berufen sahen, der SRT den Todesstoss zu versetzen, darunter Philosophen, Mathematiker und – last but not least – Ingenieure wie Ekkehard Friebe². Gerade letztere scheinen einen besonderen Gefallen daran gefunden zu haben, sich an der Einsteinschen Theorie zu messen. Bisher blieb es ein erfolgloses Unterfangen und es ist nicht zu erwarten, dass sich dies in naher Zukunft ändern könnte.

Nebst den Kritikern und ihren weniger ernstzunehmenden Vasallen gibt es eine kleine Gruppe von Personen, die sich um die "neolorentzianische Interpretation" der Relativitätstheorie bemühen, unter ihnen die Physiker Selleri und Brandes³. Der Grossteil der Physikergemeinde dagegen stützt sich weiterhin auf die Einsteinsche Lehre mit ihren zahlreichen Finessen und Paradoxien. Zu den Unterschieden zwischen Lorentz und Einstein später mehr.

Eine Sondergruppe bilden Physiker wie z.B. Unzicker⁴, die zwar nicht die Theorie als solche, sondern nur bestimmte Thesen in Frage stellen. Zu dieser Minderheit zählt sich in gewissem Sinne auch der Schreibende dieser Zeilen.

Wie es dazu kam, dass eine Arbeit von nur wenigen Seiten Umfang eine dermassen nachhaltige Wirkung erzielen konnte, soll in dieser Arbeit umrissen werden. Nebst dem historischen Exkurs werden die wichtigsten physikalischen Erkenntnisse, die aus diesem Paradigma-Wechsel hervorgingen, genannt. Wer sich vertieft in die SRT einlesen möchte, sei auf die einschlägige Literatur und die vielen Weblinks verwiesen, die am Schluss dieser Arbeit aufgeführt sind.

¹ G. Galeczki, P. Marquardt: Requiem für die Spezielle Relativität (Haag + Herchen).

² E. Friebe: Das Dogma der Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit → http://www.ekkehard-friebe.de/

³ E. Selleri, J. Brandes u.a.: Die Einstein'sche und lorentzianische Interpretation der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie (VRI Vlg).

⁴ A. Unzicker: Einsteins verlorener Schlüssel (CreateSpace Independent Publishing Platform).

1 Genealogie der Speziellen Relativitätstheorie

Der englische Mathematiker Edmund T. Whittaker (1873-1956) verfasste 1910 ein Kompendium über den Äther, das nach dem Zweiten Weltkrieg in erweiterter Form neu aufgelegt wurde. Bei der zweiten Publikation setzte sich Whittaker über die Warnungen seines Kollegen Max Born hinweg, der eine Schrift über den Äther in Anbetracht des Siegeszuges der Relativitätstheorie für überflüssig und bedenklich hielt. Whittaker vermochte in einer seiner Abhandlungen zu zeigen, dass auch Longitudinalwellen aufgrund skalarer Potentiale als Lösungen der Maxwellschen Gleichungen in Frage kommen. Leider verfolgte die Wissenschaft diesen interessanten Ansatz nicht weiter.

Dass dem Äther in der Naturwissenschaft eine grosse Bedeutung zugemessen wurde (und von unorthodoxen Denkern noch immer zugemessen wird) wird einem beim Durchlesen einer Schrift von André Waser bewusst.⁶ Aus diesem Grunde soll zunächst auf das vorrelativistische Ätherparadigma eingegangen werden, das die Physik seit Newton und Maxwell zunehmends beherrschte und schliesslich zu einem radikalen Umdenken zwang.

1.1 Das Ätherparadigma

1.1.1 Äther in Naturphilosophie und Okkultismus

Quinta essentia

Die Griechen kannten vier Elemente – Erde, Wasser, Luft und Feuer. In moderner Sprache sind dies die festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe sowie das Plasma – als vierter Aggregatzustand der Materie. Im vierten vorchristlichen Jahrhundert führte Aristoteles als fünftes Element die himmlische Materie, genannt *Quintessenz*, hinzu. Dieser mit dem Äther identifizierte Feinstoff sollte der Naturphilosophie zufolge den Raum zwischen den Gestirnen erfüllen und die primäre Ursache ihrer ewigen Kreisbewegung sein. Es verwundert an sich nicht, dass dem Äther auch göttliche Eigenschaften zugeschrieben wurden. Nicht nur Aristoteles sah im Äther eine göttliche Substanz. Denker wie Anaxagoras, Euripides, Hesiod, Zenon und weitere dachten so. Empedokles sah im Äther eine alles zusammenhaltende göttliche Kraft. Parmenides sprach vom "ätherischen Flammenfeuer".

Die Neuplatoniker betrachteten den Äther als Umhüllung der menschlichen Seele. Für den in der Renaissance lebenden Ketzer Giordano Bruno (1548-1600) war der Äther eine besselte und das Weltall erfüllende Entität, die als *Spiritus mundi* alle Körper durchdrang.

Selbst für einen Naturwissenschaftler wie Oliver Lodge war der Äther nicht nur eine Substanz mit nachweisbaren physikalischen Eigenschaften, sondern darüber hinaus ein universales Substrat.

Er ist das Hauptwerkzeug des Verstandes, der Träger der Seele, die Wohnung des Geistes. Mit Recht kann man ihn nennen: das lebende Gewand Gottes.⁷

⁵ E.T. Whittaker: A History of the theories of aether and electricity (1. Ausgabe, Longman, Green and Co., 1910).

⁶ A. Waser: Der Äther in der Naturwissenschaft (Monografie).

⁷ O. Lodge: Ether und Reality (1925).

Interessant ist, dass die moderne Kosmologie die "dunkle Energie", welche für die Expansion des Weltalls verantwortlich sein soll, ebenfalls als Quintessenz (von lat. *quinta essentia*) bezeichnet. In populärwissenschaftlichen Publikationen ist von einer "fünften Kraft" die Rede. Es existieren unterschiedliche Quintessenz-Modelle. Gemeinsam ist diesen Modellen, dass sie sich mit der Energiedichte eines sich zeitlich langsam entwickelnden Skalarfeldes befassen. Im Unterschied zum skalaren Higgsfeld, das den Teilchen ihre Masse verleiht und somit auch deren Trägheit hervorruft, wirkt die Quintessenz repulsiv auf die gewöhnliche Materie ein. Caldwell et al. spricht von Phantom-Energie, welche zu einer beschleunigten Expansion des Weltalls beitrage und schliesslich zum "Big rip" führe.

Im Grunde genommen wurde mit der kosmologischen Quintessenz der im Zuge der Relativitätstheorie aus der Naturwissenschaft ausgetriebene Äther in die Physik zurückgeführt – wenn auch in völlig veränderter Form. Die Quintessenz (dunkle Energie) hat nichts mehr gemein mit dem ruhenden und von Lorentz mathematisierten Lichtäther. Dasselbe gilt auf mikromarer Ebene für das Vakuum der Quantenelektrodynamik, das sehr wohl als Äther bezeichnet werden könnte (wie dies von Dirac auch getan wurde), wenn nicht der vorbelastete Ätherbegriff in den Köpfen der Wissenschaftler herumspuken und dies verhindern würde.

Einen typischen Vertreter der physikalischen Zunft erblicken wir in Arnold Sommerfeld (1868-1951), der im Rahmen seiner Vorlesungen über theoretische Physik vermerkte:

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist das einzige noch heute berechtigte Residuum der Äthervorstellung. Wollten wir heutzutage vom Äther sprechen, so müssten wir jedem Bezugssystem seinen besonderen Äther zusprechen... Den Lenardschen "Uräther" sehen wir nur noch als Kuriosum und die aristotelisch-scholastische "Quintessenz" (das fünfte Element neben Feuer, Wasser, Luft und Erde) als historische Merkwürdigkeit an.⁹

So wie Sommerfeld denken viele. Sie übersehen dabei, dass die Natur nicht einer reduktionistischen Denkweise folgt. Der leider viel zu früh verstorbene Physiker Heinrich Hertz (1857-1894), dem 1888 der experimentelle Nachweis der von Maxwell vorausgesagten elektromagnetischen Wellen gelang, hatte nicht unrecht, als er schrieb:

Nehmt aus der Welt die Elektrizität, und das Licht verschwindet; nehmt aus der Welt den lichttragenden Äther, und die elektrischen und magnetischen Kräfte können nicht mehr den Raum überschreiten.

Wir sind der Meinung, dass sich der quantenphysikalische Äther durch ein primordiales Skalarfeld substituieren lässt, das die experimentell bestätigten Eigenschaften des Vakuums hervorruft und zur Ausbreitung elektromagnetischer Grössen unverzichtbar ist. Ursache dieses Feldes ist ein den Raum aufspannendes engmaschiges Gitter von Elektron-Positron-Paaren, die ihre Masse in Bindungsenergie umgewandelt und in Form von Photonen abgestrahlt haben. In analogia lässt sich das Vakuum mit einem Superfluid vergleichen, dessen exotische Eigenschaften die Einwände gegen eine Äthertheorie beseitigen helfen.

Anm. d. Verfassers: Die *Suprafluidität* resp. *Superfluidität* beschreibt den Zustand einer Flüssigkeit, bei welcher jede innere Reibung verschwindet. Helium-4 bspw. wird unterhalb des sog. Lambda-Punk-

⁸ C. Wetterich: Quintessenz – die fünfte Kraft. Welch dunkle Energie dominiert das Universum?

⁹ A. Sommerfeld: Vorlesungen über Theoretische Physik, Band III Elektrodynamik (Verlag Harri Deutsch).

tes supraflüssig und verhält sich wie ein Fluid ohne jegliche Viskosität, so dass es bspw. an Gefässwänden emporkriecht und diese mit einem dünnen Film überzieht. Man spricht gelegentlich – falls die Bose-Statistik erfüllt ist – von einem Bose-Einstein-Kondensat. Darunter versteht man in der Quantenhydrodynamik einen extremen Aggregatzustand eines makros-kopischen Systems ununterscheidbarer Teilchen (Bosonen), in dem sich die Majorität der Teilchen in einem einheitlichen quantenmechanischen Zustand makroskopischer Kohährenz befindet und somit durch eine einzige Wellenfunktion beschreibbar ist. Ein Suprafluid von dieser Beschaffenheit verkörpert im Zustand niedrigster Energie, d.h. im Vakuumgrundzustand, ein sog. *Casimir-Vakuum*. Der leere Raum ist in diesem Sinne nicht leer. Man kann dies auch durch die Nullpunktsenergie eines quantenmechanischen Systems (Puthof, Haisch) begründen.

Infolge eines auf der Planck-Skala und sporadisch stattfindenden Energieaustausches der pseudoskalaren Elektron-Positron-Paare mit massebehafteten Teilchen der baryonischen Materie entsteht so ein oszillierendes Hintergrundfeld, dessen gemittelte Energiedichte beträchtliche Werte annimmt und möglicherweise zum Verständnis der "dunklen Materie" beitragen könnte.

Hermetische Ätherbegriffe

In okkulten und hermetischen Schriften taucht der Äther in den verschiedensten Zusammenhängen auf. Im 14. Jahrhundert konstruierte Johannes von Rupescissa eine Verbindung zwischen dem Äther der Alchemie und der Quintessenz der Antike. Zuvor wurde die feinstoffliche Materie nur in der supralunaren Astralsphäre¹⁰ vermutet. Der Arzt und Alchemist Paracelsus (1493-1541) sprach vom "Astralleib". Der französische Okkultist Eliphas Lévi (1810-1875) – mit bürgerlichem Namen Alphonse Louis Constant – erwähnte in seinen Schriften ein übersinnliches Licht, das er als "Astrallicht" bezeichnete.

In der Alchemie wurde der Äther als "Spiritus" (von lat. *spirare* = wehen, hauchen, brausen) – dem Synonym für Geist – bezeichnet. Das alchemistische Zeichen für Äther bestand aus einem zusammengesetzten V und R mit eingeschriebenem kleinen s (für *spiritus vini rectificatus*).¹¹ Selbst heute noch wird *Spiritus rector* als Phrase für einen führenden, lenkenden Geist verwendet. In stofflicher Hinsicht bedeutet Spiritus schlichtweg nur Alkohol. Im diesem Fall ist von geistigen Getränken – profan "Schnaps" – die Rede. Der Hermetiker unterschied folglich zwischem dem göttlichen Spiritus (Geist) und dem stofflichen Spiritus (Alkohol). Letzterer diente ihm aufgrund seines flüchtigen Charakters als Metapher und Projektionsfläche für das Geistige, das sich nur mit Schwierigkeiten mittels stofflicher Begriffe erfassen lässt.

Robert Fludd (1574-1637) beschrieb die Hauptpunkte seines Weltbildes gegenüber seinem Kritiker Mersennes mit folgender Begründung:

Das Wort Gottes erfülle als Spiritus alles. Die Anima Mundi (Weltseele, der Verf.) bestehe aus dem göttlichen Licht und dem Spiritus aethereus und die Einzelseelen hätten Teil an ihr. Es sei Christus, der den Spiritus der Welt beseele...¹²

¹⁰ Astral von lat. astralis (die Gestirne betreffend).

¹¹ C. Priesner, K. Figala: Lexikon einer hermetischen Wissenschaft (C.H. Beck).

¹² Joh. Rösche: Robert Fludd. Der Versuch einer hermetischen Alternative zur neuzeitlichen Naturwissenschaft (V&R unipress).

Anm.d. Verfassers: Äther und Astrales stehen in einer bestimmten Korrelation zueinander. Das Astrale ist eine mit dem Äther verwandte immaterielle Seinsebene und diesem übergeordnet. In der Antroposophie z.B. wird unterschieden zwischen physischem Körper, Äther- und Astralleib. Bereits der Freimauerer und Philosoph Joh. Gottlob Fichte (1762-1814) schrieb vom "Ätherleib". Bei ausserkörperlichen Erfahrungen (Out-of-body experience) ist häufig von "Astralwanderungen" die Rede. In den Erzählungen des Anthropologen Carlos Castaneda (1925-1998) kommt es unter dem Einfluss von Peyote (Mescalin) gelegentlich zu "Astralreisen". Einem interessierten Leserkreis bekannt in diesbezüglicher Hinsicht wurden die Erlebnisse von Robert A. Monroe (1915-1995), dem Begründer des nach ihm benannten Monroe-Institutes in Faber (Virginia) und Erfinder einer als "Hemi-Sync" bezeichneten Meditationsmethode. In diesem Institut haben auch sog. "Fernspäher" aus dem PSI-Corp des US-Militärs, darunter Joseph McMoneagle, erste ausserkörperliche Erfahrungen gesammelt.

1.1.2 Der physikalische Ätherbegriff

In der Naturphilosophie wurden dem Äther feinstoffliche – mit einem Gas vergleichbare – Eigenschaften zugeschrieben. Ähnlich wie der Schall durch die Luft, so sollte das Licht durch den Lichtäther übertragen werden.

Dem Empiristen Ernst Mach (1838-1916) wird der Spruch zugeschrieben:

Das Licht sei wie der Schall. Der Schall sei wie das Licht.

Der französische Philosoph und Mathematiker René Descartes (1956-1650) betrachtete den Äther als eine mit einer Flüssigkeit vergleichbare Substanz. Dieser Äther sollte aus verschiedenen Ätherstoffen bestehen. Das Licht wurde als Druckwelle in einem dieser Ätherstoffe beschrieben. In ponderablen Körpern sollte die Ätherdichte gegenüber dem Aussenraum abnehmen. Der Übergang wurde als fliessend angenommen. Damit konnte die Beugung an lichtundurchlässigen Körpern befriedigend erklärt werden.

Für Augustin Fresnel (1788-1827) stand fest, dass der Lichtäther ein hochelastisches und zugleich äusserst dichtes Medium sein musste, damit sich das Licht ungehindert als Welle fortpflanzen konnte. Joseph Larmor, der völlig unabhängig von den kontinentalen Wissenschaftlern die relativistischen Transformationen gefunden hatte, ging im Unterschied zu den Kartesianern davon aus, dass man sich den Äther als ein homogenes Fluid vorstellen konnte, das inkompressibel und elastisch sei. In ähnlichem Sinne wie bereits Stokes unterschied der deutsche Experimentalphysiker Philipp Lenard (1862-1947) zwischen einem Äther, der von allen Körpern mitgeführt wird, und dem Uräther, der als lichttragendes Medium den Weltraum erfüllen sollte.¹⁶

Diese unterschiedlichen Äthervorstellungen erschwerten den Physikern einen einheitlichen Zugang zu dieser komplizierten Thematik. An widersprüchlichen Deutungen mangelte es nicht. Noch aber fehlte den Wissenschaftlern die Kuzpe, um in einem radikalen Schnitt den gordischen Knoten aufzulösen. Es war Einstein, der den Äther schliessliche für entbehrlich erklärte und so eine wissenschaftliche Revolution auslöste.¹⁷ Die Physiker mussten zuerst durch "den Schmelz-

¹³ C. Castaneda: Die Lehren des Don Juan. Ein Yaqui-Weg des Wissens (Fischer Taschenbuch) und weitere Schriften.

¹⁴ R.A. Monroe: Der Mann mit den zwei Leben – Reisen außerhalb des Körpers (Heyne Verlag).

¹⁵ J. McMoneagle: Mind Trek (Omega Verlag).

¹⁶ Ph. Lenard: Über Äther und Uräther (1921).

¹⁷ Genaugenommen war der Äther nur im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie (1905) entbehrlich. Nach der Etablierung der Allgemeinen Relativitätstheorie (1920) kehrte Einstein zu einem modifizierten Ätherbegriff zurück.

tiegel der Relativitäts- und Quantentheorie" (Kuznecov) gehen, um zu einem umfassenderen Verständnis der Naturgesetze vorzudringen. ¹⁸

Der Lichtäther (Luminiferous ether)

Nachdem sich die Verfechter einer Korpuskulartheorie des Lichtes (Newton, Laplace, Poisson, Biot) für lange Zeit gegenüber den Vertretern einer Undulationstheorie (Grimaldi, Hook, Pardies, Huygens) zu behaupten vermocht hatten, setzte sich die Wellentheorie im 18. Jahrhundert aufgrund empirischer Befunde allmählich durch.

Wesentliche Beiträge zu diesem Fortschritt im naturwissenschaftlichen Denken stammten vom englischen Augenarzt Thomas Young (1773-1829), der im Jahr 1801 die beim Doppelspaltversuch auftretenden Interferenzerscheinungen mit den Gesetzmässigkeiten der Wellentheorie beschrieb. Damit vermochte er die Newtonschen Ringe physikalisch plausibel zu begründen, was den Korpuskeltheoretikern nicht gelingen wollte. Im Jahr 1817 hatte Young für das Licht transversale Wellen vorgeschlagen. Diese These erhielt Unterstützung durch die Beobachtung, dass zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtstrahlen keine Interferenz bewirkten.

Augustin Jean Fresnel gelang es in der Folge, auch die Beugung mit der Wellentheorie in Einklang zu bringen. Im selben Jahr (1818) konnte der Franzose auch die bereits 1728 von James Bradley entdeckte (stellare) Aberration mit der Wellentheorie erklären. Auch die Experimente von George B. Airy im Jahr 1831 erhärteten zunehmends die Wellennatur des Lichtes.

Im Jahr 1851 bestätigte Armand Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) experimentell den Fresnelschen Mitführungskoeffizienten für Licht in bewegten Medien. Der Fizeau-Versuch mit Licht in strömendem Wasser (und nicht etwa der Michelson-Morley-Versuch) sollte sich für Einstein als zielführend erweisen.

Britische Äthermodelle

James MacCullagh (1809-1847) übernahm 1837/39 einige von diesen neuen Ideen. Aufhorchen lässt, dass MacCullaghs Äthermodell mechanische Verdrehungen gegen den absoluten Raum in einem elastischen Festkörper erforderte und zu Bewegungsgleichungen führte, die in ihrer Form den damals noch unbekannten Maxwell-Gleichungen entsprachen.

George Gabriel Stokes (1819-1903) vertrat um 1845 die Idee einer partiellen Mitführung des Äthers durch ponderable Körper. Auch die Erde sollte den Äther mit sich führen. Demzufolge sollte sich die Lichtgeschwindigkeit mit der Höhe verändern. Solches war mit ein Grund, weshalb Dayton C. Miller später auf einen "hohen Berg" ging, um dort (auf dem Mt. Wilson) seine Drift-Experimente durchzuführen.

Anm. d. Verfassers: Stokes schrieb dem Lichtäther besondere Eigenschaften nichtnewtonscher Fluide zu, die er mit denen von Pech, Siegellack oder nassem Sand (Treibsand) verglich. Von diesen Stoffen war bekannt, dass sie zu einer mikroplastischen Deformation bei grossem dF/dt nicht fähig sind, nichtsdestotrotz aber sich langsamen Bewegungen gegenüber nachgiebig erweisen. Pech zerspringt, wenn es mit einem Hammer genügend stark angeschlagen wird. Ein schweres Gewicht hingegen sinkt wie

¹⁸ B.G. Kuznecov: Von Galilei bis Einstein (Akademie-Verlag, 1970).

bei einer zähen Flüssigkeit langsam ein. Um transversale Schwingungen zu erlauben, musste der Lichtäther demzufolge kristallin, andererseits aber massiven Körpern gegenüber äusserst nachgiebig sein. Wie wir inzwischen wissen, besitzt nur ein suprasolides Quantenfluid solche exotische Eigenschaften.

Nach den Gesetzen der Mechanik gilt allgemein: $c^2 = k/\rho$ (c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Störung im Medium, ρ dessen Dichte). Je nach Stoff und Wellenform muss für k das Elastizitätsmodul, das Schubmodul oder das Kompressionsmodul eingesetzt werden. Für Gase ist der Druck und der Isentropenexponent massgebend. In Gasen und Flüssigkeiten gibt es keine Transversalwellen. Solche kommen nur in Festkörpern vor. Der Weltäther muss deswegen kristallähnliche Eigenschaften besitzen, damit ihn transversale Wellen passieren können. Ein Festkörper kommt ungeachtet dessen nicht in Frage. Ansonsten würden die Planeten nicht seit Jahrtausenden ungebremst um die Sonne kreisen.

Als Ausweg aus dem Dilemma bietet sich ein suprasolides Quantenfluid an. Also eine Fluid mit verschwindender Viskosität und zugleich kristallinen Eigenschaften. Vor Kurzem erst wurden solche Attribute bei Helium-4 beobachtet. Das von uns geforderte Suprafluid soll zudem masselos und elektrisch neutral sein, um Interaktionen mit der gewöhnlichen Materie zu minimieren. Für derartig exotische Eigenschaften bietet sich eigentlich nur ein Bose-Einstein-Kondensat an. In einem solchen (semi-stofflichen) Ätherfluid gäbe es nebst den transversalen elektromagnetischen Wellen auch Longitudinalwellen (wobei dann auch die von Whittaker gefunden Lösungen ihre Anwendung fänden).

In Rahmen der Elektrodynamik sind ausser den in der Radiotechnik bekannten Transversalwellen auch longitudinale Wellen möglich. Solche kommen bekanntlich in Wellenleitern vor (TE- und TM-Wellen). Whittaker (1904) hat zudem für das Vakuum zwei skalare Potentiale abgeleitet, die als Zentren oszillierender Wellenpaare verstanden werden können. Vor einigen Jahren soll Monstein mit einer Kugelantenne skalare Wellen abgestrahlt haben; aber das Ergebnis ist nicht schlüssig genug, um die erwarteten Effekte zu erhärten. Gut möglich ist, dass bereits Tesla solche Skalarwellen in Colorado Springs erzeugt hat. Infolge der Einengung auf transversale Wellen hat man dieser Entwicklung jedoch keine weitere Beachtung geschenkt.

James Clerc Maxwell (1831-1879), dem wir die Feldgleichungen der Elektrodynamik verdanken, versuchte den Äther mittels mechanischer Analogien durch sog. Molekularwirbel zu erklären. In seinen Feldgleichungen sind deutlich strömungsmechanische Ansätze erkennbar.

In einem Eintrag in der Encyclopædia Britannica schrieb Maxwell:

Welche Schwierigkeiten wir auch haben, eine konsistente Vorstellung der Beschaffenheit des Äthers zu entwickeln: Es kann keinen Zweifel geben, dass der interplanetarische und interstellare Raum nicht leer ist, sondern dass beide von einer materiellen Substanz erfüllt sind, die gewiss die umfangreichste und vermutlich einheitlichste Materie ist, von der wir wissen.

Später wurden kompliziertere Äthermodelle entwickelt, die mechanischen Getrieben glichen. Es blieb bei Analogievergleichen, die letztlich zum Scheitern veurteilt waren.

William Thomson (1824-1907) – besser bekannt als Lord Kelvin¹⁹ – sprach von Ätherwirbeln (Vortices), die den Helmholtzschen Wirbelsätzen gehorchen sollten.

Hermann von Helmholtz (1821-1894) hatte 1858 bewiesen, dass Wirbelringe in einem idealen Fluid unzerstörbar sind.

Nach Helmholtz gilt für ein ideales²⁰ Fluid:

¹⁹ Lord Kelvin, geboren als William Thomson, war ein in Irland geborener britischer Physiker.

²⁰ Ideal ist ein Fluid dann, wenn es reibungsfei und inkompressibel ist.

- 1) Ein Wirbelfaden besitzt kein freies Ende innerhalb einer Flüssigkeit. Er ist entweder geschlossen oder endet an einer Begrenzung (sei es an einer Gefäßwand oder an der Oberfläche).
- 2) Eine Wirbelröhre besteht immer aus denselben Fluidteilchen.
- 3) Die Zirkulation ist für jeden beliebig geschlossenen Weg ∮ **v**·d**s**, der den Wirbelkern umläuft, konstant.

Fazit: In einer idealen Flüssigkeit lässt sich ein Wirbel weder erzeugen noch vernichten. Sind trotzdem Wirbel vorhanden, so müssen diese von Anfang an eingeprägt sein.

Gemäss den Wirbelsätzen sind quellfreie Wirbelausprägungen denkbar, die äusserst stabil und langlebig sind. Ein derartiger Wirbel ist uns vom Jupiter (grosser roter Fleck) und weiteren Gasplaneten bekannt. Versuche im Tieftemperaturbereich haben gezeigt, dass Wirbel, die in suprafluidem Helium erzeugt wurden, praktisch unbegrenzt erhalten bleiben.

Atomare Teilchen wurden mittels der aufkommenden Knotentheorie – heute einem Teilgebiet der Topologie – als unterschiedliche Verknotungen von Wirbelfäden (Abb. 1-1) erklärt. An der Ausarbeitung dieser Disziplin war nebst Peter Guthrie Tait (1831-1901) auch Maxwell beteiligt.²¹

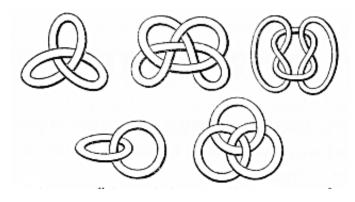


Abb. 1-1 Beispiele verknoteter Ätherwirbel²²

Die dynamischen Eigenschaften des Äthers waren somit nicht nur für die optischen und elektromagnetischen Phänome verantwortlich, sondern auch für den Aufbau der atomaren Materie, indem deren Grundbausteine als Verknotungen wirbelförmiger Ausprägungen eines Ätherfluids verstanden wurden. Den unterschiedlichen Atomen entsprachen topologisch verschiedene Knotentypen.

Anm. d. Verfassers: Das Thomsonsche Äther-Modell konnte sogar erklären, weshalb wir in einem dreidimensionalen Unterraum des Universums existieren; denn nur in drei reellen räumlichen Dimensionen sind Knoten topologisch stabil (in vier Dimensionen zerfallen sie wieder). Gleiches gilt für die Keplerbahnen der Planeten und auch für die Grundzustände der Hüllenelektronen im Atom. In einem vierdimensionalen Ortsraum lassen sich Knoten auch ohne Zerschneiden auflösen – was für den Astronomen Karl Friedrich Zöllner (1834-1882) Anlass genug war, sich mit dem Spiritisten Slade in Verbindung zu setzen. Auch wir sind der Ansicht, dass sich paranormale Phänomen in einem Vierraum

²¹ M. Epple: Die Entstehung der Knotentheorie (Vieweg).

²² W. Thomson [Lord Kelvin]: On Vortex Motion (Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1869).

besser erklären lassen. Die Heimsche Theorie verwendet stattdessen ein sechsdimensionales Welttensorium mit drei reellen und drei imaginären Weltkoordinaten.

Letztlich fehlte den Physikern des ausklingenden "Fin de Siècl" eine konsistente und in sich selbst widerspruchsfreie Äthertheorie. Eine solche konnte erst mit der Quantenphysik zum Erfolg führen. Als es soweit war, sprachen keiner mehr vom Äther. Moderne Äthertheorien bemühen das Superfluidmodell, in dem das Vakuum als reibungsloses Fluid behandelt wird. In einem derartigen Fluid gibt es auch keinerlei Widerstand gegen Verformung.

Der relativistische Äther

Obwohl Albert Einstein den Lichtäther für die SRT als entbehrlich erklärte, kam dem Äther noch immer eine gewisse Funktion zu. Ungeachtet seiner früheren Aussage sprach Einstein in seiner Rede an der Reichs-Universität Leiden (1920) von einem Äther der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Indessen lehrt ein genaueres Nachdenken, daß diese Leugnung des Äthers nicht notwendig durch das spezielle Relativitätsprinzip gefordert wird. [...] Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist der Raum mit physikalischen Qualitäten ausgestattet; es existiert also in diesem Sinne ein Äther.²³

Das Gros der anwesenden Wissenschaftler vermochte dieser Argumentation vermutlich nicht zu folgen und verblieb daher bei der Abschaffung des Äthers.

Ein paar Jahre später wiederholte Einstein seine diesbezügliche Überzeugung mit den Worten:

...werden wir des Äthers, d. h. des mit physikalischen Eigenschaften ausgestatteten Kontinuums, in der theoretischen Physik nicht entbehren können; denn die allgemeine Relativitätstheorie, an deren grundsätzlichen Gesichtspunkten die Physiker wohl stets festhalten werden, schliesst eine unvermittelte Fernwirkung aus; jede Nahewirkungs-Theorie aber setzt kontinuierliche Felder voraus, also auch die Existenz eines "Äthers".²⁴

In diesem Sinne ist Newtons absoluter Raum der "Äther der Mechanik", dem später der "Äther der Elektrodynamik" von Maxwell, Hertz und Lorentz folgte. Selbst die SRT verwende einen Äther, doch existiere in diesem nicht länger ein bevorzugter Bewegungszustand. Einsteins modifizierter Ätherbegriff bezog sich auf die physikalischen Aspekte des raumzeitlichen Kontinuums und war letztlich mit dem metrischen Feld der ART assoziierbar. Erst in seinen späteren Jahren vermied auch Einstein den Ätherbegriff. Kurz vor seinem Ableben im Jahre 1955 musste er aber doch einräumen:

Vorläufig wissen wir nicht, zu welcher Rolle der neue Äther im Weltbild der Zukunft bestimmt ist...

Rund zehn Jahre nach Einsteins Ansprache in Leyden führte der britische Physiker Paul Dirac (1902-1984) einen "See virtueller Teilchen" in die Quantenphysik ein – womit der Äther in modifizierter Form in die Physik zurückkehrte.²⁵ Eine zeitlang sprachen Wissenschaftler vom Dirac-See als dem quantenmechanischen Äther.²⁶ Allerdings vermochte sich dieser Ansatz gegenüber dem Mainstream nicht durchzusetzen.

²³ A. Einstein: Äther und Relativitätstheorie (Springer).

²⁴ A. Einstein: Über den Äther (in "Verhandlungen der Schweizerischen naturforschenden Gesellschaft" Nr. 2, 1924).

²⁵ P.M.A. Dirac: Is there an Aether? (Nature, 1951).

N.C. Petroni, J.P. Vigier: Dirac's aether in relativistic quantum mechanics (Foundations of Physics, 1983).
 M. Carvalho, A.L. Oliveira: A New Version of Dirac's Æther and Its Cosmological Applications (2002).

Moderne Physiker lehnen – von wenigen Ausnahmen abgesehen – das Ätherparadigma ab. Lediglich ein paar wenige wie z.B. Robert B. Laughlin und Frank Wilczek²⁷ sprechen in Bezug auf das Quantenvakuum weiterhin von einem Äther.

Laughlin – Nobelpreisträger für Physik (1998) – betonte:

Die moderne, jeden Tag experimentell bestätigte Vorstellung des Raumvakuums ist ein relativistischer Äther. Wir nennen ihn nur nicht so, weil das Tabu ist. ²⁸

Per se ist der alte Äther zwar tot; doch im Rahmen moderner Driftexperimente begegnen wir diesem verpönten Begriff erneut. George F. Smoot, ein Astrophysiker von der Berkeley-Universität in Kalifornien, sprach in seiner Nobelpreisrede (2006) davon, dass ein Bezugssystem, in welchem die kosmische Mikrowellenstrahlung isotrop ist, als Äther bezeichnet werden könne.

1.2 Wegbereiter der Speziellen Relativitätstheorie

1.2.1 Die Transformationen

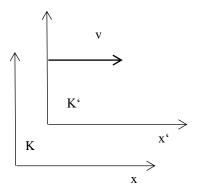
Der Weg zur Lorentztransformation war langwierig und führte schliesslich zu einem epochalen Paradigmawechsel in der Physik. Wie so oft in den Naturwissenschaften waren verschiedenste Geister unabhängig voneinander am Werk, um dem physikalischen Sachverhalt in einzelnen Schritten kangsam näherzukommen. Beginnen wir mit Galilei.

Die Galilei-Transformation

In der klassischen Mechanik gelten zwischen zwei beliebigen *Inertialsystemen* K und K' – unter der Voraussetzung einer eindimensionalen Bewegung (Abb. 1-2) – die folgenden Transformationsformeln:

$$x = x' + vt$$
; $y = y'$; $z = z'$; $t = t'$

Es ist von der Galilei-Transformation die Rede, welche im nichtrelativistischen Grenzfall ihre Berechtigung besitzt. Erst bei sehr grossen, gegen c (Vakuumlichtgeschwindigkeit) verlaufenden Geschwindigkeiten ponderabler Körper versagen die klassischen Transformationsgleichungen.



K' bewege sich in Richtung der x-Achse mit der konstanten Geschwindigkeit v.

Abb. 1-2 Galileische Koordinatensysteme

Anm. d. Verfassers: Inertialsysteme sind Bezugssysteme, in denen das Galileische Trägheitsprinzip gilt. Ohne Einwirkung äusserer Kräfte befinden sich materielle Körper in Ruhe oder in gleichförmiger

²⁷ F. Wilczek: Lightness of being. Mass, Ether and the Unification of Forces (Basic books, 2008).

²⁸ R.B. Laughlin: Abkehr von der Weltformel (Piper).

und geradliniger Bewegung. Sämtliche Inertialsysteme sind gleichberechtigt zueinander. Ergo existiert kein ausgezeichnetes Bezugssystem. Die Konsequenzen sind folgende: Mechanische Vorgänge wie z.B. Pendel- oder Fallbewegungen verlaufen in jedem Inertialsystem stets nach denselben Gesetzmässigkeiten. Erinnert sei an Galileis idealisierte Vorstellung eines in gleichförmiger Bewegung befindlichen Schiffes. Mit verbundenen Augen kann ein mitreisender Beobachter nicht erkennen, ob sich das Schiff in Ruhe befindet oder fährt. Ein simpler Versuch bestätigt diese Aussage. Wenn man sich bei ruhiger See auf einem gleichmässig dahinfahrenden Schiff befindet und sich ein Getränk einschenkt, so kommt die Flüssigkeit genauso präzise ins Glas wie bei ruhender Anwesenheit auf dem Lande. Nach altertümlicher Vorstellung müsste die Flüssigkeit aber neben dem Glas ankommen, weil sich das Schiff in der Zwischenzeit um eine kleine Strecke weiter bewegt hat.

Streng genommen gilt das oben gesagte nur für echte Inertialsysteme. Global ist die Erde aufgrund ihrer Rotation und der damit auftretenden Scheinkräfte kein Inertialsystem. Mit einem Foucaultschen Pendelversuch (um ein mechanisches Experiment zu nennen) lässt sich die Eigenrotation der Erde auf jedem Breitengrad – den Äquator ausgenommen – und selbst an den Polen nachweisen. Inertialsysteme lassen sich aber auch auf der Erde näherungsweise realisieren. Für nur kurze Zeitspannen und bei nicht allzu grosser Ausdehnung der Experimentalumgebung kann die Erdoberfläche (sofern der Einfluss der Gravitation nicht berücksichtigt werden muss) als Inertialsystem betrachtet werden.

Bezüglich mechanischer Vorgänge entstehen mit der Galilei-Transformation bei relativ geringen Geschwindigkeiten keine Probleme. Ganz anders sieht es mit elektrodynamischen Erscheinungen aus. Ein Gedankenexperiment möge einen für die klassische Physik irritierenden Sachverhalt veranschaulichen.

Zum Zeitpunkt t_0 erzeuge ein in K' befindlicher Beobachter einen Lichtblitz, der sich als sphärische Wellenfront im materiefreien Raum (Vakuum) ausbreitet. Für einen zweiten in K ruhenden Beobachter müsste sich nach klassischer Vorstellung eine Phasengeschwindigkeit ergeben, die sich aus der Wellengeschwindigkeit und der Relativgeschwindigkeit von K' zusammensetzt. So ist es aber nicht! Beide Beobachter messen exakt dieselbe Lichtgeschwindigkeit, die wir mit c_0 bezeichnen. Diese bis heute vielfach bestätigte Beobachtung ist im Kontext tiefschürfender Untersuchungen, die zum Michelson-Experiment und dem damit verbundenen Paradigmawechsel führten, zu betrachten.

Anm. d. Verfassers: c_0 ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit von $\approx 300^{\circ}000$ km/s und gilt als obere Grenzgeschwindigkeit, die nach bisheriger Erfahrung nicht überschritten werden kann. In lichtdurchlässigen Medien ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner. Adäquates gilt für die technisch nutzbaren elektromagnetischen Wellen, deren Geschwindigkeit im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmt. In stofflichen Medien und auf Leitungen dagegen nimmt die Wellengeschwindigkeit ab. Mit bestimmten Kristallen (z.B. Alexandrit) lässt sich die Lichtgeschwindigkeit auf weniger als 100 m/s reduzieren. 29

Damit die *Kovarianz* nicht nur der Maxwellschen Gleichungen, sondern auch der Bewegungsgleichungen der Mechanik in sämtlichen Inertialsystemen gewährleistet bleibt, musste eine neue Transformationsgruppe die alte Galilei-Transformation ablösen. Solches ist mit der Lorentz-Transformation geglückt. Im Kontext spricht man auch von Lorentz-Invarianz.

Mit der Zeit erkannten die Wissenschaftler, dass es eine neuartige Transformation braucht, um sowohl mechanische als auch elektrodynamische Vorgänge einheitlich zu beschreiben. Poincaré,

²⁹ Bigelow et al.: Superluminal and Slow Light Propagation in a Room-Temperature Solid (2003).

der zu den in diese Problematik involvierten Wissenschaftlern gehörte, benannte diese Transformation im Jahre 1904 – die Verdienste von Hendrik A. Lorentz würdigend – als Lorentztransformation. Es ergab sich, dass die Maxwellschen Gleichungen gewissermassen von Natur aus bereits lorentzinvariant waren. Sie besitzen in allen Inertialsystemen dieselbe Form und Gültigkeit.

Anm. d. Verfassers.: Die der Elektrodynamik zugrunde liegenden und nach Maxwell benannten Gleichungen beschreiben das elektromagnetische Feld in einem dreidimensionalen euklidischen Bezugsraum. Es handelt sich um ein System gekoppelter Differentialgleichungen. Sie gelten sowohl im Vakuum und homogenen als auch in inhomogenen, nichtlinearen und anisotropen Medien, wenn diese in Bezug auf das gewählte Koordinatensystem stationär sind und das Bezugssystem ein Inertialsystem ist.

Die Voigt-Transformation

Auf der Kristalloptik und dem elastischen Äther Fresnels aufbauend entwickelte der Physiker Woldemar Voigt (1850-1919) im Jahre 1887 eine neue Klasse von Transformationsgleichungen. Voigt – Schüler des Theoretikers Franz E. Neumann – erwarb sich grosse Verdienste in der Kristallografie³⁰ und gilt als Begründer der Festkörperphysik. Einige seiner Studenten – unter ihnen Paul Drude, Friedrich Pockels und Walter Ritz – machten später von sich reden.

Voigt, der als einer der ersten Physiker die Eigenschaften von Tensoren nutzte, stiess bei seinen Untersuchungen zur theoretischen Optik auf eine Transformationen, welche die Wellengleichung unverändert beliess.

$$x' = x - vt;$$
 $y' = y/\gamma;$ $z' = z/\gamma;$
 $t' = t - x \frac{v}{c^2}$

Der Mathematiker Hermann Minkowski schrieb später darüber:

Historisch will ich noch hinzufügen, daß die Transformationen, die bei dem Relativitätsprinzip die Hauptrolle spielen, zuerst mathematisch von Voigt im Jahre 1887 behandelt sind. Voigt hat damals bereits mit ihrer Hilfe Folgerungen in bezug auf das Dopplersche Prinzip gezogen.³¹

In den Jahren 1887-88 publizierte Voigt eine umfangreiche "Theorie des Lichtes für bewegte Medien". Dies zeigt, dass sich bereits zwei Jahrzehnte vor Einstein andere Wissenschaftler umfangreiche Gedanken über diesen Gegenstand machten. Obwohl anfänglich von der durch Fresnel erarbeiteten Theorie eines elastischen Lichtäthers ausgehend, gab Voigt in späteren Jahren die mechanistischen Modellvorstellungen zugunsten einer phänomenologischen Theorie auf. Die diesbezüglichen Gedankengänge sind im zweiten Band von Voigts "Kompendium der theoretischen Physik" enthalten.

Ungeachtet des neuartigen Ansatzes war die Voigt-Transformation nicht symmetrisch und daher nicht mit dem Relativitätsprinzip verträglich. In den nachfolgenden Jahren (1895, 1899, 1904) wurde die Voigt-Transformation durch die relativistische Transformation von Hendrik A. Lorentz verdrängt. Bekannt ist, dass sich Voigt mit Lorentz über die Michelson-Versuche austauschte.

³⁰ W. Voigt: Lehrbuch der Kristallphysik (Leipzig, 1910).

³¹ Aus einer Diskussion in "Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz-Einsteinschen Theorie" von A.H. Bucherer (1908).

Lorentz äusserte sich später darüber, dass er die Voigt-Transformation noch nicht gekannt habe, als er sich mit dieser Thematik zu befassen begann. Die von Albert Michelson (1852-1931) durchgeführten Versuche (1881 in Potsdam, 1887 zusammen mit Edward W. Morley in den USA) waren Lorentz natürlich bekannt. Einstein dagegen will erst später (also nach 1905) davon gehört haben.

Die Lorentztransformation

Im Jahre 1892 führte Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) für Transformationen zwischen dem Äthersystem und einem dazu gleichförmig bewegten System neue Gleichungen in die Physik ein.

Für die Optik bewegter Körper lauteten die Gleichungen:

$$x'=x-vt;$$
 $y'=y;$ $z'=z$
 $t'=t-(x-vt)\frac{v}{c^2}$

Lorentz nahm diese eher intuitiv gefundenen Transformationen a priori an, um damit die Kovarianz der Maxwellgleichungen zu belegen. Er leitet sie jedoch nicht geschlossen her. In ihre endgültige Form gebracht wurden diese Gleichungen 1904 durch den Ingenieur und Mathematiker Henri Poincaré.

In heutiger Notation besitzen die Transformationsgleichungen die folgende Form:

$$x' = \gamma(x - vt); \quad y' = y; \quad z' = z$$

$$t' = t - \gamma^{2}(x - vt) \frac{v}{c^{2}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^{2}}{c^{2}}}}$$

Die in der SRT enthaltene Lorentz-Transformation war also bereits abgeschlossen, als Einstein seine bahnbrechende Arbeit *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* einreichte. Ungeachtet dieses Faktums muss betont werden, dass viele der prinzipiell zwar richtigen Überlegungen einer Ad hoc Konstruktion entsprangen. Der Lorentzschen Theorie fehlt es an Allgemeinheit, was insbesondere Poincaré bemängelte.

1.2.2 Die Wegbereiter der Speziellen Relativitätstheorie

Der Lorentzsche Beitrag zur SRT (1892, 1895, 1899, 1904)

1892 führte Lorentz die Hypothese ein, dass bewegte Körper eine Verkürzung in Bewegungsrichtung erfahren. In gewissem Sinne war es eine Verlegenheitslösung, um so den negativen Ausgang der Michelson-Versuche zu begründen. Der Autodidakt Oliver Heaviside sprach spöttelnd von "einer Erklärung einer Erklärung".

Anm. d. Verfassers: Oliver Heaviside (1850-1925), zunächst als Telegraphist tätig, steuerte im Laufe seines Lebens etliche Beiträge zur Elektrodynamik, Elektrotechnik und Analysis bei. Bekannt z.B. ist die in drei Bänden erschienene *Electromagnetic Theory*. Von Heaviside stammt auch die Operatoren-Rechnung (die von einigen als Vorläufer der Laplace-Transformation angesehen wird). 1888 hatte

Heaviside die Eigenschaften bewegter Ladungen aufgrund der Maxwellschen Elektrodynamik untersucht, mit dem Ergebnis, dass dabei Anisotropien des elektrischen Feldes entstehen mussten. Im Alter entwickelte sich der Gelehrte zu einem ausgesprochenen Sonderling. Zu diesem Verhalten beigetragen hat vermutlich eine in der Jugend erworbene Schwerhörigkeit.

1896 kam George Frederick Charles Searle (1864-1954), ein englischer Physiker und Lecturer, zum Schluss, dass der von Heaviside eingeführte Term für bewegte Ladungen eine Deformation des elektrischen Feldes zur Folge hatte, die er als "Heaviside-Ellipsoid" bezeichnete. Searl erkannte als einer der ersten, dass ponderable Körper nicht über die Lichtgeschwindigkeit hinaus beschleunigt werden konnten.

Als Lorentz die Längenkontraktion einführte, wusste er anscheinend noch nichts von einer Arbeit des irischen Physikers George F. FitzGerald³² aus dem Jahre 1884, in der die Kontraktion bewegter Körper bereits eingehend beschrieben wurde. Veröffentlicht wurden diese neuartigen Gedanken aber erst 1889 in der wissenschaftlichen Zeitschrift *Science*.³³

Während die Längenkontraktion für Lorentz ein realer physikalischer Effekt war, betrachtete er die 1895 von ihm aus formalen Gründen eingeführte "Ortszeit" lediglich als nützliche Rechenhilfe. An eine reale Verlangsamung des Uhrenganges dachte Lorentz dabei noch nicht. Ungeachtet seiner Skepsis erkannte Lorentz aber intuitiv, dass ein relativ zum Äther bewegter Oszillator langsamer schwingt als ein ruhender. Eine fundamentale Erkenntnis, die sehr gut zum relativistischen Gittermodell der Raumzeit von Helmut Günther passt, auf welches wir später noch genauer eingehen.

Ab 1895 baute Lorentz seine Vorstellungen systematisch aus. Als fundamentales Prinzip führte er das "Theorem der korrespondierenden Zustände" für Grössen erster Ordnung v/c ein. Daraus folgte, dass ein im Äther in Bewegung befindlicher Beobachter bezüglich der Optik bewegter Körper zu denselben Schlussfolgerungen gelangen musste wie ein im Äther ruhender Beobachter. Gedanklich unterschied Lorentz das "fiktive elektromagnetische Feld" des bewegten Beobachters und das "reale elektromagnetische Feld" des ruhenden Beobachters. Aus heutiger Beurteilung wirkt diese Unterscheidung gekünstelt. Für die damaligen Physiker waren es mühselige Zwischenschritte, die am Schluss zu einer nachhaltigen Modifikation von Raum und Zeit führten.

1899 leitete Lorentz bis auf einen "freien Skalenfaktor" die vollständige Transformation durch die Erweiterung des "Theorems der korrespondierenden Zustände" ab.

1904 kam Lorentz zum Schluss, dass seine Transformation auf alle Kräfte der Natur angewendet werden müsse und nicht nur auf elektrische. Im selben Jahr bereinigte Lorentz seine früheren Gleichungen, indem er aus den Bewegungsgleichungen eines Elektrons in einem äusseren Feld folgerte, dass der Skalenfaktor ϵ = 1 sein müsse. Er suchte weiterhin nach einem Theorem, das die Symmetrieeigenschaften der inhomogenen Maxwellgleichungen aufzeigen sollte; dabei unterlief ihm in der Beweisführung ein Fehler. In seiner Arbeit beschrieb er auch die longitudinale und transversale Masse des Elektrons (heutzutage bedeutungslose Begriffe) und vermochte zu zeigen, dass dies mit den Messungen von Kaufmann³⁴ verträglich war. Damit erfolgte im Grunde

³² George Francis FitzGerald (1851-1901) war Professor für Natur- und Experimentalphilosophie am Trinity College in Dublin.

³³ B. Hoffmann: Einsteins Ideen (Spektrum Verlag).

³⁴ Walter Kaufmann (1871-1947) – ein deutscher Physiker – gelang als erstem Experimentator der Nachweis, dass die

die Geburtsstunde der später als "Spezielle Relativitätstheorie" benannten Lehre, weil nun nebst der Elektrodynamik auch die Mechanik ins Zentrum der relativistischen Überlegungen rückte.

Später schrieb Lorentz über seine Arbeit:

Zweitens nehme ich an, daß die Kräfte zwischen ungeladenen Teilchen, ebenso wie die Kräfte zwischen ungeladenen Teilchen und Elektronen, durch eine Translation in genau derselben Weise wie die elektrischen Kräfte in einem elektrostatischen System beeinflußt werden. [...] Man wird bemerken, daß ich in dieser Abhandlung die Transformationsgleichungen der Einsteinschen Relativitätstheorie nicht ganz erreicht habe. [...] Mit diesem Umstande hängt das Unbeholfene mancher weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit zusammen. Es ist das Verdienst Einsteins, das Relativitätsprinzip zuerst als allgemeines, streng und genau geltendes Gesetz ausgesprochen zu haben.³⁵

Lorentz hielt ungeachtet der von Einstein ausgelösten Umwälzung am Ätherparadigma fest. Mit dem wesentlich jüngeren Einstein verband ihn trotz ihrer unterschiedlichen Ideen ein sich über viele Jahre erstreckender Briefwechsel.

Larmors Beitrag zur SRT (1897, 1900)

Joseph Larmor (1857-1942) wusste bereits, dass das Michelson-Morley-Experiment von 1887 präzise genug war, um bewegungsbedingte Effekte für Grössen in zweiter Ordnung v²/c² aufzuzeigen. Aufbauend auf dem von Kelvin entwickelten Wirbelmodell betrachtete Larmor den Äther als inkompressibles und mit einem Fluid vergleichbares Medium, in dem sich die Materie als ein Strom von Partikeln bewegte. Larmor war sich der Längenkontraktion und Zeitdilatation als Konsequenz seiner Gleichungen bewusst. Wie schon Lorentz ging er von einer dynamischen Interpretation der relativistischen Effekte aus, während Einstein und viele Physiker der nachfolgenden Generation eine kinematische Sicht bevorzugten.

Die 1897 von Larmor entwickelten Transformationen besassen folgende Form:

$$x' = \gamma(x - vt); \quad y' = y; \quad z' = z$$
$$t' = \frac{t}{v} - \gamma(x - vt) \frac{v}{c^2}$$

1900 veröffentliche Larmor seine Gleichungen in übersichtlicherer Notation. Grössere Beachtung auf dem Kontinent fand Larmor allerdings nicht.

Poincaré's Beitrag zur SRT (1895, 1900, 1904 ff.)

Es war Henri Poincaré (1854-1912), welcher zwischen 1904 bis 1905 den von Lorentz und Larmor entwickelten Transformationen ihre endgültige Gestalt verlieh und sie somit symmetrisch machte. Er untersuchte auch ihre Gruppeneigenschaften, weshalb in der Fachliteratur von der *Lorentz-Gruppe* die Rede ist. Darunter versteht man die Gruppe aller Lorentz-Transformationen in der Minkowski-Raumzeit.

In moderner Notation geschrieben:

träge Masse eines Elektrons mit anwachsender Geschwindigkeit zunimmt.

³⁵ H.A. Lorentz: Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt (1913).

$$x = k(x' + vt')$$
; $x' = k(x - vt)$; $t = (kx - x')/kv$; $t' = (x - kx')/kv$

Als ausgesprochener Konventionalist gelangte Poincaré im Jahre 1895 zum Schluss, dass eine absolute Bewegung gegenüber dem Äther nicht nachweisbar sei. Poincaré, der von berufeswegen viel mit der Synchronisation von Uhren zu tun hatte, wusste genau, worüber er sprach.

1898 gab Poincaré die Vorstellung einer "absoluten Zeit" und einer "absoluten Gleichzeitigkeit" auf. Im selben Jahr erschien auch sein Buch "La Mesure du temps", das Einstein möglicherweise gelesen hatte, als er nach seinem Studium am Polytechnikum in Zürich zunächst als Beamter des Patentamtes in Bern arbeitete. Die "Relativität der Gleichzeitigkeit" wurde deutlich angesprochen, indem Poincaré die Schwierigkeiten bei der Messung gleichzeitiger Ereignisse luzide beschrieb.

Um die Jahrhundertwende sprach Poincaré vom "Prinzip der relativen Bewegung" und 1904 vom "Prinzip der Relativität". Im selben Jahr erschien "La Valeur de la Science", eine Schrift, in der auch Poincarés legendäre Rede von St. Louis abgedruckt ist, welche die "neue Mechanik" in Prosa vorwegnimmt. Im Schlußsatz – und hierin erwies sich Poincaré wiederum als schwerblütiger Konventionalist – hiess es vorsichtig formulierend:

Vielleicht müssten wir auch eine neue Mechanik ersinnen, die uns nur undeutlich vorschwebt, worin ... die Geschwindigkeit des Lichtes eine unüberschreitbare Grenze wäre. [...] Ich füge aber [...] hinzu, daß wir noch nicht so weit sind, und daß noch durch nichts bewiesen ist, daß [die alten Prinzipien] nicht siegreich und unberührt aus dem Kampfe hervorgehen werden.

1905 bereinigte Poincaré in "Sur La Dynamique de l'Electron" die letzen noch anhaftenden Mängel in der Lorentz'schen Arbeit von 1904. Eine Kurzfassung erschien bereits am 5. Juni 1905, während die Vollversion vom 23. Juli 1905 erst im Frühjahr 1906 gedruckt wurde. Darin wurde u.a. Gebrauch von der Lorentzkovarianz gemacht und die spezielle Lorentztransformation als Drehung im nichteuklidischen vierdimensionalen Kontinuum beschrieben. Längen wurden durch Lichtlaufzeiten mit c = 1 definiert. Ein vollständiger Beweis der Kovarianz der Maxwellschen Elektrodynamik lag bei.

Ungeachtet dieser wegweisenden Erkenntnisse blieb Ponicaré den Konventionen verhaftet, war aber darüber hinaus der Ansicht, dass eine "neue Mechanik" erforderlich sei. 36

Es kümmert uns wenig, ob der Äther wirklich existiert; das ist Sache des Metaphysikers; wesentlich für uns ist nur, dass alles sich abspielt, als wenn er existierte, und dass diese Hypothese für die Erklärung der Erscheinungen bequem ist. Haben wir übrigens eine andere Ursache, um an das Dasein der materiellen Objekte zu glauben? Auch das ist nur eine bequeme Hypothese, nur wird sie nie aufhören zu bestehen, während der Äther eines Tages ohne Zweifel als unnütz verworfen wird.³⁷

Ungeachtet dieser Voraussage blieb Poincaré weiterhin dem Ätherparadigma verhaftet.

Die "neue Mechanik" begann mit den 1901 von Kaufmann durchgeführten Messungen an schnell bewegten Elektronen in elektromagnetischen Feldern. 1906 wiederholte Kaufmann seine Messungen mit dem Fazit, dass diese nun eher für Abrahams Elektronentheorie, die ohne Längenkontraktion auskam, sprachen. Erst ab 1909 wendete sich das Blatt infolge Bucherers präziseren

³⁶ P. Galison: Einsteins Uhren, Poincarés Karten (Fischer Taschenbuch).

³⁷ https://de.wikipedia.org/wiki/Lorentzsche_%C3%84thertheorie#cite_ref-38

Messungen wieder zugunsten der Einsteinschen Theorie.

Anm. d. Verfassers: Max Abraham (1875-1992) war ein mathematisch geschulter Physiker, der als Widerpart der Relativitätsphysik seine eigenen Vorstellungen entwickelte, die sich aber gegenüber den Einsteinschen Ideen nicht durchzusetzen vermochten. Er führte mit Einstein einen umfangreichen Briefwechsel und ließ sich schließlich um 1912 soweit überzeugen, dass die Spezielle Relativitätstheorie logisch korrekt aufgebaut sei; dennoch hielt er sie für ungeeignet, die physikalische Realität zu beschreiben.

Um 1912 war Abraham der Ansicht, dass Einstein durch die Aufgabe der uneingeschränkten Gültigkeit der Lichtkonstanz der Speziellen Relativitätstheorie den "Gnadenstoß" versetzt habe, was jedoch von Einstein umgehend zurückgewiesen wurde. Darüber hinaus entwarf er seine eigene Gravitationstheorie, wobei es in der Folge zu einem Disput mit Einstein kam. Trotz der unterschiedlichen Meinungen erkannte Einstein an, dass Abraham einer der wenigen war, die seine Bemühungen bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie verstanden hatten.

In einem Nachruf schrieben die Physiker Max Born und Max von Laue, die Verdienste Abrahams würdigend: Er liebte seinen absoluten Äther, seine Feldgleichungen, seine starren Elektronen gerade so wie ein junger Mann seine erste Liebe, deren Erinnerungen keine späteren Erfahrungen auslöschen können.

Als sich Rolf Wideröe im Herbst des Jahres 1922 – damals noch Student der Elektrotechnik in Karlsruhe – mit ersten Überlegungen zu einem "Strahlentransformator" (später als *Betatron* bezeichnet) herumschlug, stellte sich auch ihm die Frage nach der richtigen Mechanik. Damals war man sich in Ingenieurskreisen noch nicht ganz sicher, ob die Formeln der Absolut-Theorie von Abraham oder die Formeln der Speziellen Relativitätstheorie von Einstein die richtigen waren. Rückblickend schrieb Wiederöe später: *Deswegen habe ich die Bewegungen der Elektronen im Strahlentransformator zunächst nach beiden Theorien berechnet. Später habe ich dann nur mehr die Formeln von Einstein benutzt, die mir doch besser erschienen.* 38 Ohne es beabsichtigt zu haben, hatte Wideröe mit dem Betatron einen weiteren Experimentalbeweis zugunsten der SRT geliefert. Ohne "Einsteins Formeln" käme es laufend zu Kollisionen der Elektronen mit dem Strahlrohr. Auf der Grundlage der Abrahamschen Theorie würde kein Kreisbeschleuniger richtig funktionieren.

1.3 Ein Paradigmawechsel

1.3.1 Neuformulierung von Raum und Zeit

Einstein und die Akademie Olympia

Nachdem Albert Einstein (1878-1955) am Polytechnikum in Zürich (heute ETH Zürich) sein Diplom als mathematisch-physikalischer Fachlehrer erworben hatte, war er zunächst als Lehrkraft im privaten Umfeld tätig. Schliesslich verhalf ihm Marcel Grossmann (1878-1936) durch Vermittlung seines Vaters zu einer Anstellung beim Amt für Geistiges Eigentum in Bern, wodurch Einstein seine existentiellen Sorgen endgültig los wurde. Als Beamter dritter Klasse begann Einstein 1902 seine neue Tätigkeit, die vorwiegend aus der Begutachtung von Patentanträgen bestand.

In seiner Freizeit befasste sich Einstein – inzwischen mit seiner Studienfreundin Mileva Maric verheiratet und Vater eines Mädchens geworden – mit erkenntnistheoretischen und physikalischen Fragestellungen. Bald einmal bildete sich an der Kramgasse 49 in der Berner Altstadt eine

18

³⁸ P. Waloschek: Als die Teilchen laufen lernten (Vieweg).

illustre Debattiergesellschaft. Die "Akademie Olympia" war geboren. Regelmässige Teilnehmer an den oft stundenlangen Erörterungen waren Maurice Solovine, ein Philosophiestudent, und Conrad Habicht, ein Mathematiker. Später stiess der Ingenieur Michele Besso hinzu, mit welchem Einstein eine lebenslange Freundschaft verbinden sollte. Besso arbeitete seit 1904 ebenfalls im Patentamt.

Nebst anderem lasen und diskutierten die Mitglieder der "Akademie Olympia" die Schriften Machs, darunter "Die Mechanik in ihrer Entwicklung", ferner Poincarés "La Science et l'Hypothèse" oder philosophische Schriften wie bspw. Hume's "Traktat über die menschliche Natur". Besso wurde in jenen Jahren zum wichtigsten Gesprächspartner und war zudem der einzige, den Einstein in seinem Beitrag zur Speziellen Relativitätstheorie dankend erwähnte.

Zur Elektrodynamik bewegter Körper

In Einsteins "Annus mirabilis" (1905) entstanden fünf schriftliche Arbeiten, deren eine sich von besonderer Nachhaltigkeit erweisen sollte.

Zu diesen Schriften zählten:

Am 17. März eine Erklärung des Photoelektrischen Effektes.³⁹

Am 11. Mai eine quantitative Beschreibung der Brownschen Bewegung sowie eine quantentheoretische Erklärung der spezifischen Wärme von Festkörpern.⁴⁰

Am 30. Juni ein grundlegender Artikel zur Relativitätstheorie.

In einem Nachtrag vom 27. September folgt die Schrift *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* mit der wohl bekanntesten Formel der Physik.

Vier der obigen Arbeiten erwähnte Einstein in einem Brief an Conrad Habicht.

Die Initialzündung zur Abfassung der Speziellen Relativitätstheorie erfolgte im Mai 1905 nach einem Gespräch mit Besso. In den darauf folgenden Wochen schrieb Einstein jenen Aufsatz, der am 30. Juni in den "Annalen der Physik" unter dem unscheinbaren Titel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* erschien und die bisher gültigen Vorstellungen von Raum und Zeit für immer umstürzen sollte. Ausser einer kurzen Erwähnung seines Freundes Besso wurden keine weiteren Referenzen genannt.

Einsteins gut durchdachte Arbeit begann mit den prägnanten Worten:

Dass die Elektrodynamik Maxwells – wie dieselbe gegenwärtig aufgefasst zu werden pflegt – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt...

Bis heute ist unklar, wieviel Einstein aus der Lorentzschen Theorie bekannt war. Hingegen wissen wir mit Bestimmtheit, dass er die Bücher von Paul Drude (Lehrbuch der Optik) und August Föppl (Einführung in die Maxwellsche Theorie), in denen die relativistische Problematik in Umrissen

³⁹ A. Einstein: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (Annalen der Physik 17, 132-148).

⁴⁰ A. Einstein: Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen (Annalen der Physik 17, 549-560).

A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Annalen der Physik 17, 891-921).

bereits angesprochen wurde, mit innerem Gewinn studierte.

In Föppls eigener Diktion erkennen wir unschwer die später von Einstein in ähnlicher Formulierung erhobenen Aussagen:

Wir dürfen es nicht a priori als feststehend ansehen, daß es z.B. gleichgültig ist, ob ein Magnet sich in der Nähe eines ruhenden elektrischen Stromkreises oder ob dieser sich bewegt, während der Magnet ruht, falls nur in beiden Fällen die Relativbewegung die gleiche ist.⁴¹

Aufbauend auf nur zwei Postulaten entwickelte Einstein innert sechs Wochen seine bahnbrechende Modifikation von Raum und Zeit. Gewiss ging dieser epochalen Arbeit eine jahrelange Befassung mit den zwischen mechanischen und elektrodynamischen Systemen in Erscheinung tretenden Schwierigkeiten voraus. Rund zehn Jahre lang hatte sich der Physiker mit elementaren Fragen herumgeschlagen, nun folgte deren Auflösung.

Die Kernaussagen (Postulate) der Speziellen Relativitätstheorie lauten:

1. Das Relativitätsprinzip gilt für jedes Galileische Bezugssystem.

2. Die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Inertialsystemen konstant.

Die SRT kann als krönender Abschluss der Maxwellschen Elektrodynamik betrachtet werden. Die SRT ist zudem ein wichtiges Bindeglied zwischen klassischer und moderner Physik. Als Grenzfall für kleine Geschwindigkeiten ist in ihr die Galilei-Transformation enthalten.

Das Spezielle Relativitätsprinzip besagt, daß physikalische Vorgänge – Mechanik und Optik miteinbeziehend – in allen Inertialsystemen in derselben Weise ablaufen. Es ist deshalb durch kein bekanntes klassisches Experiment möglich, eine absolute Geschwindigkeit zu messen. Daher muß auch die quantitative Beschreibung der physikalischen Vorgänge in allen Inertialsystemen von gleichartiger Form sein. Solches entspricht der Kovarianzforderung. Es muss allerdings hinzugefügt werden, dass es heutzutage möglich ist, die Bewegung eines Himmelskörpers in Bezug auf den kosmischen Mikrowellenhintergrund zu beschreiben und damit den Zustand der Ruhe vom Zustand der Bewegung prinzipiell zu unterscheiden (Smoot, 2006). Auch lässt sich eine Rotationsbewegung durch die dann auftretenden Scheinkräfte (Zentrifugalkraft und Corioliskraft) mittels mechanischer oder optischer Experimente vom Zustand der Ruhe unterscheiden. Allerdings handelt es sich dann nicht länger um ein Inertialsystem.

Bereits als Kantonsschüler in Aarau hatte sich der junge Einstein die auf den ersten Blick naiv anmutende Frage gestellt, was wohl geschehen würde, wenn ein Beobachter einem elektromagnetischen Wellenfeld mit Lichtgeschwindigkeit nacheilen würde. Später, als Student am Polytechnikum in Zürich, fiel Einstein desöfteren durch Abwesenheit auf. Statt an den Vorlesungen teilzunehmen, studierte er die "Werke alter Meister". Auch Versuche im physikalischen Labor hatten es ihm angetan, was sich später in den berühmten Gedankenexperimenten niederschlagen sollte.

Einigen Vorlesungen folgte ich mit gespanntem Interesse. Sonst aber "schwänzte" ich viel und studierte zu Hause die Meister der theoretischen Physik mit heiligem Eifer. [...] Mit Eifer und Leidenschaft aber arbeitete ich in Professor H.F. Webers physikalischem Laboratorium. Auch faszinierten

⁴¹ A. Föppl: Einführung in die Maxwellsche Theorie (Bremen University Press, 2014).

mich Professor Geisers Vorlesungen über Infinitesimalgeometrie, die wahre Meisterstücke pädagogischer Kunst waren und mir später beim Ringen um die allgemeine Relativitätstheorie sehr halfen. Sonst aber interessierte mich in den Studienjahren die höhere Mathematik wenig. 42

Bereits frühe machten sich also jene Charakterzüge bemerkbar, die dem sich keiner Konvention verpflichtet fühlenden Denker zu eigen waren und ihn schliesslich zur Speziellen Relativitätstheorie führen sollten. Glücklicherweise besass Einsteins Studienkollege Marcel Grossmann jene Eigenschaften, die Einstein fehlten.

In seinen Erinnerungen hielt Einstein fest:

Er besuchte nicht nur alle für uns in Betracht kommenden Vorlesungen, sondern arbeitete sie auch in so vorzüglicher Weise aus, dass man seine Hefte sehr wohl gedruckt hätte herausgeben können. Zur Vorbereitung auf die Examina lieh er mir diese Hefte, die für mich einen Rettungsanker bedeuteten...⁴³

Etliche Jahre später, als sich Einstein mit der Allgemeinen Relativitätstheorie befasste, bedurfte er nochmals der Hilfe seines einstigen Kommilitonen. Es war Grossmann, der ihn auf die Arbeiten von Riemann, Ricci und Levi-Civita aufmerksam machte und Einstein so den Zugang zur Differentialgeometrie eröffnete.

Riemanns Leistung war die grösste. Er zeigte, wie aus dem Felde der g_{ik} Tensoren der zweiten Differentationsstufe gebildet werden können. Daraus war zu ersehen, wie die Feldgleichungen der Gravitation lauten müssen – falls Invarianz gegenüber der Gruppe aller kontinuierlichen Koordinaten-Transformationen gefordert wird. 44

Spätestens zu diesem Zeitpunkt bedauerte Einstein, dass er sich während seines Studiums nicht intensiver mit den Thesen der höheren Mathematik auseinander gesetzt hatte.

1913 erschien eine gemeinsame Arbeit *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*, zu der Einstein den physikalischen und Grossmann den mathematischen Teil beisteuerte. Es sollte noch bis zum November des Jahres 1915 dauern, bis Einstein in seinem Ringen um Erkenntnis die richtigen Feldgleichungen glückten.

1.3.2 Die berühmteste Formel der Physik

Energie-Masse-Äquivalenz als Spezialfall

Bereits ein paar Jahre vor Einstein hatte der österreichische Physiker Friedrich Hasenöhrl (1874-1915) im Rahmen eigener Untersuchungen zur Hohlraumstrahlung eine Formel gefunden, die der später von Einstein gelieferten Gleichung bereits ziemlich nahe kam.

In seiner Arbeit Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern (1904) entwickelte Hasenöhrl aus dem Strahlungsdruck elektromagnetischer Wellen eine noch fehlerbehaftete Formel, die nach einem Hinweis von Max Abraham berichtigt werden konnte.

$$m = \frac{4}{3} \cdot \frac{h\varepsilon_0}{c^2}$$

Diese Formel entsprach einer bereits früher bekannten Gleichung für die "elektromagnetische Masse" (ein Ausdruck der bereits von Lorentz, Poincaré und Abraham benutzt wurde, heutzutage

⁴² A. Einstein: Erinnerungen (ETH-Bibliothek Zürich).

⁴³ Ebd.

⁴⁴ Ebd.

aber nur noch von historischer Bedeutung ist).

In moderner Notation geschrieben lautet diese Formel:

$$m = \frac{4}{3} \cdot \frac{E_{em}}{c^2}$$

Obige Gleichung besagt in Kürze, dass auch Strahlungsenergie zur Massenbildung eines Körpers beiträgt. Eine Tasse mit heissem Wasser ist demzufolge etwas schwerer, als eine solche mit kaltem Wasser.

Der Physiker und Nobelpreisträger Max Planck (1858-1947) vermerkte später:

Darauf, daß die Hohlraumstrahlung Trägheit besitzt, hat zuerst F. Hasenöhrl aufmerksam gemacht. 45

Anm. d. Verfassers: Es gibt noch immer böse Zungen, die mit der Behauptung schwanger gehen, Einstein habe seine Gleichung von Hasenöhrl "abgekupfert" und sich damit des Plagiats schuldig gemacht. Peter Ripota, langjähriger Mitarbeiter des Magazins PM, bezeichnete Einstein in einem Artikel als den grossen Plagiator. Ein anderer Autor verstieg sich in seinem Büchlein "Ich war Einstein" zur Aussage, die Spezielle Relativitätstheorie sei in Wirklichkeit das Werk des deutschen Mathematikers Ferdinand Lindemann – des "Bezwingers von Pi" – gewesen. Einstein habe dabei lediglich als Strohmann gewisser Kreise gedient. So absonderlich diese Ideen letztlich auch sind, so amüsant ist es zuweilen, zum Zeitvertreib ein solches Buch zu lesen.

Energie-Masse-Äquivalenz als allgemeingültiges Prinzip

Einstein entwickelte seine als $E = mc^2$ bekannt gewordene Gleichung aufgrund relativistischer Überlegungen. Bereits in seiner Arbeit zur *Elektrodynamik bewegter Körper* gab Einstein für die Energie eines bewegten Elektrons eine Gleichung an, die in heutiger Notation wie folgt geschrieben wird:

$$E_{kin} = mc^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

In einem Folgeartikel vom 27. September 1905 präzisierte Einstein den diesbezüglichen Sachverhalt, indem er anhand eines Strahlungsparadoxons bewies, dass auch ruhende Körper durch Aufnahme oder Abgabe von Energie eine Veränderung ihrer Masse erfahren.

In diesem kurzen Artikel ist u.a. zu lesen:

Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/V^2 . Hierbei ist es offenbar unwesentlich, dass die dem Körper entzogene Energie gerade in Energie oder Strahlung übergeht, so dass wir zu der allgemeinen Folgerung geführt werden: Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um L, so ändert sich die Masse in demselben Sinne... Es ist nicht ausgeschlossen, dass bei Körpern, deren Energiegehalt in hohem Maße veränderlich ist (z. B. bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird. 48

 $^{^{45}}$ M. Planck: Acht Vorlesungen über theoretische Physik (1910).

⁴⁶ P. Ripota: Mythen der Wissenschaft. Teil 1: Die Relativitätstheorien. → http://einstein.peter-ripota.de/

⁴⁷ P. Rösch: Ich war Einstein. Die Geheimgeschichte der Relativitätstheorie bis 1914 (Selbstverlag).

⁴⁸ A. Einstein: Ist die Trägheit eines Körpers von dessen Energieinhalt abhängig? (1905).

Anm. d. Verfassers: Der Wahrheitsgehalt der Einsteinschen Energie-Masse-Äquivalenz offenbarte sich der Welt in erschütternder Weise im Spätsommer des Jahres 1945 durch den Abwurf zweier Atombomben auf die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki. Hundertausende von Toten und tausende dahinsiechende Strahlenopfer waren das Resultat dieser provokanten und letztlich völlig unnötigen Handlung. Die Folgen waren dermassen katastrophal, dass sich der wissenschaftliche Leiter des Manhatten-Projektes, Robert Oppenheimer, offen gegen die Machtpolitik der USA aussprach. Diese Haltung führte zu seiner Entfernung aus der Atomenergiekommission und zum Verlust seiner Sicherheitsbescheinigung und einer jahrelangen Observation durch das FBI. Es war die Blütezeit von Joseph McCarthy, einem Senator aus Wisconsin, der in jedem regierungskritischen US-Bürger einen Kommunisten erblickte.

1.4 Minkowski's vierdimensionale Welt

Hermann Minkowski (1864-1909) – einer der hervorragenden Mathematiklehrer am Polytechnikum in Zürich, wo Einstein seinerzeit studiert hatte – erfuhr erst im Jahre 1907 von Einsteins bahnbrechender Arbeit über die Elektrodynamik bewegter Körper. Er beurteilte die Darstellung des Einsteinschen Beitrages als zwar tiefsinnig, mathematisch dagegen als umständlich und formal verbesserungswürdig. Dieser Aufgabe nahm sich Minkowski in der Folge an, um bereits im Dezember desselben Jahres seine Gedanken an einer Sitzung der "Königlichen Gesellschaft der Wissenschaft zu Göttingen" vorzustellen.

Bereits 1904 hatte sich in Göttingen ein Kreis von Mathematikern, darunter Minkowski, Klein und Hilbert, mit ersten Überlegungen zur Elektrodynamik bewegter Körper auseinander gesetzt. Die damit verbundenen Schwierigkeiten waren den Genannten seit Jahren bekannt. Als Konsequenz der von den Göttinger Mathematikern durchgeführten Erörterungen wurde eine nichteuklidische Geometrie ins Auge gefasst, welche nach erfolgtem Siegeszug der Relativitätstheorie als Minkowski-Geometrie bekannt wurde. Im Buch "Die Relativitätstheorie Einsteins" von Max Born, werden die diesbezüglichen Aspekte sehr gut erklärt. Es handelt sich um eine pseudo-euklidische vierdimensionale Geometrie, in der ausser den räumlichen Dimensionen auch der Zeit eine entscheidende Funktion zukommt.

1.4.1 Ein Vortrag erobert die Welt

1908 erfolgte in Köln der berühmte Vortrag von Minkowski über Raum und Zeit, in dem sich der Mathematiker vor versammeltem Plenum der Deutschen Naturforscher und Ärzte über die neue Theorie ausliess und ihr ein solides mathematisches Fundament verschaffte. Obwohl dem Redner ein paar seltsam anmutende Fehler unterliefen, bewirkte dieser Vortrag eine nachhaltige Resonanz unter den Zuhörern. Dazu mag auch die dramatische Sprache beigetragen haben.

Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentellphysikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren...

Im Verlaufe der Ausführungen hiess es u.a.:

Die in einem beliebigen Weltpunkte vorhandene Substanz kann stets bei geeigneter Festsetzung von Raum und Zeit als ruhend aufgefaßt werden.

In formaler Sprache ausgedrückt, besagte dieses Axiom, dass:

...in jedem Weltpunkte stets der Ausdruck c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 positiv ausfällt oder, was damit gleichbedeutend ist, daß jede Geschwindigkeit v stets kleiner als c ausfällt. Es würde danach für alle substantiellen Geschwindigkeiten c als obere Grenze bestehen und hierin eben die tiefere Bedeutung der Größe c liegen.

Bezüglich der Längenkontraktion äusserte sich Minkowski wie folgt:

Nach Lorentz soll jeder Körper, der eine Bewegung besitzt, in Richtung der Bewegung eine Verkürzung erfahren haben... Diese Hypothese klingt äußerst phantastisch. Denn die Kontraktion ist nicht etwa als Folge von Widerständen im Äther zu denken, sondern rein als Geschenk von oben, als Begleitumstand des Umstandes der Bewegung.

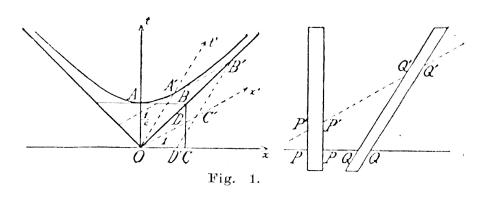


Abb. 1-3Die Hyperbel als Eichgrösse im Minkowski-Diagramm⁴⁹

Im Verlaufe seiner Darlegungen berief sich der Vortragende auf eine geometrische Darstellung der neuen Mechanik (Abb. 1-3), die später in Form sog. *Minkowski-Diagramme* in die wissenschaftliche Literatur einging und noch immer Verwendung findet.

Ausser von Minkowski wurden auch seitens anderer Wissenschaftler relativistische Raum-Zeit-Diagramme entwickelt. Bekannt sind z.B. die *Loedel-Diagramme* und die damit gleichwertigen Diagramme von Robert W. Brehme.⁵⁰

1.4.2 Schlussakkorde zur Speziellen Relativitätstheorie

Minkowskis Kölner-Vortrag wurde 1909 in der "Physikalischen Zeitschrift" veröffentlicht. Das mathematische Gerüst der Speziellen Relativität stand nun voll aufgerichtet und in luzider Klarheit da. Die Einführung einer imaginären Lichtzeit musste Minkowski allerdings mit Poincaré teilen, der bereits früher darauf gestossen war.

Einstein tat sich anfänglich schwer mit dem neuartigen Formalismus und bezeichnete ihn leichtfertig als "überflüssige Gelehrsamkeit". Schliesslich erkannte auch er den Nutzen von Minkowskis Vierer- und Sechservektoren. Ohne diese Weichenstellung hätte er vermutlich die bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie erforderliche Tensorrechnung nicht wirklich verstanden.

⁴⁹ Bildquelle: https://de.wikisource.org/wiki/Raum und Zeit (Minkowski)

 $^{^{50}}$ Relativistische Raum-Zeit-Diagramme \rightarrow http://www.relativity.li

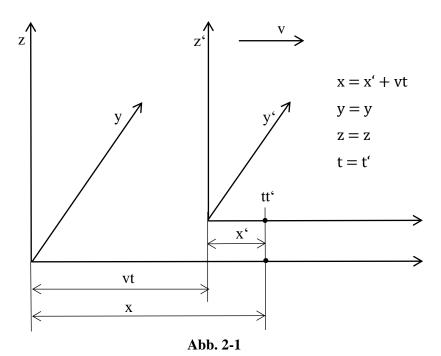
In den nachfolgenden Jahren bewirkten die Arbeiten von Langevin, Laue und Brill eine zunehmende Akzeptanz der SRT in der anfänglich doch noch skeptischen Physikergemeinde. Lorentz, der wichtige Vorarbeiten zur Relativitätsphysik geleistet hatte, war dem jüngeren Einstein von Anfang an wohlwollend gesinnt und anerkannte dessen Verdienste voll an – ohne jedoch den Äther preiszugeben. Seinen grössten Förderer in den ersten Jahren nach 1905 fand Einstein jedoch in Max Planck (1858-1947), der seine anfängliche Begeisterung für das Absolute nun sukzessive auf die Relativitätstheorie übertrug.

Anm. d. Verfassers: Einstein arbeitete seit 1908 bereits an den Grundzügen einer verallgemeinerten Relativität (General relativity), die auch die Gravitation miteinbezog. Die Allgemeine Relativitätstheorie gilt als das eigentliche Meisterwerk des einstigen Beamten dritter Klasse beim schweizerischen Patentamt (heute Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum). Die Akzeptanz dieser Theorie setzte mit dem durch den britischen Astromen Arthur Eddington erbrachten Nachweis der Lichtablenkung am Sonnenrand ein. Angesichts dieser verzögert in Erscheinung tretenden Anerkennung verwundert es nicht, dass Einstein den im Jahre 1922 zugesprochenen Nobelpreis nicht für die Relativitätstheorie, sondern für seine Erklärung des Photoelektrischen Effektes (Lichtquantenhypothese) erhielt. Ältere konservativ eingestellte Physiker wie Philip Lenard konnten mit der Allgemeinen Relativitätstheorie nichts anfangen. Selbst Planck, welcher dazu beigetragen hatte, dass Einstein eine Professur ohne sonstige Verpflichtungen in Berlin bekam, bekundete Mühe mit den neuen Gedanken.

2 Reformulierung von Raum und Zeit

2.1 Herleitung der Transformationsgleichung für x

Gegeben sind zwei Inertialsysteme (Koordinatensysteme) K und K' (Abb. 2-1).



Das Koordinatensytem K' entfernt sich mit der Geschwindigkeit v von K.

Ausgehend von den beiden Formeln für die Galilei-Transformation

$$X = X' + vt'$$
 bzw. $X' = X - vt$

erheben wir den folgenden Ansatz für die Transformationsgleichungen, die bei sehr hohen, d.h "relativistischen" Geschwindigkeiten gültig sein sollen:

$$x = k(x' + vt)$$
 bzw. $x' = k(x - vt)$

Anm. d. Verfassers: Im Unterschied zur *Galilei-Transformation* der klassischen Physik sprechen wir hier von der *Lorentz-Transformation*, die für die relativistische Physik massgebend ist. Gefunden wurde diese Transformation von Hendrik A. Lorentz (1853-1928). In eine mathematisch stringente Form wurde sie von Henri Poincaré (1854-1912) gebracht. Unabhängig von den genannten Wissenschaftlern gelangte Albert Einstein (1879-1955) im Jahre 1905 – seinem annus mirabilis – zu den als Lorentztransformation bezeichneten Gleichungen.

Dieser Ansatz rechtfertigt sich insofern, als einerseits k ein mathematischer Ausdruck sein muss, der sich für kleine Geschwindigkeiten immer mehr an 1 annähert, damit die neu zu findende Transformation in die Galilei-Transformation übergeht, andererseits muss der "Korrekturfaktor" k in beiden Gleichungen derselbe sein, weil es sonst nicht egal wäre, welches der beiden Systeme man mit gestrichenen Koordinaten und welches man mit ungestrichenen Koordinaten versieht.

Um herauszufinden, welches k die beiden Postulateder Speziellen Relativitätstheorie⁵¹ erfüllt, gehen wir davon aus, dass die beiden Koordinatensysteme K und K' zum Zeitpunkt t = t' = 0 mit ihren beiden Koordinatenursprüngen O bzw. O' zusammenfallen. Sendet man nun zu diesem Zeitpunkt ein Lichtsignal in Richtung der x- bzw. x'-Achse aus, so müssen für den Ort des Lichtsignals in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit t bzw. t' die beiden folgenden Gleichungen gelten:

$$x = ct$$
 bzw. $x' = ct'$

Diese beiden Gleichungen entsprechen dem zweiten Einsteinschen Postulat, nämlich dass die Geschwindigkeit des Lichtstrahls in beiden Koordinatensystemen den Wert c ergeben muss.

Setzt man diese beiden Gleichungen in den obigen Ansatz ein, so erhält man das folgende Gleichungssystem:

(1)
$$ct = \gamma(x' + vt') = \gamma(ct' + vt') = \gamma t'(c + v)$$

(2)
$$ct' = \gamma(x - vt) = \gamma(ct - vt) = \gamma t(c - v)$$

Multipliziert man diese beiden Gleichungen miteinander, und dividiert anschließend durch den gemeinsamen Faktor tt', so ergibt sich:

$$c^2tt'=\gamma^2tt'(c^2-v^2)$$

Daraus folgt:

$$\gamma^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Letztlich erhalten wir für den gesuchten Korrekturfaktor:

⁵¹ Relativitätsprinzip und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Um die folgenden Rechnungen übersichtlicher zu gestalten, werden wir diesen Wurzelausdruck anschliessend durch γ ersetzen.

Anstelle des Terms v^2/c^2 schreiben wir β , so dass der Korrekturfaktor folgende Gestalt annimmt:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1-\beta}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta}}$$

Bei geringen Geschwindigkeiten ist $\gamma \approx 1$; bei hohen Geschwindigkeiten strebt γ asymptotisch gegen ∞ .

2.2 Herleitung der Transformationsgleichung für t

Ersetzt man in der soeben erhaltenen Transformationsgleichung für x' = k(x - vt) die Variable x durch den ihr zugeordneten transformierten Term k(x' + vt'), so erhält man die Gleichung:

$$x' = \gamma [\gamma(x' + vt') - vt]$$

Weitere Umformungen ergeben:

$$x' = \gamma^2 x' + \gamma^2 v t' - \gamma v t$$

$$\gamma v t = x'(k^2 - 1) + \gamma^2 v t'$$

$$t = \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma} \cdot \frac{x'}{v} + \gamma t'$$

$$= \gamma \left(\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \cdot \frac{x'}{v} + t' \right)$$

$$= \left[\left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{x'}{v} + t' \right] \operatorname{mit} \frac{1}{\gamma^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

$$= \left[1 - \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{x'}{v} + t' \right]$$

$$t = \gamma \left(t' + \frac{v}{c^2} \cdot x' \right)$$

Die Transformationsgleichung für t' erhält man in adäquater Weise als:

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} \cdot x \right)$$

C.H. Sunier 2015 / 01

2.3 Relativistische Effekte

2.3.1 Die Zeitdilatation

Wir werden nun aus den obigen Transformationsgleichungen den folgenden Schluss ziehen:

Das Zeitintervall für zwei Ereignisse, die man am selben Ort betrachtet, ist immer kleiner als das Zeitintervall für dieselben Ereignisse, die in einem anderen, zu dem ersteren relativ bewegten Inertialsystem, an zwei verschiedenen Orten stattfinden.

Stellen wir uns zunächst zwei Ereignisse vor, die in einem System K' zu zwei verschiedenen Zeitpunkten t_1 ' und t_2 ', aber an einem festen Ort mit derselben Koordinate x_0 ' stattfinden. In einem solchen Fall bezeichnet man die zwischen den beiden Ereignissen liegende Zeitdifferenz als *Eigenzeit* $t_E = t_2$ ' $-t_1$ '.

Betrachtet man nun dieselben Ereignisse aus einem System K, das sich mit der Geschwindigkeit v relativ zu dem System K' bewegt, so gelangt man dort zu dem Schluss, dass diese beiden Ereignisse zu den beiden (im System K gemessenen) Zeitpunkten

$$t_1 = \gamma \left(t_1' + \frac{v}{c^2} \cdot x_0' \right)$$
 bzw. $t_2 = \gamma \left(t_2' + \frac{v}{c^2} \cdot x_0' \right)$

stattgefunden haben.

Die im System K gemessene Zeitdifferenz zwischen den beiden Ereignissen beträgt also:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$= \gamma \left(t_2' + \frac{v}{c^2} \cdot x_0' \right) - \gamma \left(t_1' + \frac{v}{c^2} \cdot x_0' \right) = \gamma (t_2' - t_1') = \gamma \cdot \Delta t_E$$

Das bedeutet, dass das im bewegten System gemessene Zeitintervall gegenüber dem Eigenzeitintervall gedehnt erscheint.

2.3.2 Die Längenkontraktion

Aus den Gleichungen der Lorentz-Transformation lässt sich außerdem der folgende Schluss ziehen:

In jedem Inertialsystem, in dem sich ein Objekt bewegt, ist dessen in Bewegungsrichtung gemessene Länge kürzer als die Ruhelänge, d. h. die gemessene Länge in einem Koordinatensystem, in dem das Objekt ruht bzw. das sich mit dem Objekt mitbewegt.

Wir betrachten als Beispiel einen im System K' ruhenden Stab, dessen beide Enden die x-Koordinaten x_1 ' und x_2 ' haben. Dann ist die Ruhelänge (Eigenlänge) des Stabes wie zu erwarten definiert als:

$$l_E = x_2' - x_1'$$

Die im (relativ zu K' bewegten) System K gemessene Länge des Stabes ist definiert als die Differenz $x_2 - x_1$ der x-Koordinaten der beiden Orte, an denen sich die Enden des Stabes zur selben in K gemessenen Zeit befinden. Also muss man $t_1 = t_2$ setzen und somit die folgenden Transformationsgleichungen anwenden:

$$x_1' = \gamma(x_1 - vt_1)$$
 bzw. $x_2' = \gamma(x_2 - vt_2)$

Und desweiteren:

$$x_2' - x_1' = \gamma(x_2 - vt) - \gamma(x_1 - vt) = \gamma(x_2 - x_1)$$

Daraus folgt:

$$l = x_2 - x_1 = \frac{1}{\gamma}(x_2' - x_1')$$

Also ist:

$$l = rac{1}{\gamma} \cdot l_E = \sqrt{1 - rac{v^2}{c^2}} \cdot l_E$$

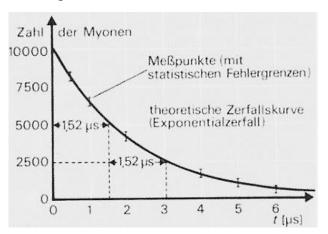
Das bedeutet, dass die Länge des bewegten Stabes von einem ruhenden Beobachter verkürzt wahrgenommen wird. Dieser Aspekt muss z.B. im Beschleunigerbau berücksichtigt werden q.e.d.

2.4 Experimenteller Nachweis der relativistischen Effekte

2.4.1 Zeitdilatation

Myonenversuch im Speicherring

Messungen an Elementarteilchen (Abb. 2-2) belegen die erwartete Zeitdilatation. Freie Myonen zerfallen mit einer Halbwertszeit von 1,52 µs in ein Elektron und zwei Neutrinos. Versuche Am CERN mit Myonen im Speicherring erbrachten den Beweis, dass der Zeitfluss bewegter Objekte verlangsamt wird.



Zahl der Myonen Zerfallskurve von Myonen 10000 7500 5000 Zerfallskurve von ruhenden Myonen 2500 10 20 30 40 50 60 t [µs]

a) Zerfallskurve ruhender Myonen

b) Zerfallskurve beschleunigter Myonen

Abb. 2-2 Versuche mit Myonen im Speicherring⁵²

Bei einer Kreisbahngeschwindigkeit von 99,94 % der Lichtgeschwindigkeit sollte die Halbwertszeit der Myonen im Speicherring auf folgenden Wert ansteigen:

$$\tau(v) = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 29.4 \,\tau = 44.6 \,\mu s$$

Für den Versuch wurde ein Speicherring mit einem Durchmesser von 14 m gebaut, in welchem

⁵² R. Sexl, H.K. Schmid: Raum, Zeit, Relativität (Vieweg).

Myonen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit zirkulierten. Während nach 10 μ s fast alle ruhenden Myonen zerfallen waren, befanden sich noch immer 85 % der bewegten Myonen im Speicherring. Spätere Versuche mit Elementarteilchen im Superprotonensynchrotron des CERN bewirkten einen Lebensdauerfaktor von 400.

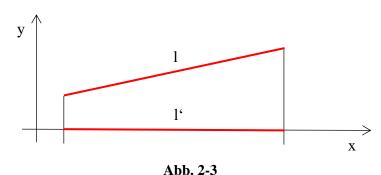
Uhren-Experiment im Flugzeug

Beim *Haefele-Keating-Experiment* (1971) führten die Wissenschaftler Joseph C. Haefele von der Washington University und Richard E. Keating vom U.S. Naval Observatory vier Atomuhren an Bord eines Linienflugzeuges mit sich. Es fanden zwei in entgegengesetzter Richtung in Äquatornähe erfolgende Erdumrundungen statt. Die mitgeführten Uhren zeigten signifikante Abweichungen gegenüber einer am Boden ruhende Kontrolluhr.

Bei diesem Versuch überlagerten sich Effekte der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Eine Wiederholung des Experimentes durch das National Physical Laboratory (1996) mit verbessertem Equipment während eines Fluges von London nach Washington D.C. und zurück bestätigte den Effekt.

2.4.2 Nachweis der Längenkontraktion

Während die mathematische Behandlung der Längenkontraktion keinerlei Probleme bereitet, erweist sich ein experimenteller Nachweis als äusserst schwierig. Im Laufe der Zeit wurde die Kontraktionshypothese daher kontrovers behandelt. Für die einen ist die Kontraktion real, für die anderen nur scheinbar, für dritte das Resultat einer Projektion (Abb. 2-3).



Projektion (Schattenwurf) eines Stabes 1 auf die x-Achse

Für einen Beobachter in K erscheint der Stab in K' verkürzt.

Bei Lewis C. Epstein heisst es:

Schnelle Objekte erscheinen in Bewegungsrichtung verkürzt...⁵³

In gleicher Weise argumentiert Leslie Marder:

Ein bewegter Stab ist kürzer als ein identischer in Ruhe...⁵⁴

James Terell (1959):

Ein bewegter Meterstab verdreht sich scheinbar, eine Verkürzung wurde nicht beobachtet.⁵⁵

⁵³ D. Eckstein: Epstein erklärt Einstein (2009).

⁵⁴ L. Marder: Reisen durch die Raum-Zeit (Vieweg).

⁵⁵ P. Ripota: Mythen der Wissenschaft (BoD).

Dale R. Corson:

Längenkontraktion bedeutet, dass aus einem bewegten Bezugssystem die Länge eines Gegenstandes verkürzt erscheint.⁵⁶

Einstein selbst war sich dieser Problematik vollumfänglich bewusst, als er 1911 in einer Replik auf einen Einwand von Vladimir Varičaks in sibyllischem Stile schrieb:

Die Frage, ob die Lorentz-Verkürzung wirklich besteht oder nicht, ist irreführend. Sie besteht nämlich nicht "wirklich", insofern sie für einen mitbewegten Beobachter nicht existiert; sie besteht aber "wirklich", d. h. in solcher Weise, daß sie prinzipiell durch physikalische Mittel nachgewiesen werden könnte, für einen nicht mitbewegten Beobachter.

Das Heaviside-Ellipsoid

Bereits vor Einstein wurden Überlegungen zur Längenkontraktion eines schnell bewegten Objektes getätigt. Einer, der sich Gedanken darüber machte, hiess Oliver Heaviside (1850-1925). In den Jahren 1888 ff. untersuchte er das Feld bewegter Ladungen, wodurch George Francis FitzGerald (1851-1901) zu seiner Kontraktionshypothese (Fitzgerald-Lorentz-Kontraktion) angeregt wurde.

Ein indirekter Nachweis zugunsten der Kontraktionshypothese wird z.B. mit der Stauchung des elektrischen Feldes einer Punktladung begründet. Demzufolge würde das im Ruhezustand radialsymmetrisches Feld eines elektrisch geladenen Partikels bei relativistischen Geschwindigkeiten zu einem Ellipsoid verformt (Abb. 2-4). Infolge der quer zur Bewegungsrichtung erhöhten Feldstärke müsste das Ionisierungsvermögen des Teilchen signifikant zunehmen, was sich im Experiment verifizieren lässt.

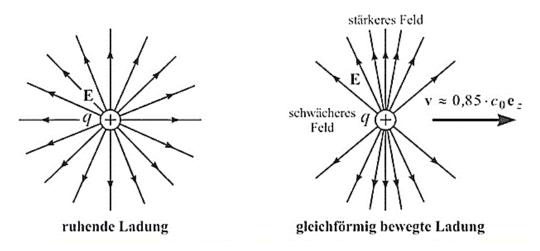


Abb. 2-4 Elektrisches Feld einer Punktladung⁵⁷

Atmosphärische Myonen

Die Längenkontraktion lässt sich auch mit dem atmosphärischen Myonen-Schauer belegen. Myonen, welche aus Reaktionen der Höhenstrahlung mit den Luftmolekülen in etwa 20 bis 30 km Höhe entstehen, bewegen sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit. Sie zerfallen schneller,

⁵⁶ D.R. Corson, P. Lorrain: Elektromagnetische Felder und Wellen (de Gruyter).

⁵⁷ K.W. Kark: Antennen und Strahlungsfelder (Springer). Dieser Effekt war bereits Heaviside bekannt.

als sie Zeit zum Zurücklegen des Weges bis zur Erde haben. Trotzdem wird am Boden ein höherer Anteil von Myonen registriert, als es der Fall sein sollte. Die Begründung dafür lautet, dass aus Sicht des Myons die Distanz bis zur Erde verkürzt ist. Für das Myon ist der Detektor nur 400 Meter entfernt und somit noch innerhalb seiner Reichweite von 600 Metern. Deshalb sei es möglich, dass die Myonen vor ihrem Zerfall die Erde erreichen.

Aus der Beurteilung eines fest mit der Erde verbundenen Beobachters ist es gerade umgekehrt, der mit den Myonen mitbewegte Maßstab verkürzt sich. Dass sich hier Abgründe auftun, liegt auf der Hand und hat zur Kontroverse beigetragen. Bei dieser Deutung entsteht nämlich ein erkenntnistheoretisches Problem, das die SRT wie ein Schatten begleitet. Die Kardinalfrage lautet, was sich hier verkürzt. Ist es lediglich der bewegte Maßstab oder ist es der physikalische Raum mit den in ihm befindlichen Körpern?

2.4.3 Experimenteller Nachweis des Massenzuwachses

Ausser den genannten Effekten der Zeitdilatation und der Längenverkürzung taucht ein weiteres Phänomen auf, das in der Vergangenheit zu kontroversen Deutungen Anlass gab. Es geht um die relativistische Massenzunahme, die von einigen als real und von anderen als nur scheinbar behandelt wird. In der älteren Fachliteratur begegnet dem Leser meist der reale Massenzuwachs. Einige sprechen hier von der dynamischen Masse. In der neueren Literatur wird dieser Effekt mittels der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung begründet.

$$E^2 = m^2 c^4 + (pc)^2$$

Dieser Aspekt muss im Kreisbeschleuniger (Zyklotron, Synchrotron) berücksichtigt werden, um die Teilchen mit anwachsender Geschwindigkeit auf dem Sollkreis führen zu können.

Versuch von Bertozzi

Beim *Versuch von Bertozzi* (1964) wurde experimentell nachgewiesen, dass relativistisch bewegte Teilchen bei Kollisionen erheblich mehr Energie übertragen, als sie es nach klassischer Vorstellung eigentlich tun dürften (Abb. 2-5).

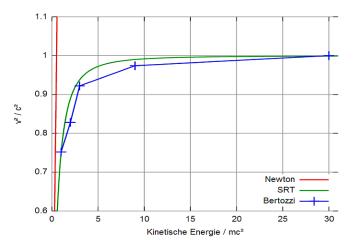
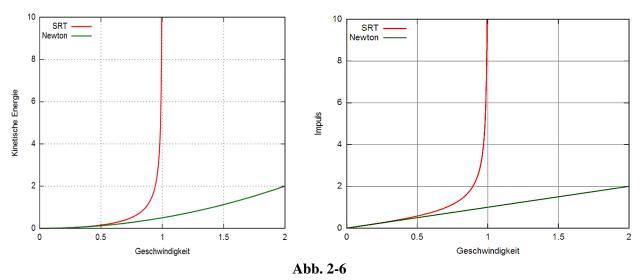


Abb. 2-5 Energiezunahme beschleunigter Massen⁵⁸

⁵⁸ Bildquelle: Wikipedia

Bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit steigt der Teilchenimpuls übermässig an, so dass zur weiteren Beschleunigung unendlich viel Energie nötig wäre. Die Lichtgeschwindigkeit stellt damit eine obere Grenzgeschwindigkeit für ponderable Körper dar (Abb. 2-6).



Relativistischer Zuwachs von Energie und Impuls bei beschleunigten Teilchen⁵⁹

William Bertozzi benutzte für sein Experiment (Abb. 2-7) den Elektronenbeschleuniger des MIT.⁶⁰

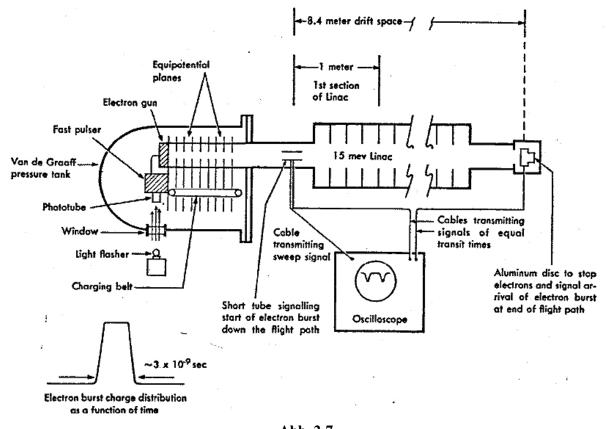


Abb. 2-7 Versuch von Bertozzi⁶¹

⁵⁹ Ebenda

⁶⁰ MIT = Massachusetts Institute of Technology.

⁶¹ William Bertozzi: Speed and Kinetic Energy of Relativistic Electrons (1964).

Die Elektronen wurden in fünf Durchgängen mit einem Van-de-Graaff-Beschleuniger auf Energien zwischen 0,5 bis 15 MeV gebracht, bevor sie nach dem Durchlaufen eines 8,4 m langen Driftraumes auf eine Aluminiumscheibe trafen, wo ihre Energie kalometrisch bestimmt wurde. Die Flugzeit wurde elektronisch mit einem Oszilloskop gemessen.

Das Experiment erbrachte eine enge Übereinstimmung mit den Voraussagen der SRT. In modernen Teilchenbeschleunigern bestätigen sich diese Erwartungen routinemässig bei Hochenergie-Experimenten. Heutzutage bezweifeln nur noch unverbesserliche Ignoranten diesen Sachverhalt.

3 Interpretationsfragen der Relativitätsphysik

Obwohl Einstein im Jahre 1905 mit seiner bahnbrechenden Arbeit "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" den Äther als entbehrlich deklarierte, haben andere daraus den falschen Schluss gezogen, Einstein habe den Äther de facto abgeschafft. So wird es in der Literatur vielfach und meist gedankenlos kolportiert. Dass dem nicht so ist, haben wir bereits früher gesehen. Anlässlich seiner Rede an der Universität Leyden (1920) sprach Einstein explizit von einem Äther der Allgemeinen Relativitätstheorie, der sich aber vom Lorentzschen Äther radikal unterschied und mit dem metrischen Feld des Kontinuums assozierbar war. Selbst im Zuge der sich damals etablierenden Quantenphysik dachten einige – unter ihnen kein Geringerer als Paul Dirac – erneut an einen Äther.

Die Dirac'sche Vorstellung eines virtuellen Quantenmeeres aufgreifend, haben wir das quantenphysikalische Vakuum mit dem lange vergeblich gesuchten Äther identifiziert. Der eigentliche Grund, weshalb wir uns in einer Arbeit über die Spezielle Relativitätstheorie mit dem Quantenvakuum befassen, besteht darin, dass die relativistischen Effekte eng mit der Struktur des Vakuums verbunden sind. Das geht z.B. aus Anwendungen der Sine-Gordon-Gleichung hervor – wie bei Prof. Günther nachzulesen ist. 62 Aus heutiger Sicht ist evident, dass ein mit den Gesetzen der Quantenelektrodynamik (QED) beschreibbarer Äther nicht mittels klassischer Experimente nachgewiesen werden kann. Das erklärt u.a. den negativen Ausgang der Michelson-Experimente.

Substituiert man den vorbelasteten Ätherbegriff durch ein kosmologisches Skalarfeld, so vermag sich auch der moderne Physiker damit anzufreunden. Damit wird das Vakuum – ganz im Sinne Einsteins notabene – zum Substrat der elektromagnetischen als auch gravitativen Erscheinungen. So wie die Luft für den Schall ist das Vakuum für die Ausbreitung von elektromagnetischen und gravitativen Wellen erforderlich.

3.1 Gittermodelle, Superfluide und Skalarfelder

3.1.1 Die Dirac-Hypothese

Schreibt man die Energie-Masse-Äquivalenz in quadrierter Form als $E^2 = m^2c^4$ und zieht daraus die Quadratwurzel, so ergeben sich zwei Lösungen von denen eine negativ ist. Im Allgemeinen betrachtet die Schulphysik die negative Lösung als unzulässig. Anders Paul A. M. Dirac (1902-1984), der auch die negative Lösung in Betracht zog und damit die Löchertheorie begründete.

⁶² H. Günther: Grenzgeschwindigkeiten und ihre Paradoxa; Teubner-Texte zur Physik Bd. 31 (Teubner).

Seine Schlussfolgerung lautete, dass das Vakuum im Zustand niedrigster Energie mit einem See von Teilchen vergleichbar ist, welche sich in den als Löcher bezeichneten (negativen) Energiesenken befinden (siehe Rebhan, Theoretische Physik II). Leider hafteten Dircas kühner Hypothese gewisse Schwächen an, so dass die Physikergemeinde in ambivalenter Haltung verblieb. Wenig später (1932) entdeckte Anderson in der kosmischen Höhenstrahlung ein Teilchen, das als Antiteilchen des Elektrons erkannt und später als *Positron* bezeichnet wurde.

Die Dirac'sche Hypothese modifizierend gingen wir von masselosen Teilchen aus, die als ge-bundene Elektron-Positron-Paare das quantenphysikalische Vakuum bilden. Dieses Vakuum ist in der Tat mit einem See virtueller Teilchen vergleichbar. In dieser Hinsicht hatte Dirac folglich nicht Unrecht. Um dem Vakuum ein virtuelles Teilchenpaar zu entreissen, ist ein Energiebetrag ΔΕ erforderlich, der dem Äquivalent der doppelten Ruhmasse des Elektrons entspricht. Gammaquanten mit einer Energie grösser als 1 MeV besitzen die dafür erforderlichen Voraussetzungen. In solchem Fall kommt es bei geeigneten Randbedingungen zur Paarerzeugung. Das Photon verschwindet und scheinbar aus dem Nichts erscheint ein Elektron-Positron-Paar. Das mag den Physikern der alten Schule äusserst bizarr vorgekommen sein. Auch der umgekehrte Vorgang, die sog. Paarvernichtung oder *Annihilation*, ist aus dieser Perspektive nichts Ungewöhnliches.

Aus der Zerstrahlung von Elektron und Positron geht ein Gammaquant hervor mit der Energie:

$$E = hv \ge 2 \cdot m_{0e} \cdot c^2$$

Bereits in der Quantenmechanik (die noch nicht eine Feldtheorie im modernen Sinne ist) lässt sich zeigen, dass die Energie eines harmonischen Oszillators im Grundzustand die minimale Energie ist, die im Schatten der Heisenbergschen Unschärfe gerade noch erlaubt ist. Dies bedeutet auch, dass das Vakuum selbst am absoluten Nullpunkt nicht energielos sein kann. Von irgendwoher muss die Energie aber kommen. Unsere Meinung ist die, dass das Vakuum infolge kurzzeitiger Energieflüsse zwischen virtuellen Teilchen und realer Welt oszilliert. Einige sprechen hier von *Vakuumfluktuationen*. Die kosmische Hintergrundstrahlung wird aus dieser Sicht nicht als Relikt des Urknalls, sondern als Manifestation stochastischer Oszillationen der virtuellen Elektron-Positron-Paare verstanden.

Anm. d. Verfassers: Der niederländische Physiker Hendrik Casimir erörterte 1948 in einem Gedankenexperiment einen quantenphysikalischen Effekt, der sich als Druck zwischen planparallelen elektrisch leitenden Platten manifestieren sollte. Casimir ging davon aus, dass den virtuellen Teilchen eine De-Broglie-Wellenlänge $\lambda = h/p$ zugeordnet werden kann. Ausserhalb der Platten ist ein kontinuierliches Spektrum von Wellenlängen denkbar. Im Bereich zwischen den Platten, deren Abstand ein Vielfaches von $\lambda/2$ betragen muss, sind nur bestimmte Wellenlängen möglich. Daraus resultiert der Druck der virtuellen Teilchen auf das Plattenpaar. Zu beachten ist, dass dieser Effekt im Grenzfall dünner Medien als Van-der-Waals-Kraft zwischen den Atomen der leitenden Flächen verstanden werden kann.

Erste Nachweise des Casimir-Effektes erfolgten 1956 durch die sowjetischen Wissenschaftler Derjaguin, Abrikosowa und Lifschitz und 1958 durch Sparnaay (welcher wie zuvor schon Casimir für die Philips Research Laboratories in Eindhoven arbeitete). Die bisher präzisesten Messungen gelangen Lamoreaux (Seattle, 1997) sowie Mohideen und Roy (Riverside, 1998).

Auch eine Abstossung der Platten – als *reverser Casimir-Effekt* und gelegentlich als "Quanten-Levitation" bezeichnet – soll bei bestimmten Randbedingungen möglich sein. Es verwundert folglich nicht,

dass Effekte dieser Art Aufnahme ins *Breakthrough Propulsion Physics Project* der NASA fanden und auch von der DARPA auf mögliche Anwendungen im militärischen Bereich untersucht wurden.

Die Vakuumenergie gilt ferner als möglicher Kandidat für die dunkle Energie, welche in der Kosmologie als Ursache für die Expansion des Universums in Betracht gezogen wird. Ein noch ungelöstes Problem ist die grosse Diskrepanz zwischen den theoretisch vorausgesagten und den auf experimentellem Wege gefunden Werten. Aufgrund empirischer Befunde wird die Energiedichte des Vakuums auf einen Wert zwischen 10^{-9} bis 10^{-11} J/m³ geschätzt. Sie ist damit um den Faktor 10^{120} niedriger als theoretisch erwartet. Ob eine Korrektur nach oben nötig ist, muss sich erst noch zeigen.

3.1.2 Gittermodelle des Vakuums

Das EPOLA-Modell

Einer Theorie von Prof. Menahem Simhony zufolge wird der physikalische Raum durch ein aus Elektronen und Positronen aufgebautes Kristallsystem verkörpert. Simhony orientierte sich dazu am Ionengitter des Kochsalzkristalls. Wirklich zufrieden war der Schreibende damit nicht; dennoch lieferte dieses Modell erste Ansätze zum Verständnis des physikalischen Vakuums. Den Vorstellungen des Schreibenden bereits erheblich näher erwies sich ein Beitrag von Emil Falkner, in welchem der Äther mit einem aus Elektron-Positron-Paaren besetzten Vakuum verglichen wurde. Leider gelang es uns nicht, mit Falkner in näheren Kontakt zu treten.

Ein relativistisches Gittermodell

Der Physiker Helmut Günther begründet die relativistischen Effekte von Längenkontraktion und Zeitdilatation mittels der *sine-Gordon-*Gleichung. Günther entwickelte im Verlaufe seiner Studien ein relativistisches Gittermodell, das den Lorentzäther durch eine diskrete Raumzeitstruktur ersetzt.⁶³ Relativ zum Gitter bewegte Maßstäbe verkürzen sich in Bewegungsrichtung und relativ dazu bewegte Oszillatoren (Zeitnormale) schwingen langsamer. Die Ursache der relativistischen Effekte ist folglich nicht in ominösen Kraftwirkungen, sondern in der Relativbewegung zwischen massiven Körpern und gequanteltem Raum zu suchen. Bezüglich der Lichtausbreitung sagt uns dieses Modell, dass sich Photonen im Vakuum ähnlich wie Phononen in einem Kristall verhalten. Phononen sind quantisierte Gitterschwingungen, die als wellenförmige Erregung durch einen Festkörper laufen. Photonen manifestieren sich in der Analogie als Gitterschwingungen eines Strukturraumes.

Das Superfluidmodell

Nach Meinung einiger Physiker lässt sich das Quantenvakuum mit einem Superfluid (gelegentlich ist auch von einem Suprafluid die Rede) vergleichen. In einem Superfluid mit quasikristallinen Eigenschaften muss es longitudinale und transversale Gitterschwingungen geben. Auf das strukturierte Vakuum angewandt kommen für longitudinale Schwingungen möglicherweise Neutrinos in Frage. Für transversale Schwingungen sind es Photonen. Im Teilchenbild verhalten sich beide Entitäten wie Partikel, die Impuls und Energie durch den Raum tragen ohne selbst massiv zu sein.

⁶³ H. Günther: Spezielle Relativitätstheorie – Ein neuer Einstieg in Einsteins Welt (Teubner).

Unserem bisherigen Ansatz folgend besteht das physikalische Vakuum aus ladungskompensierten Elektron-Positron-Paaren, welche aufgrund ihrer besonderen Bindung ein kohärentes Quantenfeld erzeugen. Ähnlich wie Cooper-Paare in der Festkörperphysik, nur eben masselos, bilden diese virtuellen Paare im Vakuumgrundzustand ein oszillierendes Skalarfeld, das sich grossräumig durch den Raum erstreckt. Letztlich ist es dieses primordiale Feld, welches dem Raum seine Existenz ermöglicht, d.h. ohne das quantenphysikalische Vakuum gäbe es auch keinen Raum.

3.2 Dynamische oder kinematische Interpretation der SRT

In Bezug auf die Spezielle Relativitätstheorie unterscheidet der Physiker Jürgen Brandes zwischen der Einsteinschen und der (neo)-lorentzianischen Interpretation.⁶⁴ Gelegentlich ist auch von dynamischer Interpretation (Lorentz) und kinematischer Interpretation (Einstein) die Rede. Der Unterschied zwischen den beiden Interpretationen besteht nicht im mathematischen Formalismus, sondern in den physikalischen Aspekten und in den Anwendungen der Theorie. Im Fokus diesbezüglicher Betrachtungen stehen insbesondere Längenkontraktion und Zeitdilatation.

Gemeinsam bei Lorentz und Einstein ist die Konstanz der (Vakuum)-Lichtgeschwindigkeit unter Voraussetzung von Isotropie und Homogenität des Kontinuums. Wie bei Wasserwellen in einem ansonsten ruhigen See ist auch beim Licht die Ausbreitungsgeschwindigkeit unabhängig von der Bewegung der Quelle. Beim Wasser ist dies eine triviale Angelegenheit, weil sich eine in stehendem Gewässer (z.B. durch einen geworfenen Stein) ausgelöste Wasserwelle stets mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die unabhängig von der Geschwindigkeit des Steins ist. Zwischen Wasserwellen und elektromagnetischen Erscheinungen besteht trotzdem ein signifikanter Unterschied. Bewegt sich nämlich der Beobachter, indem er z.B. in einem Boot durch den See fährt, so verändert sich augenscheinlich die Relativgeschwindigkeit zwischen ihm und der Wellenfront. Beim Licht aber ist es anders als zunächst erwartet. Auch ein bewegter Beobachter misst stets dieselbe Lichtgeschwindigkeit. Ob sich der Beobachter in einem Haus oder in einem fahrenden Zug befindet spielt keine Rolle. Stets wird sich ihm die c-Konstanz aus Neue bestätigen.

Die Unterschiede zwischen Einstein und Lorentz sind vielmehr folgende:

Bei Lorentz breitet sich das Licht im ruhenden Äther aus, bei Einstein dagegen wird kein Lichtäther benötigt (die elektromagnetische Welle ist selbstreferentiell).

Sind es bei Lorentz elektrische Felder und ponderable Körper, die der Kontraktion unterworfen sind, so kontrahiert bei Einstein der involvierte Raum mit den darin befindlichen Gegenständen; daraus resultiert eine neuartige Raum-Zeit-Lehre.

Nach Lorentz führt die Längenkontraktion zu einer realen Verkürzung des bewegten Maßstabes, verbunden mit der Einführung einer lokalen Zeitskala. Lorentz spricht von einer Kraft, die der Äther auf ein Volumenelement eines Elektrons ausübt.

⁶⁴ J. Brandes: Die Einstein'sche und lorentzianische Interpretation der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie (VRI). Die Gedanken von Brandes et al bestärken das von Lorentz und Poincaré entwickelte Relativitätsprinzip; dazu tragen auch die Konzepte von Günther, Unzicker und Smoot bei.

Nach Einstein existiert eine durchgehende Symmetrie zwischen den Inertialsystemen. Jeder Beobachter (ob ruhend oder bewegt spielt im Grunde keine Rolle) sieht die Uhr des anderen verlangsamt. Gleiches gilt sinngemäss für Maßstäbe. Jeder sieht den Maßstab des anderen verkürzt. Einstein zufolge ist die Kontraktion eine Folge der Relativität der Gleichzeitigkeit.

Zwischen beiden Effekten (Zeitdilation und Längenkontraktion) besteht objektiv ein gewichtiger Unterschied. Während sich der bewegte Maßstab nach seiner Translation auf die ursprüngliche Länge "zurückstreckt" und somit kein erkennbarer Unterschied zwischen beiden Maßstäben besteht, trifft dies für Uhren nicht zu. Weil die bewegte Uhr real langsamer geht, ensteht zwischen den zuvor synchronisierten Uhren eine Zeitdifferenz, die selbst nach der Translation erhalten bleibt. Schlussendlich stehen die Zeiger der Uhren nicht länger an derselben Stelle! Dieses Faktum wird durch die Experimente mit relativistisch bewegten Myonen erhärtet, wo die Verlangsamung des Zeitflusses evident ist. Ansonsten könnten atmosphärische Myonen⁶⁵ die Erdoberfläche nicht erreichen und im Speicherring auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigte Myonen würden schneller zerfallen.

Mit anderen Worten: Obwohl der Einsteinschen Logik zufolge stets die Uhr im anderen Inertialsystem nachgeht, ist dies in realiter nicht so. Real geht immer die bewegte Uhr langsamer. Offensichtlich wird durch die Zeitdilation die Symmetrie zwischen Inertialsystemen gebrochen und damit das Einsteinsche Relativitätsprinzip in seiner Wirksamkeit eingeschränkt.

Welche von den beiden Interpretationen einer bevorzugt, ist vermutlich vom persönlichen Weltbild abhängig. Der mathematische Formalismus ist in beiden Fällen derselbe. Ungeachtet operationeller Vorzüge des Einsteinschen Modells verbleiben wir weiterhin bei einem Relativitätsprinzip, das die Auszeichnung eines Fundamentalsystems zulässt – so wie dies auch in der physikalischen Praxis meist der Fall ist. Die relativistischen Effekte erfahren erst bei Auszeichnung eines fundamentalen Bezugssystems – ungeachtet gegenteiliger Meinungen – eine innere Glaubwürdigkeit.

3.3 Falsifizierung der Theorie durch das Experiment

3.3.1 Die stellare Aberration

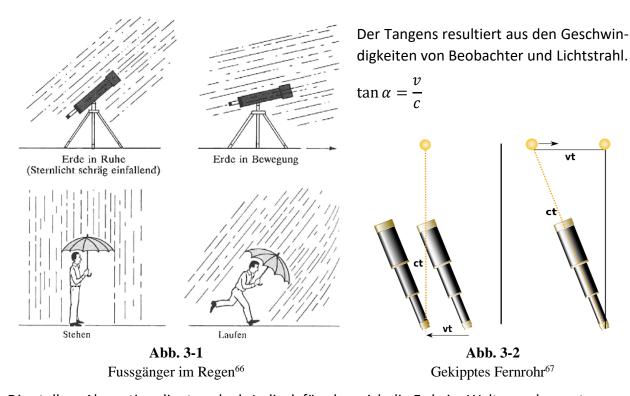
Obwohl sich die Naturwissenschaftler vor Einstein darin einig waren, dass ein Äther existiert, wusste man nicht, ob dieser in sich ruht, von der Erde mitgeführt oder nur teilweise mitgeführt wird. Ein das Universum ausfüllender und im Raum ruhender Äther ersetzte in gewissem Sinne den absoluten Raum von Newton, ergänzt nun durch bestimmte Eigenschaften.

Ein mitgeführter Äther musste bei interferometrischen Experimenten stets zu einem Nullresultat führen – was im Übereinklang mit den Versuchen von Michelson stand. Gegen eine Mitführung sprach lediglich die von Bradley (1725) entdeckte stellare Aberration; ungeachtet dessen erlaubte der von Fresnel gefundene Mitführungskoeffizient eine teilweise Mitführung resp. Korreption – ohne damit der Aberration zu widersprechen.

 $^{^{65}}$ Versuch von Rossi und Hall (1940). Atmosphärische Myonen entstehen in ca. 20 km Höhe und haben eine Lebensdauer von \approx 2,2 Mikrosekunden. Nach klassischem Verständnis könnten diese Teilchen leidiglich 600 m zurücklegen, bevor sie zerfallen. Trotzdem kommen in unseren Breiten im Mittel 200 Myonen pro Quadratmeter und Sekunde am Erdboden an.

Stokes dagegen postulierte eine vollständige Mitnahme des Äthers durch die Erde mit einer langsamen Abnahme gegen den umgebenden Weltraum. Das Problem dabei war, dass bei vollständiger Mitführung keine Aberration zu erwarten war. Mit Hilfe der Ortszeit und der Konzeption der "korrespondierenden Zustände" vermochte auch Lorentz die Aberration zu erklären – ohne dafür eine teilweise Mitführung des Äthers (im Sinne Fresnels) annehmen zu müssen.

Die stellare Aberration lässt sich mit einem Fussgänger vergleichen, welcher durch den Regen läuft. Der Regen kommt nicht länger senkrecht, sondern schräg auf ihn zu. Der Regenschirm muss aus diesem Grunde in einem bestimmten Winkel gehalten werden, um trockenen Fusses zu bleiben (Abb. 3-1). Dasselbe Phänomen tritt bei Sternenlicht auf. Um den Stern im Okular zu sehen, muss ein Teleskop um einen bestimmten Winkel gegen die Einfallsrichtung des Strahls gekippt werden (Abb. 3-2).



Die stellare Aberration dient auch als Indiz dafür, dass sich die Erde im Weltraum bewegt.

3.3.2 Der Versuch von Fizeau

Einsteins eigenen Angaben zufolge war das Experiment von Fizeau mit Licht in fliessendem Wasser (Abb. 3-3) entscheidend für das Zustandekommen der SRT und nicht etwa der Michelson-Morley-Versuch wie auf den ersten Blick anzunehmen wäre.

Dieses Experiment wurde 1851 von Hippolyte Fizeau (1819-1896) durchgeführt mit der Absicht, die Lichtgeschwindigkeit in bewegtem Wasser zu messen. Dabei sollte eine Voraussage Fresnels überprüft werden, wonach ein bewegtes und dispersives Medium zu einer Veränderung der Lichtgeschwindigkeit beitragen sollte.

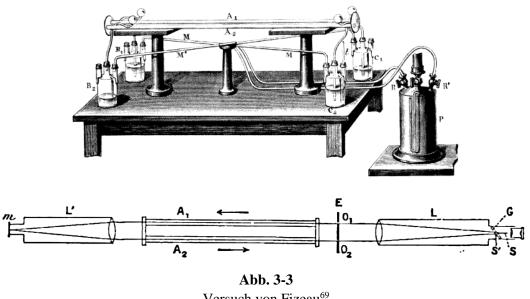
⁶⁶ B. Hoffmann: Einsteins Ideen (Spektrum).

⁶⁷ Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Aberration_(Astronomie)

Fresnel selbst ging davon aus, dass der hypothetische Lichtäther von bewegter Materie nur teilweise mitgeführt wurde.

He continued to say the experimental results which had influenced him most were the observations of stellar aberration and Fizeau's measurements on the speed of light in moving water. 'They were enough,' he said.⁶⁸

Die Versuche von Michelson will Einstein nicht gekannt haben, als er seine Arbeit Zur Elektrodynamik bewegter Körper bei den Annalen der Physik einreichte. Ob er die Schriften von Lorentz gelesen hat, ist ebenfalls unklar. Zumindest Poincaré's Erörterungen über Raum und Zeit hat er gekannt.



Versuch von Fizeau⁶⁹

Ein von der Quelle S ausgesandter Lichtstrahl wird von der Glasplatte G reflektiert und durch eine Sammellinse in L auf eine Platte geworfen. Nach Durchquerung der Schlitze O₁ und O₂ entstehen zwei parallele Lichtstrahlen, welche die von Wasser durchströmten Kanäle A1 und A2 durcheilen. Der Spiegel m am Fokus der Linse in L' reflektiert die ankommenden Strahlen, so dass sich ein Strahl in Richtung des fliessenden Wassers und der andere entgegengesetzt zur Strömung ausbreitet. Nachdem jeder Strahl den Weg zweimal durcheilt hat, werden die beiden Strahlen bei S' vereinigt, wo sie Interferenzstreifen erzeugen.

Die Lichtgeschwindigkeit im ruhenden Medium ist durch den Brechungsindex c/n gegeben. Im bewegten Medium beträgt die Lichtgeschwindigkeit nach Fresnel:

$$c' = \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

 $1 - \frac{1}{n^2}$ ist der Fresnelsche Mitführungskoeefizient

Später erweiterte Lorentz obige Formel durch Hinzufügung eines Terms für die Dispersion. Das Experiment verlief insofern erfolgreich, als dass der Fresnelsche Mitführungskoeffizient bestä-

⁶⁸ R. S. Shankland: Conversations with Albert Einstein (American Journal of Physics. 31, Nr. 1, 1963).

⁶⁹ Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Tests_der_speziellen_Relativit%C3%A4tstheorie

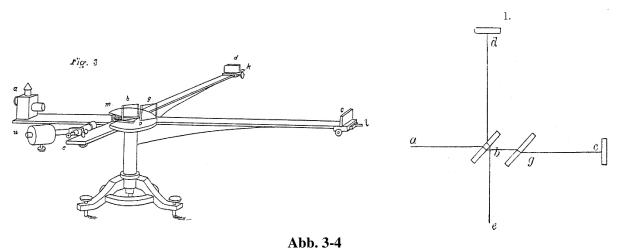
tigt wurde. Solange sich das Wasser in Ruhe befand, entstand – wie zu erwarten – keine Streifenverschiebung. Durchströmte das Wasser jedoch die beiden Kanäle, so kam es in Übereinstimmung mit der Fresnelschen Voraussage zu einer Verschiebung von ≈ 0,40.

Ein vergleichbares und mit erhöhter Präzission durchgeführtes Experiment von Michelson und Morley (1886) ergab denselben Befund. Infolge der unterschiedlichen Lichtlaufzeiten resultierte eine Streifenverschiebung, die in guter Übereinstimmung mit dem Fresnelschen Mitführungskoeffizienten stand. Der von Lorentz eingeführte Dispersionsterm konnte von Zeeman (1914) verifiziert werden.

Moderne Versuche mit Ringlasern bestätigten aufs Neue die früheren Ergebnisse.

3.3.3 Die Versuche von Michelson

1881 führte der aus Strelno in Posen stammende Physiker Abraham Michelson (1852-1931) erste Versuche mit einem Interferometer (Abb. 3-4) durch.⁷⁰ Der Apparat erwies sich empfänglich für Erschütterungen, so dass die Versuche unbefriedigend endeten.



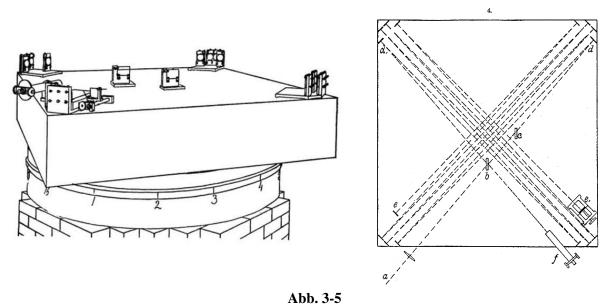
Michelson-Interferometer (1881); die Versuche erfolgten in Potsdam.⁷¹

Zurück in Amerika konstruierte Michelson während seiner Zeit an der *Chase School of Applied Science* (Cleveland) eine verbesserte Apparatur (Abb. 3-5). Unterstützt durch den Chemiker Edward W. Morley (1838-1923) wurden 1887 zahlreiche Versuche durchgeführt. Eigentliches Ziel war der Nachweis des durch die Erdbewegung hervorgerufenen "Ätherwindes". Existierte ein Äther, so war die Signalgeschwindigkeit einer Lichtwelle vom Bewegungszustand eines Beobachters abhängig. Zu ihrem Erstaunen fanden die Experimentatoren aber nur eine geringe Verschiebung der Interferenzstreifen. Es gab anscheinend keinen Ätherwind!

Ungeachtet dieses "Nullresultates" führte Michelson seine Versuche mit verbesserten Apparaturen bis ins hohe Alter durch. 1920 begann Michelson mit der Planung einer 22 km langen Meßstrecke zwischen dem Mount-Wilson-Obervatorium und Lookout Mountain. 1930 begann die Zusammenarbeit mit Pease und Pearson in Pasadena mit Messungen in einem sich über eine Meile erstreckenden Vakuumrohr.

⁷⁰ A. Michelson: The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether (The American Journal of Science, 1881).

⁷¹ Bildquelle: https://en.wikisource.org/wiki/On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether



Verbessertes Michelson-Interferometer (1887); die Versuche fanden in Cleveland statt.⁷²

Obwohl Michelson zeitlebens kein eigentlicher Nachweis des Lichtäthers gelang, blieb er seiner Überzeugung treu.

3.3.4 Die Versuche von Miller

Ein zweiter Experimentator, der sich mit unermüdlichem Eifer ans Interferometer setzte, war der mit Morley befreundete Dayton C. Miller (1866-1941).⁷³

Miller führte zunächst in Cleveland und später auf dem Mount Wilson über 200'000 Messungen mit von Null verschiedenen Resultaten durch. Dazu benutzte er ein verbessertes Michelson-Interferomter mit einem Lichtweg von 64 Metern. Die Driftgeschwindigkeit unterlag täglichen und jährlichen Schwankungen und betrug im Mittel etwa 10 km/s.

Shankland⁷⁴ versuchte später, die Drift auf Temperaturschwankungen zurückzuführen. Einstein, der die Versuche aufmerksam verfolgte, verblieb in ambivalenter Haltung. Später soll er gesagt haben: "Es hat sich ausgemillert..." Ungeachtet der ablehnenden Haltung des Establishments belegen die Millerschen Versuche die Richtungsabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit. Anscheinend gab es doch einen Äther.

3.3.5 Kennedy-Thorndike-Experiment

Im Kern ging es beim Kennedy-Thorndike-Experiment⁷⁵ (1932) um den Nachweis, ob nebst der Längenkontraktion auch die Zeitdilatation einen Einfluss auf das Ergebnis ausübte. Dazu wurde ein modifiziertes Michelson-Interferometer (Abb. 3-6) mit unterschiedlich langen Lichtwegen verwendet (einer der beiden Arme war um 16 cm kürzer). Im Unterschied zu den Michelson-Versuchen wurde das Interferometer nicht gedreht. Aufgrund der Richtungsänderung der Erde bei

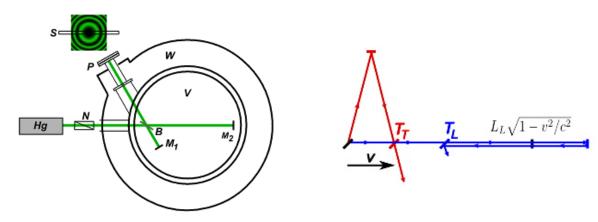
⁷² Bildquelle: https://en.wikisource.org/wiki/On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether ⁷³ D.C. Miller: The Ether-Drift Experiments at Mount Wilson (Proceedings of the National Academy of Sciences, 1925).

⁷⁴ R.S. Shankland et al.: New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller (Reviews of Modern Physics, 1955).

⁷⁵ R.J. Kennedy, E.M. Thorndike: Experimental Establishment of the Relativity of Time (Physical Review, 1932).

ihrem Umlauf um die Sonne erübrigte sich eine Drehung. Infolge der Längenkontraktion war bei mehrmonatiger Beobachtung eine Veränderung des Interferenzmusters zu erwarten. Bei Beteiligung der Zeitdilatation (und der damit einhergehenden Frequenzänderung) sollte die Verschiebung jedoch ausbleiben.

In Übereinstimmung mit der SRT lieferte der Apparat ein "Nullresultat". Das Experiment zeigte damit anschaulich, dass die Kontraktionshypothese allein nicht ausreicht, um das "Nullresultat" der Michelson-Versuche zu erklären. Fazit: Die Längenkontraktion wird stets von der Zeitdilatation begleitet. Beide Effekte sind untrennbar miteinander verbunden.

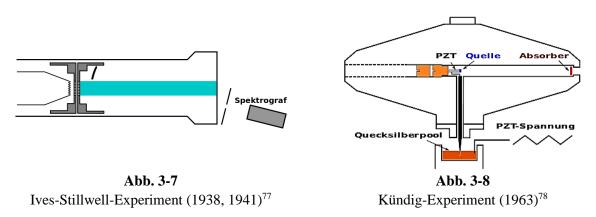


- a) Moderne Experimente verwenden anstelle des klassischen Aufbaus optische Resonatoren.
- b) Einfluss der Längenkontraktion auf den Lichtweg.

Abb. 3-6Kennedy-Thorndike-Experiment (1932) mit unterschiedlich langen Lichtwegen⁷⁶

3.3.6 Ives-Stilwell-Experiment

Mit dem Ives-Stillwell-Experiment (1938) wurde der Einfluss der Zeitdilatation direkt nachgewiesen. Gemessen wurde der relativistische Dopplereffekt an Kanalstrahlen (Abb. 3-7).



Einstein zufolge sollte die Zeitdilatation eine Modifikation des longitudinalen Dopplereffekts bewirken, wobei zusätzlich ein Effekt in transversaler Richtung zu erwarten war. Das Experiment ergab in der Tat ein positves Resultat. Moderne Replikationen wie das Experiment von Kündig

⁷⁶ Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Kennedy-Thorndike-Experiment

⁷⁷ Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Ives-Stilwell-Experiment

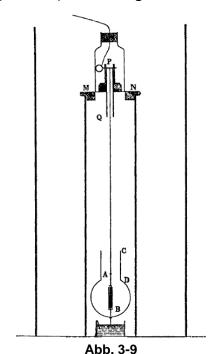
⁷⁸ Ebenda

(Abb. 3-8) bestätigten mit erhöhter Präzisison den durch die Zeitdilatation bedingten Effekt.

Zusammen mit den Versuchen von Michelson-Morley und Kennedy-Thorndike bildet das Ives-Stillwell-Experiment die experimentelle Grundlage der SRT. Ives war übrigens ein Gegner der Einsteinschen Theorie. Für ihn war das Ergebnis eine weitere Bestätigung des von Lorentz und Larmor postulierten Äthers.

3.3.7 Trouton-Noble-Experiment

Mittels elektromechanischer Prinzipien – und damit völlig anders als Michelson – versuchten Trouton und Noble (1903) den Einfluss des Äthers auf bewegte Objekte zu erfassen. Im Versuch (Abb. 3-9) wurde ein geladener Plattenkondensator benutzt, welcher sich frei um eine zu den



Trouton-Noble-Experiment (1903)⁷⁹

Platten parallele Achse drehen konnte. Aufgrund der Bewegung der Erde wurde erwartet, dass eine (mitbewegte) elektrische Ladung von einem magnetischen Feld begleitet wird. Die Magnetfelder beider Platten sollten demzufolge über die Lorentz-kraft ein Drehmoment erzeugen. Es wurden jedoch keine Drehmomente registriert. Spätere Experimente mit grösserer Präzision führten zu demselben Ergebnis. Die Einwirkung des Äthers auf bewegte Körper konnte damit nicht nachgewiesen werden.

Die erste Lösung des Trouton-Noble-Paradoxon (ob nämlich ein Drehmoment in bewegten Inertialsystem auftritt oder nicht) stammte von Lorentz (1904), der davon ausging, dass Impuls und Drehmoment der elektrostatischen Kräfte kompensiert werden durch Impuls und Drehmoment der molekularen Bindungskräfte.⁸⁰

Die Standardlösung von Laue (1911) basierte auf der "Trägheit der Energie", wonach durch elastische Spannungen ein

Energiefluss erzeugt wird, der ebenfalls mit einem Impuls (Laue-Strom) ausgestattet ist. Das resultierende mechanische Drehmoment kompensiert das elektromagnetische Drehmoment exakt, so dass keine Rotation entsteht.⁸¹ Epstein fügte hinzu, wenn in der Relativitätstheorie die Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung gelten solle, so müssten Kompensationskräfte eingeführt werden, welche formal dem Laue-Strom entsprächen.

3.4 Relativistische Paradoxa und ihre Auflösung

3.4.1 Das Uhrenparadoxon

Nach Einstein existiert kein bevorzugtes Inertialsystem, sämtliche Galileischen Bezugssysteme sind gleichberechtigt. Aus dem Einsteinschen Relativitätsprinzip folgt, dass sich jeder Beobachter

⁷⁹ Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Trouton-Noble-Experiment

⁸⁰ H.A. Lorentz: Elektromagnetische Erscheinungen in einem System, das sich mit beliebiger, die des Lichtes nicht erreichender Geschwindigkeit bewegt (Das Relativitätsprinzip. Eine Sammlung von Abhandlungen, 1904).

⁸¹M. von Laue: Zur Theorie des Versuches von Trouton und Noble (Annalen der Physik, 1912).

als ruhend betrachten kann. In technischen Belangen ist es ab und zu trotzdem erforderlich, Bewegungsabläufe zu studieren.

Gegeben seien zwei Koordinatensysteme K und K'. Ein dritter in R ruhender Beobachter fungiere als Schiedsrichter (Abb. 3-10). Wir bezeichnen R als *Fundamentalsystem*, dessen Ursprung sich im Mittelpunkt eines raumfesten Bezugssystems befinden soll. In praxi könnte R bspw. im Schwerpunkt der Sonne verankert sein.

Der Schiedsrichter in R ist in der Lage, zu erkennen, welcher der beiden Beobachter K und K' sich bewegt. Möglich wäre zum Beispiel, dass sich beide in gleichförmiger Bewegung befinden. Gleichförmig bedeutet übrigens, geradeaus und mit konstanter Geschwindigkeit.

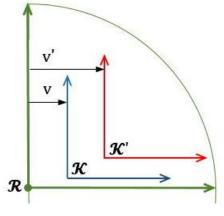


Abb. 3-10

Fundamentalsystem R und bewegte Koordinatensysteme K, K' Vereinfachend sollen sich die Beobachter K und K' entlang einer gemeinsamen Achse bewegen, die durch den Ursprung von R verläuft. Lorentz-Transformationen in derselben Richtung bezeichnet man als *Lorentz-Boost*.

Bewegen sich K und K' mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, so wird eine der mitbewegten Uhren langsamer gehen. Das lässt sich nach Beendigung der Translation eindeutig feststellen.

Einstein selbst benutzte in seiner Arbeit von 1905 (Zur Elektrodynamik bewegter Körper) ein analoges Beispiel.

Hieraus ergibt sich folgende eigentümliche Konsequenz. Sind in den Punkten A und B von K ruhende, im ruhenden System betrachtet, synchron gehende Uhren vorhanden, und bewegt man die Uhr in A mit der Geschwindigkeit v auf der Verbindungslinie nach B, so gehen nach Ankunft dieser Uhr in B die beiden Uhren nicht mehr synchron, sondern die von A nach B bewegte Uhr geht gegenüber der von Anfang ab in B befindlichen um ½ tv²/V² Sek. (bis auf Grössen vierter und höherer Ordnung) nach, wenn t die Zeit ist, welche die Uhr von A nach B braucht.

Einstein verwendete – wie damals üblich – für die Lichtgeschwindigkeit das Symbol V. Das Auseinanderlaufen der Uhren folgt aus der Formel für die Zeitdilatation.

$$t' = \gamma t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Wie wir bereits früher erwähnten, bricht die langsamer gehende Uhr nach unserem Dafürhalten das Relativitätsprinzip. Jeder Beobachter ist nämlich der Meinung, dass die Uhr im anderen System nachgeht, solange, bis durch einen Uhrenvergleich deutlich wird, dass eine der beiden Uhren in realiter langsamer gelaufen ist. Dies ist der Inhalt des Uhrenparadoxons, dessen man sich dadurch zu entledigen versucht, indem betont wird, dass zumindest einer der beiden Beobachter

während seiner Reise das Inertialsystem gewechselt hat. Dazu werden die Beschleunigungsphasen zu Beginn und am Ende der Reise ins Spiel gebracht. Wir verbleiben trotzdem bei unserem Urteil. Um Missverständnisse auszuschliessen, kann der Schiedsrichter angerufen werden, welcher über die Bewegungsabläufe im Bilde ist. Dieser wird nämlich bestätigen, dass sich einer der beiden Beobachter langsamer oder nicht bewegt hat.

3.4.2 Zwillingsparadoxon

Mit dem Uhrenparadoxon unmittelbar verwandt ist das Zwillingsparadoxon (Abb. 3-11), das in der Vergangenheit genug Stoff für etliche Debatten lieferte. Eine verständliche Darstellung der zugrundeliegenden Problematik findet sich bei Embacher, von dessen Website die folgenden Grafiken stammen.

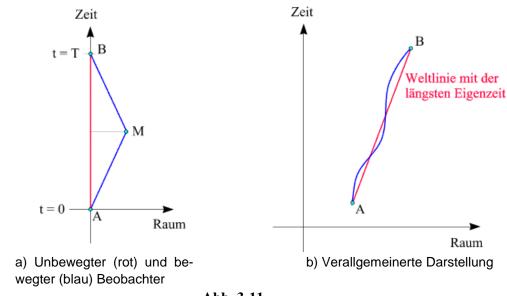


Abb. 3-11 Zwillingsparadoxon⁸²

Im linken Bild befindet sich der Bruder stets am selben Ort, während sich die Schwester zunächst entfernt, um später zurückzukehren. Daraus resultiert ihre gebrochene Weltlinie als Polygonzug.

Wenn $S_1 = T$ die Eigenzeit des ruhenden Zwillings ist, so ist S_2 die Eigenzeit des reisenden Zwillings.

$$S_2 = \int_0^T dt \, \sqrt{1 - v^2(t)}$$

Das rechte Bild zeigt eine verallgemeinerte Darstellung dieses Sachverhaltes. Daraus folgt, dass die Weltlinie mit der längsten Eigenzeit stets die kürzere ist. Generell gilt, dass beim Zusammentreffen der Zwillinge der eine älter als der andere ist.

Embacher schreibt dazu:

An diesem Punkt wird manchmal folgendes Gegenargument vorgebracht: Wie wäre es, dieselbe Situation vom Standpunkt des Ruhsystems der Schwester zu betrachten? Dann wäre der Bruder in Bewegung, und aufgrund der Zeitdilatation sollte die für ihn vergangene Zeit kürzer sein als jene für die (ruhende) Schwester. Dieses Argument übersieht, dass sich die Schwester nicht gleichförmig bewegt.

⁸² Bildquellen: http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/Zwillingsparadoxon.html

Zwischen den beiden Ereignissen A und M ist sie tatsächlich in einem Inertialsystem (das etwa einem von der Erde weg fliegenden Raumfahrzeug entspricht) in Ruhe. Bei M kehrt sie um – hier muss sie das Inertialsystem wechseln! Zwischen M und B ist sie in einem anderen Inertialsystem (das einem auf die Erde zu fliegenden Raumfahrzeit entspricht) in Ruhe. Der Bruder hingegen ist immer in einem einzigen Inertialsystem (dem der Erde) in Ruhe. Insgesamt wären also drei Inertialsysteme zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sind die Bewegungen von Schwester und Bruder nicht äquivalent. Manchmal wird das so ausgedrückt, dass die Schwester beschleunigt ist – sie kehrt ja im Ereignis M um, was einer ruckartigen Geschwindigkeitsänderung (also einer momentanen Beschleunigung) entspricht, während der Bruder nie beschleunigt wird. Das ist zwar richtig – es sollte aber nicht vermutet werden, dass der Wert der Beschleunigung in einfacher Weise die Größe des Effekts bestimmt.

Unter allen Reisenden, die sich in A trennen und in B wieder treffen, ist für denjenigen, der die ganze Zeit über in Ruhe geblieben ist, die längste Eigenzeit vergangen. Er ist der einzige unter all diesen Reisenden, der sich immer geradlinig gleichförmig (also – gemäß Trägheitssatz – kräftefrei) bewegt hat. [...] Unter allen Weltlinien, die in A beginnen und in B enden, entspricht jene der kräftefreien Bewegung, für die die längste Eigenzeit vergangen ist. Eine solche Weltlinie wird Geodäte (der Raumzeit) genannt.⁸³

Zugunsten dieser Auflösung des Zwillingsparadoxons könnte gesagt werden, dass es sich letztlich um ein Problem der Allgemeinen Relativitätstheorie handelt, die krummlinige Koordinaten erfordert. In diesem Sinne etwa argumentieren die Physiker Sexl und Urbantke, räumen dann aber doch ein:

Damit sind wir aber in der Lage, die Frage nach der Berechtigung beschleunigter Bezugssysteme bzw. nach einer Gleichberechtigung der [bewegten] Uhr im Uhrenproblem voll zu beantworten. Beschleunigte Bezugssysteme sind in der speziellen Relativitätstheorie zulässig, allerdings hat in diesen Systemen das Linienelement nicht die einfache Form...⁸⁴

Letztlich ändert dies aber nichts am Sachverhalt, dass sich durch Uhrenvergleich bestimmen lässt, welcher der beiden Beobachter langsamer unterwegs war. Die Beschleunigungsphasen sind bei einer langen Reise vernachlässigbar, so dass die Problematik im Rahmen der SRT diskutierbar ist.

In der Fachliteratur finden sich weitere – oft äusserst geistreiche – Auflösungen relativistischer Paradoxa, darunter das Garagenparadoxon, das Maßstabparadoxon oder das Bellsche Raumschiffparadoxon, welche sich aus der Einsteinschen Längenkontraktion ergeben. Die bspw. beim Garagenparadoxon angegebenen Lösungen sind aber dermassen sophistisch, dass es nicht verwunderlich ist, wenn Widerstand aus den Reihen der an der Thematik interessierten Ingenieure erwächst.

Die "Relativisten" konstruieren exemplarisch einen Widerspruch und behaupten dann, es sei keiner! Unsere Aufgabe ist es nicht, detailliert auf solche Schmankerl einzugehen. Wer sich dafür interessiert sei auf Wikipedia⁸⁵ oder die einschlägige Literatur im Anhang verwiesen. Wohltuend ist, dass die lorentzianische Interpretation der SRT Paradoxa dieser Art nicht kennt, weil eine bewegte Uhr real langsamer geht und ein bewegter Maßstab real kürzer ist.

https://de.wikipedia.org/wiki/Bellsches_Raumschiffparadoxon

https://de.wikipedia.org/wiki/Zwillingsparadoxon

⁸³ F. Embacher → http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/Zwillingsparadoxon.html

⁸⁴ R.U. Sexl, H.K. Urbantke: Gravitation und Kosmologie (Spektrum).

⁸⁵ https://de.wikipedia.org/wiki/Paradoxon_der_L%C3%A4ngenkontraktion

3.4.3 Das Ehrenfestsche Paradoxon

Von Paul Ehrenfest (1880-1933) – einem Studenten Ludwig Boltzmanns – stammt ein Paradoxon, das Einstein einiges Kopfzerbrechen bereitete. Ursprünglich ging Ehrenfest von einem starren und schnell rotierenden Zylinder aus. Einfacher zu behandeln wäre vermutlich ein Hohlzylinder gewesen. In den später kolportierten Darstellungen wurde daraus eine rotierende Kreisscheibe (Abb. 3-12). Am eigentlichen Sachverhalt ändert diese Reduktion nichts.

Aufgrund der Längenkontraktion müsste der rotierende Kreisumfang kontrahieren, was zu einer Deformation der Scheibe führen würde. Weil sich in radialer Richtung (quer zur Rotation) keine Kontraktion einstellt, ergäbe dies in der Tat ein echtes Paradoxon. Abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit hätte eine Scheibe folglich unendlich viele mögliche Umfänge!

$$2\pi r' < 2\pi r$$
; $r = r' = const.$

Bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit würde sich der Scheibenrand zu einem Punkt zusammenziehen und es entstünde eine Hohlkugel.

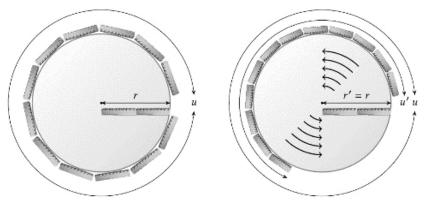


Abb. 3-12 Ehrenfestsches Paradoxon⁸⁶

Der Denkfehler in Hoffmanns Grafik besteht m.E. darin, dass er den Scheibenumfang unverändert belässt und lediglich den Maßstab kontrahiert. Wie wir aber bereits bei den atmosphärischen Myonen gesehen haben, kontrahiert auch der umgebende Raum (und mit ihm Scheibenumfang und Maßstäbe).

Ein mitbewegter Beobachter wäre sich dieser Problematik nicht bewusst, weil sich Scheibenperipherie und mitbewegter Maßstab mit demselben Faktor verkürzen. Ein im Mittelpunkt der Scheibe stehender Beobachter dagegen würde die sukzessive Veränderung $\delta U(\omega)$ bemerken. Dasselbe gilt für einem im Laborsystem befindlichen Beobachter. Als Laborsystem bezeichnen wir den Inertialraum, in dem die Scheibe montiert ist.

Mittels Euklidischer Geometrie liess sich diese Problematik nicht befriedigend lösen. Einstein wurde dadurch auf die Riemannsche Geometrie sphärisch gekrümmter Räume (Abb. 3-13) aufmerksam, bei deren Aneigung ihm sein einstiger Studienkamerad Marcel Grossmann tatkräftig zur Seite stand. Schliesslich galt es jetzt, sich des Ricci-Kalküls zu bemächtigen. Eine weitere Konsequenz war, dass die Konzeption des starren Körpers im Rahmen der sich anbahnenden *General*

⁸⁶ D. Hoffmann: Einsteins Relativitätstheorie (BoD).

Relativity aufgegeben wurde.

Dem Sachverhalt angemessener wäre also folgende Darstellung:

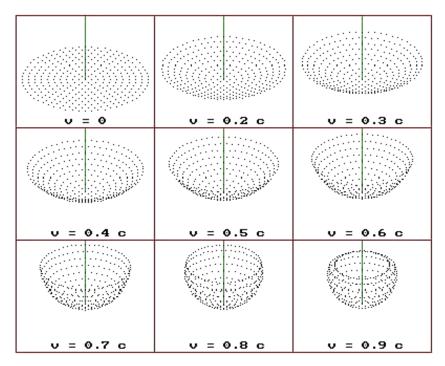


Abb. 3-13 Geometrie gekrümmter Räume⁸⁷

Experimentelle Untersuchungen wie diejenige von Thomas E. Phipps⁸⁸ (1973) zeigten keine Kontraktion des Scheibenumfanges, was aufgrund des vorhin Gesagten doch seltsam anmutet. Möglicherweise war die Umfangsgeschwindigkeit einfach zu gering. Nicht die Erzeugung ultrahoher Drehzahlen ist bei diesem Experiment problematisch, sondern geeignete Werkstoffe, die den enormen Fliehkräften zu trotzen vermögen.

⁸⁷ Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Diskussion:Ehrenfestsches_Paradoxon

⁸⁸ Th.E. Phipps: Kinematics of a 'Rigid' Rotor (1974). Der Artikel wurde in einer wenig bekannten italienischen Fachzeitschrift veröffentlicht, weil Nature die Annahme ablehnte.

4 Quellenverweise

4.1 Literatur

Biografien

- Albrecht Fölsing, Albert Einstein (Suhrkamp)
- Abraham Pais, Raffiniert ist der Herrgott... (Spektrum)
- Armin Hermann, Einstein Der Weltweise und sein Jahrhundert (Piper)

Sachbücher

- Banesh Hoffmann: Einsteins Ideen (Spektrum)
- Peter Galison: Einsteins Uhren und Poincarés Karten (Fischer Taschenbuch)
- Dirk W. Hoffmann: Einsteins Relativitätstheorie (BoD)
- Albert Einstein: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (Springer)

Fachbücher

- Roman Sexl, Herbert K. Schmidt: Raum, Zeit, Relativität (Vieweg)
- Helmut Günter: Spezielle Relativitätstheorue (Teubner)
- Dirk W. Hoffmann: Einführung in die Spezielle Telativitätstheorie (BoD)
- Jürgen Freud: Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger (vdf Hochschulverlag)
- U. E. Schröder: Spezielle Relativitätstheorie (Verlag Harri Deutsch)
- Ernst Schmutzer: Relativitätstheorie aktuell (Teubner Studienbücher)
- Max Born: Die Relativitätstheorie Einsteins (Springer)
- Domenico Giulini: Spezielle Relativitätstheorie (Fischer Taschenbuch)

Kritische Literatur

- Victor Kantorowicz: Auf der Suche nach Einsteins Feldtheorie
- Georg Galeczki, Peter Marquardt: Requiem für die Spezielle Relativität (Haag + Herrchen)
- Jürgen Brandes et al.: Die Einsteinsche und die lorentzianische Interpretation der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie (VRI)
- Jürgen Brandes, Jan Czerniawski: Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie für Physiker und Philosophen (VRI)

4.2 Wikipedia

Historische Betrachtungen

https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84ther (Physik)

https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte der speziellen Relativit%C3%A4tstheorie

https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84ther_(Physik)#Probleme_der_.C3.84thertheorien

https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Lorentz-Transformation

https://de.wikipedia.org/wiki/Lorentzsche %C3%84thertheorie

https://de.wikipedia.org/wiki/Sagnac-Interferometer

Grundlagen der SRT

https://de.wikipedia.org/wiki/Spezielle Relativit%C3%A4tstheorie

Experimente und Test's

https://de.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley-Experiment

https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment

https://de.wikipedia.org/wiki/Kennedy-Thorndike-Experiment

https://de.wikipedia.org/wiki/Ives-Stilwell-Experiment

https://de.wikipedia.org/wiki/Trouton-Noble-Experiment

https://de.wikipedia.org/wiki/Hafele-Keating-Experiment

http://de.wikipedia.org/wiki/Testtheorien_der_speziellen_Relativit%C3%A4tstheorie

http://de.wikipedia.org/wiki/Tests_der_speziellen_Relativit%C3%A4tstheorie

http://de.wikipedia.org/wiki/Tests_der_relativistischen_Energie-Impuls-Beziehung

Paradoxone

https://de.wikipedia.org/wiki/Ehrenfestsches Paradoxon

https://de.wikipedia.org/wiki/Paradoxon der L%C3%A4ngenkontraktion

https://de.wikipedia.org/wiki/Bellsches Raumschiffparadoxon

https://de.wikipedia.org/wiki/Zwillingsparadoxon

Minkowskis Beitrag zur SRT

https://de.wikisource.org/wiki/Raum und Zeit (Minkowski)

Kritik

https://de.wikipedia.org/wiki/Kritik an der Relativit%C3%A4tstheorie

4.3 Weitere Weblinks

http://www.relativity.li/

http://wase.urz.uni-magdeburg.de/kassner/srt/crashcourse/index.html

http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/spezielle-relativitaetstheorie

http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/

http://www.forphys.de/Website/student/relativ.html

http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/mp/relativ

https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/wissenschaftstheorie/studierendentag/studierendentagss2011/paradoxien.pdf

http://www.sofatutor.ch/physik/videos/minkowski-diagramme

http://www.physik.uni-jena.de/didaktik_download_SRT.html

https://mysteria3000.de/magazin/einstein-und-die-relativitatstheorie-alles-widerlegt/

4.4 YouTube

https://www.youtube.com/watch?v=mJcRHBviHBI