

physiker rundbrief

8 (2003/2004)

Thomas Schmidt

Gedanken zur sogenannten
Lichtgeschwindigkeit

Peter Schwab

Ein Versuch die Lorentz-Transformation zu
verstehen

Hermann Bauer

Zum Ehrenfestparadoxon

Editorial

Nach langer Pause erscheint hier wieder ein Physikerrundbrief – die Arbeitstage im Januar haben eine Reihe von Menschen angeregt, Gedanken zu Papier zu bringen oder uns vorhandenes Material vorzulegen. Um den Umfang geniessbar zu halten, habe ich das Material geteilt: dieses Heft Nummer 8 enthält drei Aufsätze, die sich allesamt im Umfeld der Relativitätstheorie bewegen und insofern schön an die Diskussion in Dornach um die Lichtgeschwindigkeit im Januar dieses Jahres. Die Arbeiten zum Thema “Wärme” lege ich als Sonderheft vor. Bitte beachten Sie die dort gemachte Ankündigung eines Arbeitstreffens zum Thema Wärme im Oktober 2004. Wir werden versuchen, auf unserer Homepage unter der Rubrik “Veranstaltungen” den Vorbereitungsstand dazu zu reflektieren.

Womit wir bei technischen Fragen sind: das Institut hat einen neuen Platz im Internet, <http://www.forschungsinstitut.ch>. Da der Umzug des Internet-Auftritts des Goetheanums mit allerlei Ungewissheiten verbunden ist und eine Erreichbarkeit der Sektionsseiten von dort nicht gewährleistet ist, möchte ich Ihnen empfehlen, uns über die angegebene URL direkt zu besuchen. Dort finden sie unter der Rubrik “Publikationen” nicht nur das Archiv des Physikerrundbriefs, sondern neu auch eine durchsuch- und ausdrückbare Fassung der *Bibliographie Goetheanistische Naturwissenschaft* mit über 3000 Einträgen, die Herr Haas der Öffentlichkeit zur Verfügung stellt. Wir sind bemüht, dieses Angebot weiter zu entwickeln und zu aktualisieren – nutzen sie dieses grossartige Werkzeug!

Unsere EDV-Frau hier am Goetheanum hat den Betrieb inzwischen auf OpenOffice unter Windows umgestellt. Das berührt mich als eingefleischten T_EXer zwar nicht direkt, birgt aber neue Schwierigkeiten bei der Bearbeitung von Manuskripten, die im “.doc”-Format hier eintreffen. Während Textmerkmale wie Schriften und Fussnoten einigermaßen korrekt konvertierbar sind, machen mir vor allem die Bibliographien und die Formeln Arbeit. Im Internetarchiv oder direkt bei mir gibt es die PDF-Datei “Hinweise für Autoren”, die schildern, wie Autoren die Herstellung des Rundbriefs befördern können – machen Sie Gebrauch davon. Für diesmal habe ich manche Vereinheitlichung einfach sein lassen. . .

Zum Schluss erneut die Einladung oder Bitte in eigener Sache (sofern Sie nicht ohnehin Kunde sind), ein Abonement oder Probehefte unserer Zeitschrift “Elemente der Naturwissenschaft” wohlwollend in Erwägung zu ziehen (gerade die letzten Hefte sind ausgesprochen vielseitig und interessant). Dieses wichtige Organ der wissenschaftlichen Arbeit braucht dringend mehr Leser und vor allem auch Abonnenten.

Herzlichen Gruss – in der Hoffnung, 2004 wieder mehr zu “rundbrieflern”

Ihr Florian Theilmann

Inhaltsverzeichnis

Editorial	2
Gedanken zur sogenannten Lichtgeschwindigkeit	4
Der Weg zur ersten Ableitung der "Lichtgeschwindigkeit" durch <i>Olaus Rømer</i> .	4
Stufen menschlicher Erfahrung von räumlicher und zeitlicher Umgebung .	7
1. "Hier und Jetzt"	8
2. Kurier und Postschiff	9
3. "Buschtrommel"-Telegraphie	12
4. Die Lichtausbreitung	13
Ein Versuch die Lorentz-Transformation zu verstehen	18
Zum Ehrenfestparadoxon	23
Das Problem	23
Definition	23
Relativistisch-klassischer Unterschied bei einer Kreisbewegung	23
Relativistisch-klassischer Unterschied beim Sonderfall einer Kreisringrotation	25
Übergang zur Kreisscheibe	25
(Email-)Adressen der Autoren	27

Gedanken zur sogenannten Lichtgeschwindigkeit

VON THOMAS SCHMIDT

Die folgenden Betrachtungen ergeben sich aus *Florian Theilmanns* und *Georg Maier*s (2004) Experimenten und Interpretationen zu *Foucaults* Drehspiegelversuch zur Bestimmung der elektromagnetischen Naturkonstante [9], die in der Regel als “Lichtgeschwindigkeit” ($c = 2,997925 \times 10^8 m/s$) bezeichnet wird, weil sie ein Geschwindigkeitsmaß besitzt. Es wird hier zunächst der historische Zeitpunkt aufgesucht, an dem diese universelle Konstante durch den dänischen Astronomen *Olaus Rømer* 1676 zum ersten Male abgeleitet wurde.

Der Weg zur ersten Ableitung der “Lichtgeschwindigkeit” durch *Olaus Rømer*.

Wie oft bei wichtigen wissenschaftlichen Entdeckungen ist auch die erste Bestimmung der “Lichtgeschwindigkeit” keineswegs das Ergebnis einer systematischen Suche, sondern ein unbeabsichtigtes Zufallesergebnis. Der Däne *Olaus (Ole) Rømer* (1644 – 1710), Zeitgenosse *Isaac Newtons*, kam auf Veranlassung des 24 Jahre älteren französischen Astronomen und Geodäten *Jean Picard* nach Paris, wo er zwar eigentlich den Dauphin zu erziehen hatte, aber noch genügend Zeit fand, an der Pariser Sternwarte der Astronomie nachzugehen.

In dieser Zeit des zunehmenden Weltverkehrs war es eine der Hauptaufgaben der Astronomie, der genauen Orientierung des Menschen auf der Erdoberfläche zu dienen:

- Zum einen galt die genaue Bestimmung der Größe der Erdkugel als wichtige Aufgabe, gab es doch für den Umfang der Erdkugel immer noch keine besseren Werte als die des *Eratosthenes von Cyrene* von etwa 200 v.Chr. aus der Differenz der mittäglichen Sonnenhöhe zur Sommer-Tagundnachtgleiche zwischen Syene (heute Assuan) am Nil und Alexandrien von $7\frac{1}{5}^\circ$, verglichen mit der zugehörigen, durch berufsmäßige “Schrittzähler” ausgemessenen Nord-Süd-Distanz von 5000 Stadien. Das Ergebnis war ein Erdumfang von 250 000 Stadien; je nach verwendetem Stadienmaß sind das zwischen 40 000 km und 48 000 km.

Das ist zwar ein erstaunlich genauer Wert, der aber im 17. Jahrhundert angesichts der sehr ungenauen “Schrittzähler-Distanz” zunächst als extrem unsicher und damit revisionsbedürftig gelten musste. Und *Rømers* französischer Freund und Lehrer *Picard* war eben der Forscher, der zum ersten Mal Winkelmessgeräte mit Fernrohren benutzt hatte, um genaue trigonometrische Landvermessungen durchzuführen, die dann 1792 zu dem Pariser Akademie-Projekt führten, den Längengrad zwischen Barcelona und Dünkirchen exakt auszumessen, um daraus das heutige Metermaß ableiten zu können.

- Zum andern war zwar die Orientierung in Nord-Süd-Richtung auf der Erdkugel durch astronomische Messungen relativ einfach, da der Zenitabstands-Winkel

des Himmelspoles für jeden Ort auf der Erdkugel der geographischen Breite gleich ist, schwieriger gestaltete sich jedoch, die astronomische Orientierung in Ost-West-Richtung zu bestimmen, in der der Anblick des Sternhimmels gleich bleibt und sich nur der *Zeitpunkt* der Auf- und Untergänge der Gestirne verändert. Zur Ermittlung der geographischen Länge wird demnach eine vom speziellen Erdort losgelöste, absolute Zeitmessung benötigt, die im 17. Jahrhundert durch genügend genaue irdische Uhren (die ja auch schiffstauglich sein mussten) noch nicht realisierbar war. Man benötigte also ein absolutes, astronomisches Zeitmaß. Überall auf der Erdoberfläche in gleicher Weise sichtbare kosmische Beschattungs-Ereignisse sind dafür geeignet. Das gilt bereits für die Mondphasen, die jedoch viel zu ungenau festgelegt werden können; Mondfinsternisse sind schon besser, sind aber für den Schiffsverkehr ihrer Seltenheit wegen kaum brauchbar und zudem ebenfalls noch recht ungenau. Die einzigen genügend präzisen kosmischen Uhren, die immer wieder “abgelesen” werden konnten waren die 1610 von *Galilei* entdeckten Jupitermonde, deren drei innere bei jedem Umlauf vom Jupiter beschattet werden. Am geeignetsten war der innerste Mond *Io*, der nur etwa $1\frac{3}{4}$ Tage für einen Umlauf zwischen zwei Versfinsterungen benötigt, die für jeden Ort der Erde exakt zur gleichen absoluten Uhrzeit eintreten.

Rømers Aufgabe an der Pariser Sternwarte war es nun, für die Jupitermonde die Beobachtungs-Protokolle seiner Vorgänger auszuwerten, um daraus für die Zukunft Tabellen mit den Uhrzeiten der genauen Verfinsterungen zu berechnen. Damit konnten dann ständig die Anzeigen auch wenig exakter Uhren auf Schiffen genau genug zu einer absoluten “Weltzeit” korrigiert werden, um durch den Vergleich mit der aus den aktuellen Sternpositionen ermittelten lokalen “Ortszeit” die zur Schiffposition gehörige *geographische Länge* ermitteln zu können. Auf die Möglichkeit einer derartigen Verwendung der Jupiter-Monde hatte übrigens bereits ihr Entdecker *Galileo Galilei* hingewiesen.

Die von *Rømer* bearbeiteten Beobachtungen der Jupitermonde im etwa 13-monatlichen geozentrischen Konstellations-Zyklus zwischen Jupiter und Sonne¹ stammten übrigens größtenteils von *Cassini*, dem es kurz zuvor 1672 zusammen mit *Richer* gelungen war, durch die gleichzeitige Vermessung der Marsbahn vor dem Fixsternhimmel in Paris und Cayenne (Guayana, Südamerika) zum ersten Mal mit der Hilfe von Fernrohren die Entfernung zwischen der Erde und einem Planeten auszumessen, um dann daraus mit dem dritten Keplerschen Gesetzes den Erdbahn-Radius (im heutigen Maß) zu 138.400.000 km zu berechnen. Bis dahin galt immer noch der nur ungefähr $\frac{1}{20}$ so große, etwa im Jahre 250 v.Chr. von *Aristarch von Samos* angegebene Wert von umgerechnet etwa 7.200.000 km, den zwar schon *Kepler* anzweifelte, aber noch nicht zu ersetzen wusste. Dieser verbesserte Erdbahn-Radius, der “Astronomische Einheit” (AE) genannt wird (der exakter Wert ist mit 149.600.000 km nur noch 7,5 % größer) ging dann auch in *Rømers* Ableitung der Lichtgeschwindigkeit ein.

¹Positionen auf dem Fixsternhintergrund sind für diese Untersuchungen ohne jede Bedeutung.

Bei der Arbeit an der Pariser Sternwarte fiel nun *Rømer* auf, dass die protokollierten Finsterniszeiten der Monde nicht durch eine gleichmäßige Umlaufbewegung zu erklären waren; es war diese Ungleichmäßigkeit offensichtlich von der Position der Erde auf ihrer Bahn im Verhältnis zum Jupiter abhängig: Immer, wenn die Erde sich auf den Jupiter zu bewegte war die Umlaufperiode des innersten Jupitermondes *Jo* etwa 19 sec kürzer, bewegte sie sich vom Jupiter weg, benötigte *Jo* für den Umlauf 19 sec mehr als den Mittelwert der Periode von $1^d 18^h 28^m 36^s$. Diese maximale Verkürzung und Verlängerung der Umlaufperiode war also immer dann festzustellen, wenn der Jupiter geozentrisch betrachtet nahezu in Quadratur zur Sonne stand. In Opposition zur Sonne entsprach die Umlaufperiode dem Mittelwert, dasselbe ließ sich auch für die Konjunktion extrapolieren, war aber dafür wegen der Überstrahlung durch die Sonne kaum direkt zu beobachten. Über das annähernd halbe Jahr, in dem sich die Erde und Jupiter näher kamen bzw. von einander entfernten stellte *Rømer* als Summe der Verfrühung bzw. Verspätung der *Jo*-Verfinsterungen 21,5 min fest, die in der fast kreisförmigen Erdbahn mit ihrer nur geringen Neigung gegenüber der Jupiterbahn ziemlich genau einem Unterschied des Lichtweges von $2 \text{ AE} = 276.800.000 \text{ km}$ im heutigen Maß entsprach.

Dieses 17. Jahrhundert der ersten, von *Galilei* begonnenen astronomischen Fernrohrbeobachtungen hatte sich immer noch mit ernstzunehmenden Argumenten für ein geozentrisches Planetensystem auseinander zu setzen:

1. Nicht grundlos vertrat der beste beobachtende Astronom des fernrohrlosen Zeitalters *Tycho Brahe* weiterhin ein auf die Erde zentriertes Weltsystem, weil ihm seine genauen Fixstern-Sternbeobachtungen in keinem Falle eine Spiegelung der jährlichen Erdbahn um die Sonne zeigten, wie das für ein heliozentrisches Weltbild zu erwarten ist. – Es dauerte bis zum Jahre 1838, dass es *F. W. Bessel* mit einem raffiniert konstruierten Spezialfernrohr in Königsberg gelang, für den 61. Stern im Sternbild Schwan ein winziges Abbild der Erdbahnbewegung tatsächlich nachzuweisen.
2. *Galilei* machte es in seinen Auseinandersetzungen mit der Inquisition durchaus sachlich begründete Schwierigkeiten, weil sich aus den Fernrohrbeobachtungen der Planetenscheiben mit der damals immer noch gültigen, zu kleinen "Astronomischen Einheit" nach *Aristarch von Samos* ergab, dass die Erde der weitaus größte Planet des gesamten Planetensystems sein müsste, allein die Sonne selbst ausgenommen. Damit besäße die Erde weiterhin eine besondere, zentrale Stellung unter den Planeten, weil sie mit ihrem nur *einem* Mond einen fast doppelt so großen Durchmesser hatte wie Jupiter mit seinen immerhin von *Galilei* entdeckten *vier* Monden. Dieses Argument der Besonderheit der Erde allerdings war seit 1672 durch die Neubestimmung der Astronomischen Einheit durch *Cassini* und *Richer* beseitigt.
3. Seit *Rømers* Auswertungen des Jahres 1675/76 gab es nun ein neues Argument für die zentrale Bedeutung der Erde unter den übrigen Planeten, weil doch offen-

sichtlich der Umlauf der Monde des Jupiter nicht nur vom diesem selbst, sondern außerdem auch noch von der Stellung der Erde im Raum abhängig war.

Die einzige Möglichkeit, dieser weiteren “geozentrischen Anfechtung” zu entgehen war nun *Rømers* Idee, dem bis dahin übermateriell und entsprechend ohne endliche Bewegung vorgestelltem *Licht* eine messbare Geschwindigkeit zuzuschreiben, die als Quotient aus der doppelten Astronomischen Einheit und der halbjährlich beobachteten gesamten Verfrühung bzw. Verspätung der Umlaufperioden der Jupitermonde zu berechnen ist. So ergab sich der erste Messwert für die Lichtgeschwindigkeit (wieder in moderne Maßeinheiten) zu:

$$c = \frac{2 \times AE}{\Delta t} = \frac{276'000'000 \text{ km}}{60 \times 21.5 \text{ sec}} \approx 215'000 \text{ km/sec}$$

dieses Ergebnis zeigt trotz seiner Abweichung von 28 % gegenüber dem modernen Wert von annähernd $c \approx 300.000 \text{ km/s}$ eine den Umständen entsprechend durchaus befriedigende Genauigkeit. Der Fehler liegt nicht nur an der noch ungenau bekannten Astronomischen Einheit, sondern ist auch darin begründet, dass die Ableitung von *genauen* Umlaufzeiten der Jupitermonde aus den Beschattungszeiten einen keinesfalls ganz problemlosen Rechenaufwand erfordert. Dennoch ist zu betonen, dass *Rømers* kosmische Methode die Lichtgeschwindigkeit abzuleiten, die einzige ist, die keinerlei besonderer, raffiniert konstruierter Messanordnung bedurfte, um besonders kleine Effekte an der Grenze der Feststellbarkeit messen zu können, wie das der Fall ist für alle irdischen Mess-Methoden der Lichtgeschwindigkeit, die eben innerhalb des Erscheinungszusammenhänge unserer Erdumgebung ganz bedeutungslos ist.

Die etwas ausführlichere Schilderung des Weges zu einem eindeutigen Zahlenwert für die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit wurde hier gewählt, weil dadurch deutlich werden kann, wie die Tat *Rømers* einen durchaus mit Erfolg erreichten Schlusspunkt für die irdisch wissenschaftliche Bemühung bedeutet, den Erdenraum als objektives, von seinem konkreten Inhalt unabhängiges Gefäß für die uns umgebenden materiellen Gegenstände bruchlos auf den Kosmos auszudehnen. Nur elf Jahre später, im Jahre 1687 wird *Isaac Newton* seine “*Philosophiae naturalis principia mathematica*” publizieren, durch die nicht nur der irdische Gegegstands-*Raum* auf den Kosmos ausgedehnt wird, sondern auch die Gültigkeit aller physikalischen Naturgesetze der irdischen *Mechanik*. Es brauchte dann mehr als weitere zwei Jahrhunderte, bis nach 1900 eine Zeit begann, in der sich durch *Albert Einsteins* Relativitätstheorien *Raum* und *Zeit* als “apriorische Anschauungs-Gefäße” aller Welt-Tatsachen wieder auflöste und dasselbe dann in der Quantenmechanik auch für die *Tatsachen* selbst geschah.

Stufen menschlicher Erfahrung von räumlicher und zeitlicher Umgebung

Grundsätzlich ist ein jedes Verhältnis des Menschen im wachen, irdischen Gegenstandsbewusstsein zu seiner raum-zeitlichen Umgebung durch einen existentiellen Dua-

lismus bestimmt, indem das von unserem Bewusstsein erhellte geistig-seelische “Innen” dem uns fremden “Außen” der Welt gegenübersteht. Ebenso grundsätzlich ist aber auch der Forscher- und Erkenntnis-Trieb des Menschen, diesen Dualismus wiederum durch doppelte Tätigkeit aufzuheben, indem nämlich die von *außen* durch alle unsere Sinne vermittelten *Wahrnehmungen* mit dem in unserem *Innern* aktivierten *Erkenntnistrieb* verarbeitet werden und damit unseren Bewusstseinsinhalt bereichern. Diesen Weg hat *Rudolf Steiner* in seinen Schriften zur Erkenntnistheorie und Sinneslehre ausführlich beschrieben. Die Unterschiede dieser “Bewusstseins-Bereicherung” für die unterschiedlichen Raum-Zeit-Beziehungen, in denen wir als Menschen zu unserer Umgebung stehen, sollen hier etwas genauer betrachtet werden.

1. “Hier und Jetzt”

Der Bewusstseins-Teilnahme zu der uns unmittelbar umgebenden Welt können wir uns als tag-wache Menschen niemals ganz entziehen, selbst gegen unseren Willen sind wir ihr ausgesetzt: Zwar vermag ich mich zwischen redenden Menschen oder neben einem frisch mit stinkender Gülle besprühtem Feld durch energische Konzentration selbstbestimmter geistiger Tätigkeit zuzuwenden. Vollständig wird es mir aber kaum je gelingen, mich von den auf mich eindringenden Gehörs-, Geruchs- oder auch anderen Wahrnehmungen abzuschließen; wirklich blockieren können wir allenfalls unsere Verarbeitung der Wahrnehmungen durch unsere Denktätigkeit, schwieriger wird das bereits für die sich daran anschließenden Gefühle, die Wahrnehmungen selbst aber lassen sich fast nur durch äußere Manipulationen – “Augen zu”, “Ohropax in die Ohren”, “Gasmaske vor die Nase” – vermeiden. Die Intensität des Kontaktes zu dieser uns nächsten Umgebung liegt in ihrer stets aktuellen räumlichen *Anwesenheit* und zeitlichen *Gegenwart* begründet. Sie wird am deutlichsten repräsentiert durch unseren immer aktuellen Tastsinn, der zum einen grundsätzlich durch den unmittelbaren Körperkontakt nichts als “Hier” und “Jetzt” zu vermitteln vermag und der zum andern überhaupt nur durch Betäubung und damit zumindest vorübergehende Schädigung unseres Leibes “abgeschaltet” werden kann.

Die Grenze dieser “Hier-und-Jetzt-Stufe” unseres Weltkontaktes ist zwar ein objektiver Tatbestand aber als *Erlebnis-Grenze* doch auch von unserer subjektiven Befindlichkeit abhängig und deshalb nicht eindeutig festzulegen und schon gar nicht für alle unsere Sinneswahrnehmungen in gleicher Weise bestimmbar: Für den *Tastsinn* ist sie offensichtlich schon bei fehlendem Körperkontakt überschritten, für das *Auge* liegt sie erst außerhalb der uns zusammenhängend sichtbaren Umgebung überhaupt. Selbst die Mondsichel am blauen Tageshimmel gehört für uns zu den unmittelbar aktuell gegenwärtigen “Sehdingen”, erst für den isolierten, einzelnen Lichtpunkt in der Dunkelheit erleben wir Unsicherheit („ist’s ein einsames Haus oder ein aufgehender Stern?“).

Es ist charakteristisch – und für unser Thema “Lichtgeschwindigkeit” wichtig – dass die Annäherung an die Grenze dieser ersten Stufe von Umgebungserfahrung sich vor allem dadurch zeigt, dass die aktuelle Gegenwärtigkeit der Erfahrung bezüglich

einer Sinneswahrnehmung einen Vergangenheitsbezug für eine *andere* ergeben kann: die *jetzt* in 100 m Entfernung abgelassene Gölle erreicht meine Nase – wenn überhaupt – erst mit deutlicher Verspätung. Am bekanntesten ist dieser “Aktualitätsbruch” zwischen verschiedenen Wahrnehmungen beim Verhältnis von Blitz und Donner. Wenn der Donner an meinem Ohr “aktuelle Gegenwart” wird, ist der Blitz schon längst Vergangenheit geworden! Um zu dieser Erfahrung zu kommen, darf ich allerdings nicht bei den unmittelbaren Wahrnehmungen von Ohr und Auge stehen bleiben, sondern habe durch Erkenntnis-Anstrengung verschiedene Wahrnehmungen zu verbinden, die zunächst *keine* Beziehung zu einander besitzen und auch ganz andere “Gesten-Sprache” besitzen; die Gegensätzlichkeit des momentan zuckenden Blitzes zu dem grollenden, anhaltenden Donner ist unmittelbar erlebbar. Ist mir dann aber gelungen, diese beiden so unterschiedlichen Sinnesqualitäten durch mein Denken zu vereinigen, habe ich die Möglichkeit, aus dem Aktualitätsverlust der *einen* gegenüber der *anderen* Wahrnehmung etwas zu erfahren, nämlich die räumliche Entfernung des Ereignisses: Ich weiß dann, es nimmt die Entfernung des Gewitter-Ereignisses jeweils um etwa einen Kilometer zu, wenn der “Aktualitätsverlust” zwischen Blitz und Donner um drei Sekunden größer wird, woraus dann die Schallgeschwindigkeit in der Luft zu etwas 340 *km/sec* abgeleitet wird.

Damit sind wir nun aber bereits auf dem Weg zu einer weiteren Stufe der räumlichen Erfahrung unserer Umgebung, auf der wir nicht mehr Ereignisse selbst, sondern von diesen nur noch *Mitteilungen* erfahren.

2. Kurier und Postschiff

Die Bedeutung zu begreifen, die Kuriere, die Briefpost oder Erzählungen von Reisenden in einer Zeit besaßen, als es sonst keine Möglichkeit gab, über große Distanzen etwas aus der Welt zu erfahren, ist uns in unserer Zeit beliebiger Verfügbarkeit von Nachrichten von fast jedem Ort der Erde nur noch eingeschränkt möglich. Es zeigt sich dabei eine teilweise geradezu existentielle Spannung für besondere Ereignisse, deren Vergangenheit als Tatsachen mir zwar sicher ist, obwohl mein Wissen davon noch für längere Zeit in der Unbestimmtheit der Zukunft bleiben muss. Zu denken ist etwa an das Ergehen eines todkranken Menschen oder die Geburt eines Kindes bei Abwesenheit des Vaters – Wissensdefizite, die heute durch interkontinentale Telefongespräche von praktisch jedem Ort der Erde aus beseitigt werden können. Zwei Beispiele aus der Geschichte seien hier angeführt:

Als *Goethe* am 3. September 1786 sich “früh drei Uhr ... aus Karlsbad [stahl], weil man [ihn] sonst nicht fortgelassen hätte”, hatte er u.a. seine “Iphigenie” im Reisegepäck, um deren Vers-Fassung unter südlicher Sonne, dem Meer und der Antike nahe, zu vollenden. Diese Arbeit hat er dann noch auf der Reise nach Rom begonnen und dort um die Weihnachtszeit abgeschlossen. Es seien hier einige Teststellen dazu aus *Goethes* “Italienischer Reise” vorgebracht, die zugleich Briefe an seine Weimarer Freunde darstellen:

... Den 6. Januar [1787, Rom]

... ich kann nun vermelden, dass Iphigenia endlich fertig geworden ist, d.h. dass sie in zwei ziemlich gleichlautenden Exemplaren vor mir auf dem Tische liegt, wovon das eine nächstens zu euch wandern soll. Nehmt es freundlich auf, denn freilich steht nicht auf dem Papiere was ich gesollt, wohl aber kann man erraten was ich gewollt habe. . .

... Den 10. Januar [Rom]

Hier folgt denn also das Schmerzenskind, denn dieses Beiwort verdient Iphigenia, aus mehr als einem Sinne. Bei Gelegenheit dass ich sie unter Künstlern vorlas strich ich verschiedene Zeilen an, von denen ich einige nach meiner Überzeugung verbesserte, die andern aber stehen lasse, ob vielleicht Herder ein paar Federzüge hineintun will. Ich habe mich daran ganz stumpf gearbeitet. . .

Und so hat mich denn diese Arbeit, über die ich bald hinauszukommen dachte, ein völliges Vierteljahr unterhalten und aufgehalten, mich beschäftigt und gequält. . .

Einen hübschen geschnittenen Stein lege ich bei, ein Löwchen, dem eine Bremse vor der Nase schnurrt... Ich wünsche, dass ihr damit künftig eure Briefe siegelt, damit, durch diese Kleinigkeit, eine Art von Kunstecho von euch zu mir herüber schalle...

... Den 16. Februar [Rom, *also mehr als fünf Wochen später*]

Die glückliche Ankunft der Iphigenia ward mir auf eine überraschende und angenehme Weise verkündigt. Auf dem Wege nach der Oper brachte man mir den Brief von wohlbekannter Hand, und diesmal doppelt willkommen mit dem Löwchen gesiegelt: als vorläufiges Wahrzeichen des glücklich angelangten Pakets. Ich drängte mich in das Opernhaus und suchte mir mitten unter dem fremden Volk einen Platz unter dem großen Lüster zu verschaffen. Hier fühlte ich mich nun so nah an die Meinigen gerückt, dass ich hätte aufhüpfen und sie umarmen können. Herzlich dank' ich, dass mir die nackte Ankunft gemeldet worden, möget ihr euer Nächstes mit einem guten Worte des Beifalls begleiten. . .

... Ich habe mich auf den Vorsaal ans Kamin gesetzt, und die Wärme... gibt mir frischen Mut, ein neues Blatt anzufangen, denn es ist doch gar zu schön, dass man mit seinen neusten Gedanken so weit in die Ferne reichen, ja seine nächste Umgebungen durch Worte dorthin versetzen kann. . .

... Den 20. Februar, Aschermittwoch [Rom, *unmittelbar vor der Abreise nach Neapel*]

... Dass Iphigenia angekommen, weiß ich; möge ich am Fuße des Vesuvs erfahren, dass ihr eine gute Aufnahme zuteil geworden. . .

... Neapel, den 3. März

... Mich freut, dass ihr nun mit der neuen Bearbeitung der Iphigenia euch befreundet; noch lieber wäre mir's, wenn euch der Unterschied fühlbarer geworden wäre. Ich weiß was ich daran getan habe und darf davon reden,

weil ich es noch weiter treiben könnte. Wenn es eine Freunde ist das Gute zu genießen, so ist es eine noch größere, das Bessere zu empfinden, und in der Kunst ist das Beste gut genug....

Aus diesen Brief-Stellen *Goethes* wird vor allem deutlich, wie sich das seelische Empfinden durch eine Raumdistanz verändert, wenn "Gespräche" nur noch durch Mitteilungen möglich sind, deren Hin- und Wiederrede viele Wochen beträgt, so dass die Antwort einen völlig anders gestimmten Menschen treffen muss als der Fragende gewesen ist - von der Spannung des Wartens einmal ganz abgesehen. Sind zunächst *Goethe* kritische Anmerkungen *Herders* offensichtlich besonders wichtig, so ist nach der Antwort aus Weimar 37 Tage später vor allem eine gewisse Enttäuschung zu spüren, dass es den entfernten Freunde nicht recht gelungen ist, gegenüber dem "Guten ... das Bessere zu empfinden". Außerdem fällt das Bedürfnis auf, die große, eine direkte Berührung verhindernde Distanz durch den Austausch von "Realien" abzumildern, die über die bloße Tinte auf dem Briefpapier hinausgehen: Die große Bedeutung von ganz materiellen Siegellack-Siegeln auf alten Dokumenten und Briefen dürfte sicher auch dadurch zu erklären sein, in unserem Fall noch dadurch gesteigert, dass das aus einem "hübschen geschnittenen Stein" gefertigte "Löwchen" als Siegel auch noch zu den fernen Freunden "wandern" muss, damit "eine Art von Kunstecho von euch zu mir herüber schalle".

Ein zweites Beispiel: als Ende des Jahres 1815 die Napoleonischen Kriege endgültig ihr Ende gefunden hatten, haben sich die im Pazifik operierenden britischen und französischen Flotten noch etwa drei Monate weiter bekriegt, weil es so lange dauerte, bis der Friedensschluss auch in dieser von Europa etwa 20 000 km entfernten Erdregion angekommen war. Als aktuelle *Gegenwart* konnte im Pazifik also erst ein Ereignis wirken, das in Europa, dem Ort seines Ursprungs, schon drei Monate *Vergangenheit* war. Das ist leicht zu verifizieren, denn drei Monate "Zeitverschiebung" sind $3 \cdot 30 \cdot 24 = 2160$ Stunden, für 20.000 km ergibt sich also die für die damals noch übliche Segelschiffpassage durchaus realistische Kurier-Geschwindigkeit von 9,3 km/h.

Wird auf diese Weise *Vergangenheit* an entferntem Ort zu aktueller *Gegenwart*, so sind materielle Geschwindigkeiten erforderlich. Dadurch ist – wie vor allem durch das *Goethe*-Beispiel deutlich wird - durchaus auch persönliche Anteilnahme möglich, die aber natürlicherweise mit zunehmendem Aktualitätsverlust zwischen *Gegenwart* an einem und *Vergangenheit* an anderem Orte mit der Zeit verblasst, so wie uns das bei jeder Erinnerung an Vergangenes geschieht. Stellen wir uns nun aber vor, die oben angegebene Geschwindigkeit von 9,3 km/h sei die tatsächlich höchst mögliche Geschwindigkeit, Distanzen materiell und auch für Informationen irgend welcher Art zu überwinden, so bedeutet das in unserer raum-zeitlichen Wirklichkeit, dass für eine Distanz von 20.000 km, also der größtmöglichen Entfernung auf unserer Erdoberfläche, die reale "*Wahrnehmungss-Gegenwart*" drei Monaten Dauer besitzt. Wir verstehen dann allerdings unter *Gegenwart* mehr als nur den abstrakten, mathematisch ausdehnungslosen Grenzpunkt zwischen dem negativen und positiven Abschnitt der Zeitachse, sondern den realen "Augenblick", den wir mindestens benötigen, um aus "*Wahrnehmungen*"

unserer Umgebung - zu denen im jetzt erweiterten Sinne auch Mitteilungen von fernen Orten gehören - mit unserem Denken irgend eine Erkenntnis zu gewinnen. Ergänzen wir die "Wahrnehmungs-Gegenwart" zu einer "Tat-Gegenwart", so dauert diese für die ganze Erdoberfläche (20.000 km Distanz) sogar die doppelte Zeit, nämlich sechs Monate: solange braucht es nämlich, bis aus einer in die Ferne abgesandten Mitteilung an deren Ursprungsort eine reale Tat werden kann. Die Quelle schöpferischer Freiheit ist für den Menschen im Zeitenlauf diese eben so genannte "Tat-Gegenwart", weil nur während dieser die aus einer Erkenntnis entstehende Tat noch nicht in die Welt entlassen und damit zu einem mir entzogenen objektiven Tatbestand geworden ist. In diesem Sinne scheint es eine unmittelbare Voraussetzung für die Evolution zur Freiheit des Menschen zu sein, dass er im beschriebenen Sinne seine Umwelt auf Regionen ausweitet, die ihm nicht "hier und jetzt", sondern nur mit einem "Aktualitätsverlust" zugänglich sind. Die Wichtigkeit, sich in seiner Lebens-Mitte durch die Flucht nach Italien eine in diesem Sinne deutlich ausgeweitete "Gegenwart" und Freiheit zu schaffen, ohne dadurch die Erfahrungen der Vergangenheit und die dabei geknüpften Beziehungen aufzugeben, ihnen aber auch nicht ständig mit dem Zwang der ungedämpften Nähe unmittelbarer Berührung ausgesetzt zu sein, das ist in seiner Biographie für *Goethe* besonders deutlich.

Das Grundmuster der Verflechtung von Raum und Zeit haben wir mit dieser Betrachtung der zweiten Stufe des menschlichen Umgebungskontaktes bereits umrissen, dennoch sind noch zwei weiteren Stufen zu beachten.

3. "Buschtrommel"-Telegraphie

Mit Hilfe der modernen Verkehrstechnik braucht die Zustellung von Briefen und anderen äußeren Zeichen der Zusammengehörigkeit (wie *Goethes* "Löwchen") über den Erdball heute deutlich weniger als drei Monate Zeit, das Prinzip aber hat sich für *diese* Art der Kommunikation nicht geändert, es geht jedoch jetzt und ging auch damals durchaus deutlich schneller, zunächst durch den vor allem von mehr oder weniger schriftlosen Kulturen praktizierten "*Buschtrommel-Telegraph*". Es ist bekannt, dass mit diesem Mittel in Afrika durch unwegsamstes Gelände Informationen mit einer Geschwindigkeit übermittelt werden konnten, die durch Überbringung von Briefen und Dokumenten durch Kuriere niemals zu erreichen war. Bei dieser Informationsübertragung fallen jetzt allerdings der übermittelte Inhalt (etwa der Angriff eines Nachbarstammes) und die materielle Realität des Mediums (der Schall der Trommeln) vollständig auseinander, und es ist ein Zeichencode zu verabreden, damit sich "Sender" und "Empfänger" überhaupt verstehen zu können.

Noch schneller als akustische sind optische Signale zu übermitteln, wie es uns die Natur bei der mit zunehmendem Abstand größer werdende Trennung von Blitz und Donner zeigt. So waren auch Signalübertragungen durch Rauch- und Feuerzeichen genauso wie die "Buschtrommel-Telegraphie" bereits bei Naturvölkern üblich. 1794 erbaute dann Claude Chappe die optische Telegraphen-Linie zwischen Paris und Lille, die aus Masten bestand, an denen die Stellung gut sichtbarer Flügel der

Kodierung diene. Und am Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelte sich dann die elektromagnetische Telegraphie und am Ende das Telefon. Bei allen optischen oder elektrischen Verfahren ist die Signalübertragungs-Geschwindigkeit nur noch durch die Kodierungs- und Dekodierungs-Prozesse innerhalb der Sender- und Empfänger-Stationen bestimmt, während im Raum zwischen den Stationen eine zeitlose Momentanübertragung festzustellen ist – jedenfalls für Entfernungen auf der Erdoberfläche und für alle Zeitintervalle, die durch die menschlichen Sinne noch wahrnehmbar sind².

Wir sind so nun aber bereits bei der letzten Stufe der Umgebungs-Erfahrung angekommen.

4. Die Lichtausbreitung

Im Prinzip ist auch mit “Blitz und Donner” durch die Natur bereits eine “kodierte Informationsübertragung” realisiert und beim donnerlosen Wetterleuchten ließe sich der sichtbare Blitz durchaus als “Code-Wort” für den aus Donner, Druckwelle, Licht und Hitze bestehenden Gewitterschlag verstehen, der aber in seiner Gesamtheit nicht Erlebnis werden kann, weil er an zu entferntem Ort stattfindet. Allerdings macht hier die “Decodierung” der “Botschaft” weder Arbeit noch Mühe, besteht sie doch nur aus einer Lichtwahrnehmung, die durch unserer “Lebenserfahrung” Gewittern gegenüber unmittelbar zu deuten ist. So entsteht also zwar ein für den Donner – sofern er überhaupt noch wahrnehmbar ist – ein oft erheblicher zeitlicher “Aktualitätsverlust”, das Lichtsignal aber erscheint uns unabhängig von der “Ereignisentfernung” stets “aktuell”, und gegenwärtig und auch in der Hin- und Wider-Rede am Telefon sind bei guter Übertragungstechnik selbst bei Interkontinental-Gesprächen *fast* keine unausgefüllten “Zeit-Löcher” zu bemerken, wie das durchaus der Fall ist, wenn man versucht, sich über eine Distanz von hundert oder mehr Metern (mit entsprechender Lautstärke) zu “unterhalten”..

Im Sprechfunk-Verkehr der Astronauten auf dem Mond mit der irdischen Bodenstation allerdings waren Gespräche durchaus schon etwas mühselig, dauert es doch mindestens $2\frac{1}{2}$ Sekunden, bis nach dem Ende einer Frage der Beginn einer Antwort bei dem Fragenden ankommen kann. Und bei großer Aufmerksamkeit ist ein derartiger “Aktualitäts-Verlust” von mehreren Zehntel Sekunden (und damit oberhalb der Wahrnehmungsgrenze) doch auch bei einem technisch optimal vermittelten Ferngespräch auf der Erde zwischen Neuseeland und Deutschland feststellbar, zumal derartige Verbindungen in der Regel über mehr als 40.000 km hoch fliegende “stationäre” Satelliten geführt werden. Wie wir zu Beginn bei der Darstellung von *Rømers* Ableitung der “Lichtgeschwindigkeit” gesehen haben summiert sich diese auf der Erde kaum bemerkbare Zeitspanne für die Jupitermonde immerhin auf etwa 1000 sec, und seit den Drehspiegel-Experimenten von *Foucault* des Jahres 1854 (von *Michelson* 1927 verbes-

²Dass es mit extrem kurzen Laserblitzen und extrem schnellen elektronischen Zählern heute möglich ist, Weitsprungentfernungen präzise mit Hilfe von Lichtlaufzeiten zu messen, bleibt in diesem Zusammenhang unberücksichtigt, weil nur als technischer Vorgang abseits jeder möglichen menschlichen Erfahrung von Bedeutung.

sert) ist bekannt, dass Messungen der ‘‘Lichtgeschwindigkeit’’ seit dem 19. Jahrhundert durch raffinierte Technik auch bereits innerhalb von Laborrumen durchführbar sind.

Seit dem Interferometer-Experiment von *Michelson* des Jahre 1881 und seinen vielfach verbesserten Wiederholungen der folgenden Jahrzehnte steht jedoch fest, dass es unmöglich ist, die Ausbreitung des Lichtes durch eine Geschwindigkeit im üblichen Sinne zu beschreiben, weil diese nämlich unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle oder des Beobachters stets genau denselben Wert annimmt. Daraus hat dann *Lorentz* 1904 seine ‘‘Lorentz-Transformation’’ abgeleitet, mit der die Raum-Zeitkoordinaten x', y', z', t' in einem Koordinatensystem zu berechnen sind, dass sich gleichförmig mit der Geschwindigkeit u in x -Richtung eines ruhenden Systems bewegt:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

welche die ‘‘Galilei-Transformation’’

$$x' = x - ut, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t \quad (2)$$

ersetzt und für $u^2 \ll c^2$ auch in diese übergeht. Eine genauere Analyse zeigte noch vor *Einsteins* entscheidenden Arbeiten, dass die für die Gesetze der Newtonschen Mechanik ‘‘forminvariante’’³ *Galilei-Transformation* keine entsprechende Forminvarianz für Maxwell'schen Gesetze der Elektrodynamik liefert, was aber von der *Lorentz-Transformation* geleistet wird. Alle *Einzelheiten* waren also bereits eingehend erforscht, dennoch bedurfte es noch der genialen Zusammenschau *Albert Einsteins* (1905), und schon im Titel seiner Arbeit ‘‘Zur Elektrodynamik bewegter Körper’’ wurde der Ausgangspunkt seiner Gedankenbildung und entscheidende Schritt deutlich, nämlich für ein modernes Physikverstandnis der Elektrodynamik das *Primat* über die Mechanik zu geben, während die Lorentz-Transformation, die vierdimensionale Raum-Zeit mit der Relativierung dieser Kategorien als *Folge* dieses Grundgedanken erscheint. In diesem Kontext ist auch die allgemeine Naturkonstante $c = 2,997925 \cdot 10^8$ m/s trotz ihrer Maßeinheit *keine* Geschwindigkeit sondern als $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ nur eine aus den elektrischen und magnetischen Feldkonstanten

$$\epsilon_0 = 8.854188 \times 10^{-12} \frac{As}{Vm} \quad \text{und} \quad \mu_0 = 1.256637 \times 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$$

zusammengesetzte grundlegende Konstante der Elektrodynamik ohne Geschwindigkeitscharakter und erst in *zweiter* Linie eine Konstante, die die Raum-Zeit-Beziehung in der vierdimensionalen Raum-Zeit (x, y, z, ict) beschreibt. Auch in den Gleichungen der Lorentz-Transformation (1) besitzt die Naturkonstante c *keinen* Geschwindigkeits-Charakter, erscheint sie doch nicht als Geschwindigkeit, sondern als die *Begrenzung* jeder real möglichen Geschwindigkeit, denn für $u = c$ werden die

³‘‘Forminvarianz’’ physikalischer Gesetze gegenüber einer Transformation bedeutet, dass diese Gesetze nach der Anwendung der Transformation die gleiche mathematische Form behalten.

Gleichungen singular und damit sinnlos. Auch die aus der Lorentz-Transformation folgenden Gleichungen für die *Längen-Kontraktion*

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (3)$$

(l_0 : Länge eines ruhenden Stabes, l : Länge desselben Stabes, der sich mit der Geschwindigkeit u am Beobachter vorbeibewegt), sowie der *Zeit-Dilatation*

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (4)$$

(T_0 : Zeitabstand zweier Signale von einem festen Punkt aus, T : Zeitabstand derselben Signale von einem mit der Geschwindigkeit u bewegten System aus) zeigen die Absurdität, c als reale Geschwindigkeit ansehen zu wollen: Für $u \rightarrow c$ verschwindet nämlich jede noch so große Länge und jedes noch so winzige Zeitintervall wird über jede Grenze groß. Für alle möglichen Geschwindigkeiten $u < c$ beschreiben die Gleichungen (3) und (4) dagegen genau die reale Raum-Zeit-Struktur einschließlich des beschriebenen “Aktualitätsverlustes”, der mit Raumdistanzen einhergeht und wofür c die für eine immaterielle Informationsübertragung realisierbare, Minimal-Grenze bedeutet. Nach diesen Überlegungen erscheint es sachgemäß, die “allgemeine Naturkonstante c ” nicht als Geschwindigkeit zu interpretieren, sondern als eine Größe anzusehen, die den Zusammenhang von Zeit, Raum und Geschwindigkeit beschreibt, in der sich die uns umgebende Welt zeigt.

Hier ist auch an die Untersuchungen der letzten Jahrzehnte über die Quantentheorie der Photonen als “Licht-Teilchen” zu erinnern: Die Photonen sind unter den Elementarteilchen die einzigen stabilen und masselosen “Bosonen”. Bosonen haben die Aufgabe der Kommunikation *zwischen* den Körpern der Welt und die Vermittlung ihrer Eigenschaften durch den Raum, sie stehen im Gegensatz zu den “Fermionen”, aus denen die materiellen Weltkörper aufgebaut sind, die aber ohne Bosonen isoliert und eigenschaftslos neben einander stehen würden. Den Photonen kann keinerlei physikalische Lokalität in Raum und Zeit zugeschrieben werden. Wird ihre Wirkung aber in einem bestimmten Moment oder an einem bestimmten Ort nachgewiesen – fast stets als Energie von Elektronen –, so sind sie als Photonen selbst verschwunden. Die wesentliche “Geste” des Photons ist es also, die Verbindung und den Zusammenhang der Dinge in Raum und Zeit zu vermitteln, ohne jedoch selbst materielle Raum-Zeit-Gestalt zu sein. Darauf wurde auch vom Autor dieses Aufsatzes schon hingewiesen – Schmidt (1996), (2000) – und genau das charakterisiert auch die Besonderheit des “Lichtäthers”, wie diese von Georg Maier (1977) im Anschluss an Schilderungen Rudolf Steiners entwickelt wurde und dieser selbst vor allem am Ende seines zweiten, aber auch dritten naturwissenschaftlichen Kurs (1920) und (1921) dargestellt hat. Damit aber stimmen auch die “Gedanken-Gesten” in den Gleichungen (3) und (4) überein, die darauf hin zielen, dass im Grenzübergang auf die Lichtgeschwindigkeit zu die

Räumlichkeit verschwindet und sich der Moment der *Gegenwart* über den gesamten Zeitenlauf ausdehnt ($l \rightarrow 0$ und $T \rightarrow \infty$).

In besonderer Weise beschreibt die ‐Lichtgeschwindigkeit‐ genannte Naturkonstante nun auch die Begrenzung des gesamten uns astrophysikalisch zugänglichen Kosmos: Die ‐Hubbel‐sche Expansionskonstante des Universums ergibt sich aus den gegenwärtig vorliegenden Beobachtungen zu $H = 70 \text{ km/sec/Mpc}$ ⁴. Das bedeutet, dass das Universum isotrop so expandiert, dass die mit dem Doppler-Effekt in den Spektren der fernen extragalaktischen Sternsysteme messbare Expansionsgeschwindigkeit pro Entfernungsvergrößerung von 1 *Mpc* um 70 *km/sec* zunimmt. Damit gibt es infolge der alle Geschwindigkeiten begrenzenden Naturkonstanten c zugleich eine Grenze aller Entfernungen im Universums, die in der im Großen isotropen Welt als ‐Grenzradius‐ r_g aufgefasst werden kann, welcher von allen Raumpunkten aus gleich sein muss - in ähnlicher Weise, wie auf der Erdkugel von jedem Ort aus alle möglichen Abstände durch 20.000 *km* begrenzt sind. Für das Universum ist diese Grenzentfernung dadurch gegeben, dass dort die Hubble‐sche Expansions-Geschwindigkeit ‐ c ‐ erreichen würde. Damit wird also $r_g = c/H = 4300 \text{ Mpc} = 1,3 \cdot 10^{23} \text{ km}$, und die zugehörige Begrenzung des raum-zeitlichen ‐Aktualitätsverlustes‐ t_g im oben beschriebenen Sinne für diese ‐kosmische Grenzentfernung‐ beträgt dann $t_g = r_g/c = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ sec} = 14 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$ und wird in der astrophysikalischen Kosmologie als ‐Weltalter‐ interpretiert, so wie r_g als Weltradius eines *fast* euklidisch gedachten Universums gilt, wobei immer noch nicht wirklich geklärt werden konnte, was das ‐*fast* euklidisch‐ genau zu bedeuten hat. Es zeigt sich also, dass jeder beliebige Beobachter in diesem Sinne Welt-Zentrum *ist*, ganz in dem Sinne, wie es *Rømer* bei der Beobachtung der Jupitermonde *erschien*, als ob diese einem ‐geozentrischen Prinzip‐ unterlägen. Es ergibt sich damit also sogar, dass uns die kosmologische Betrachtung des Lichtes in *diesem* Sinne genau genommen nicht nur zu einem geozentrischen, sondern sogar zu einem auf den Beobachter zentrierten ‐anthropozentrischen‐ Weltbild zurückgeführt hat. In einem solchen Kosmos der unorganischen Natur, wie er von *Rudolf Steiner* bereits 1886 als ‐eine in sich geschlossene Ganzheit‐ charakterisiert wurde, wobei es sinnlos ist, über eine physikalisch messbare Entfernung von r_g hinauszugreifen und in eine physikalisch zurückextrapolierte Vergangenheit von mehr als t_g zurückzudenken. Dieser Gedanke führt allerdings im Sinne dieser Betrachtungen auch zu der Konsequenz, dass der ‐Aktualitätsverlust‐ für Kommunikationen durch die Welt und damit, wie wir gesehen haben, die reale Gegenwart den *gesamten* Kosmos und seine Evolution umfasst, wenn allerdings auch nicht in individuell persönlicher, sondern in menschheitlich-kosmischer Bedeutung. Damit haben wir aber erneut den Punkt erreicht, wo sich wesentliche Hinweise *Rudolf Steiners* zum Fortwirken aller Stufen der kosmischen Evolution mit der modernen Kosmologie zusammenschließen, sofern man die Gestensprache und nicht nur die ‐gestenlos‐ statischen Zahlenergebnisse ihrer Gedankenwege beachtet:

⁴Bei einem Fixstern der Distanz von 1 *pc* (Parsec = Parallaxensekunde) bildet sich die Erdbahn um die Sonne als Ellipse von 1‐ (Bogensekunde) Radius am Himmel ab. 1 *Mpc* (Megaparsec) = $10^6 \text{ pc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ Lichtjahre} = 3,09 \cdot 10^{19} \text{ km}$.

Die Kosmologie der Gegenwart lehrt uns, das gesamte Universum sei von der "Reststrahlung" des Urzustandes der Welt durchsetzt, ohne dabei zwischen räumlicher Distanz und zeitlicher Vergangenheit unterscheiden zu können. - *Rudolf Steiner* weist schon 1911 darauf hin: "Was in der Saturnzeit [als dem Urzustand der Evolution] sich abgespielt hat, das ist nicht bloß dazumal gewesen, sondern das geht heute noch vor, nur wird es überdeckt, unsichtbar gemacht durch das, was heute äußerlich um den Menschen auf dem physischen Plan ist..."

Literatur

- [1] Einstein, A. (1905): Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 17, S.891.
- [2] Maier, G. (1977): Vom Erscheinungszusammenhang des Weltbildes am Licht." In: „Erscheinungsformen des ätherischen“, Hrsg. J. Bockemühl, Stuttgart, S. 57.
- [3] Schmidt, Th. (1996): Die Photonen in der Physik, die Potenzlehre des Aristoteles und das ‚Imponderable‘ nach Rudolf Steiner, Elemente d.N. 65, S.1.
- [4] Thomas Schmidt (2000): Polarität von Bosonen und Fermionen , und: Bemerkungen zum Zusammenhang vom Lichtäther mit der Quantentheorie des Lichtes, Physikerrundbrief 2, S.3 und S.5.
- [5] Steiner, R.(1886): Grundlinien einer Erkenntnistheorie der Goetheschen Weltanschauung, Dornach, GA2.
- [6] Steiner, R. (1911): Die Evolution vom Gesichtspunkt des Wahrhaftigen, GA 132, Dornach, 1. Vortrag.
- [7] Steiner, R.(1920): Zweiter naturwissenschaftlicher Kurs, GA 321, Dornach, vor allem 14. Vortrag.
- [8] Steiner R. (1921): Dritter naturwissenschaftlicher Kurs, GA 323, Dornach, vor allem 18. Vortrag.
- [9] Theilmann, F. und G. Maier (2004): Die Frage nach der Lichtgeschwindigkeit im Kontext der modellfreien Optik. Erscheint in MNU. Manuskript über den Verfasser.

Ein Versuch die Lorentz-Transformation zu verstehen

PETER SCHWAB

Wenn mich jemand in die projektive Geometrie der Ebene einführen will und mir erklärt, dass sich in der Ebene parallele Geraden schneiden, dann werde ich dagegenpochen bis zum Umfallen. Wenn nun dieser jemand mir sagt: “Du wirst mir doch zubilligen, dass ich mir unendlichferne Punkte *hinzudenke*.” Dann werde ich ihm antworten: “Ich kann denken und billige das gleiche auch Dir zu.” Wenn ich nun gesagt bekomme, dass diese unendlichfernen Punkte eine Gerade bilden, dann werde ich dagegenpochen. “Aber Du kannst mir doch nicht verbieten, die Gesamtheit der hinzugedachten Punkte als Ferngerade zu *bezeichnen*”, mag man mir entgegnen. “Das kann ich nicht und das will ich auch nicht”, werde ich antworten. Wenn man mir nun so kommt und sagt, dass die hinzugedachte Ferngerade eigentlich gar nicht ausgezeichnet sei, dass ihr vielmehr die gleiche Rolle zukomme wie den anderen Geraden, dann wissen Sie bestimmt schon, lieber Leser, was ich tun werde. –

Nun kommt jemand auf die Idee zu sagen: “Lasst uns einmal im dreidimensionalen Raum alle Geraden betrachten, die durch einen festgedachten Punkt gehen. Diese Gesamtheit sei das, was ich als projektive Ebene bezeichnen will. Ein Element dieser Gesamtheit ist zwar eine *Gerade* im dreidimensionalen Raum, ich will es aber auch zugleich als *Punkt* der projektiven Ebene ansprechen.” Damit können nun all die schönen Eigenschaften der projektiven Ebene gezeigt werden.¹

Die euklidische Geometrie wird so zum Schemel für die projektive Geometrie. Und wenn ich mich dann für die projektive Geometrie erwärme, vielleicht sogar eine Methode kennenlerne, diese Geometrie ohne Verwendung der euklidischen zu begründen, und fortan die euklidische Geometrie als Sonderfall der projektiven betrachte, so ist dies ein weiterer Grund zu sagen: Die euklidische Geometrie stimmt!

Nach meiner Meinung kommt nun der Galilie-Transformation für die Phoronomie eine entsprechende Bedeutung zu, wie sie der euklidischen Geometrie für die allgemeine Geometrie zukommt. Wenn ich den Begriff der Geraden bilde und zur Veranschaulichung auf die Visierlinie hinweise, und es stellt sich heraus, dass der Raum, in welchem wir leben, gekrümmt ist, so nehme ich doch von meinem ursprünglichen Begriff keinen Abstand. Auch dann nicht, wenn ich ihn verallgemeinere für krumme Räume. Ich bedarf einfach dieser starren gedanklichen Gebilde, um sie mit der Flexibilität der Natur vergleichen zu können.²

Mag sich nun die Existenz eines Äthers, in welchem sich ein Lichtsignal ausbreitet, bestätigen oder als irrig erweisen, ich möchte für meine Überlegungen diese These

¹Dies wird z. B. in [1] ausgeführt (Kapitel 4 “Projective Geometry” bis Definition 4.2.3). Dabei wird allerdings mit “Lichtstrahlen” argumentiert. Dass wir darauf verzichten können, hat Georg Maier in [2] dargestellt (Seite 49ff: Perspektive: Die bildliche Darstellung von Raumverhältnissen).

²Dieser von mir hier vertretene Standpunkt ist heute nicht mehr üblich. Ich nähere mich wieder der Auffassung von H.A. Lorentz und Fitzgerald [3] (Der Interferenzversuch Michelsons). An dieser Stelle möchte ich auch auf die anregenden Darstellungen beziehungsweise Diskussionen der speziellen Relativitätstheorie von F.W. Dustmann [4] und P. Gschwind [5] hinweisen.

wieder aufgreifen.³

Ich betrachte im folgenden nur eine räumliche Dimension. Seien also x, t die Koordinaten desjenigen Systems, in welchem sich ein Lichtsignal gemäß den Formeln $x = \pm ct$ ausbreitet, wenn es zur Zeit $t = 0$ am Ort $x = 0$ erzeugt wird. Zu diesem System bewege sich jemand mit der Geschwindigkeit v . Bezeichnen wir die Koordinaten des sich bewegenden Systems mit \bar{x}, \bar{t} , so ergibt die Galilie-Transformation:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - vt \\ \bar{t} &= t\end{aligned}\tag{1}$$

Während die Lorentz-Transformation zu den folgenden Koordinaten x', t' des sich bewegenden Systems führt.

$$\begin{aligned}x' &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}(x - vt) \\ t' &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\left(-\frac{v}{c^2} \cdot x + t\right)\end{aligned}\tag{2}$$

Ich frage nun danach, wie diese Transformation von der galileischen abweicht. Dazu drücke ich sie mit den galileischen Koordinaten aus.

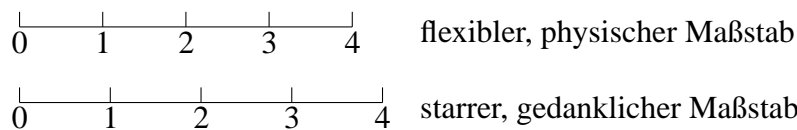
$$\begin{aligned}x' &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \bar{x} \\ t' &= -\frac{v}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \bar{x} + \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \bar{t}\end{aligned}\tag{3}$$

Da ich die Richtigkeit der galileischen Transformation innerhalb der ideellen Gedankenwelt nicht anzweifle, sehe ich den Grund dafür, dass die Lorentz-Transformation davon abweicht darin, dass sich *materielle* Dinge im *physischen* Raum bewegen. Materielle Dinge müssen nicht notwendig starr und der physische Raum muss nicht notwendig leer sein. Dies legt die folgende Interpretation der Ortstransformation nahe (Lorentz, Fitzgerald):

Durch die Bewegung relativ zum Äther schrumpft alle Materie etwas zusammen.⁴ Diese Kontraktion wird man nicht messen können, weil ja auch die Maßstäbe entsprechend schrumpfen. Denke ich mir aber einen Maßstab, der immun gegen diese Wirkung ist und ansonsten einem physischen Maßstab gleicht, ergibt sich im bewegten Bezugssystem folgendes Bild.

³Auch wenn ich das Wort Äther in Anlehnung an die Historie verwende, möchte ich jetzt nicht darüber spekulieren, inwieweit wir diesem Äther eine materielle Existenz zubilligen müssen. Hier ist lediglich ein ausgezeichnetes Bezugssystem gemeint, in welchem eine gewisse Raum-Zeit-Relation zwischen Erzeugung und Wahrnehmungs- bzw. Meßmöglichkeit eines Lichtsignals bestehen soll. Damit ist zugleich gesagt, was ich unter "Ausbreitung" eines Lichtsignals verstehe.

⁴Genauer: Sie schrumpft in der Dimension ihrer Bewegungsrichtung zusammen.



Die Abhängigkeit der Zeit vom Orte in der Lorentz-Transformation empfinde ich als Zumutung. – Wenn ich an jemanden denke, der entfernt von mir ist, und mich frage, wie es dieser Person geht, dann schwingt auch die Frage mit, wie es ihr jetzt gerade in diesem Augenblick geht. Da lasse ich mir von keiner Theorie einreden, die Gleichzeitigkeit hänge vom Eintreffen irgendwelcher Lichtsignale ab. Nein! Jetzt ist jetzt hier und überall! – Deswegen ignoriere ich zunächst den entsprechenden Ausdruck in (3) und setze

$$\begin{aligned} x' &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \bar{x} \\ \tilde{t} &= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \bar{t} \end{aligned} \quad (4)$$

Ich interpretiere dies so: Die Bewegung relativ zum Äther hat auch eine Auswirkung auf die Uhren – und somit wahrscheinlich auf sämtliche Prozesse. Sie laufen langsamer.

Das Lichtsignal $x = \pm ct$ werde durch diese Bewegung nicht beeinflusst. Ich nehme an, dass es sich innerhalb des Äthers immer mit der Geschwindigkeit c ausbreitet unabhängig davon, ob es jemand auslöst, der bezüglich des Äthers ruht oder sich bewegt. Die Koordinaten dieses Signals können auf das bewegte System umgerechnet werden (mit Hilfe der Gleichungen 1 und 4).

$$x' = \frac{c^2}{\pm c + v} \cdot \tilde{t} \quad (5)$$

Ein Forscher, der in diesem System (bei $x' = 0$) die Lichtgeschwindigkeit misst, indem er bei $x' \neq 0$ einen Spiegel aufstellt und die Zeit \tilde{t} bestimmt, bis ein ausgesandtes und reflektiertes Signal wieder bei $x' = 0$ wahrgenommen werden kann, kommt (gemäß der Gleichung 5) zu dem Ergebnis

$$\frac{2|x'|}{\tilde{t}} = c$$

Nun stelle ich mir zwei Forscher am Nullpunkt des bewegten Systems vor. Einer davon will mit einer Uhr hinaus in den Raum aufbrechen, um auch an einer Stelle $x' > 0$ das Zeitmaß einzuführen. „Halt! Halt!“, ruft ihm da sein Kollege zu, „Du als guter Physiker weißt doch, dass die Bewegung einer Uhr relativ zum Äther deren Lauf beeinflusst.“

Während du dich nach x' begibst, bewegst du dich anders relativ zum Äther als ich, und wenn du bei x' ankommst, wird deine Uhr nicht mehr synchron zu meiner laufen.“ „Ja verflucht! Was machen wir da?“, fragt der Forscher die Arme senkend. „Zum Glück habe ich hier eine Spritze. Die macht die Uhr gegen eine Laufveränderung, die durch zusätzliches Bewegen verursacht würde, immun.“, schmunzelt sein Kollege und pikst die Uhr. Der Forscher macht sich auf den Weg. Er ist nun aber tatsächlich ein guter Physiker, so dass er, bei x' angekommen, zu zweifeln anfängt. „Einer Uhr eine Spritze geben! Ich glaub’ man will mich verulken! Das kann doch nicht funktionieren!“, sagt er sich. Deshalb bittet er über Funk seinen Kollegen, der am Nullpunkt geblieben ist, exakt zur Zeit \tilde{t}_0 ein Lichtsignal zu senden, damit er auf seiner Uhr nachsehen kann, ob dieses um $\tilde{t}_0 + \frac{x'}{c}$ eintrifft. Er findet sein Misstrauen bestätigt, denn das Signal trifft (gemäß Gleichung 5) um $\tilde{t}_0 + \frac{c+v}{c^2} \cdot x'$ ein. Er richtet – *verstellt* – seine Uhr so, dass aus $\tilde{t}_0 + \frac{c+v}{c^2} \cdot x'$ die Zeit $\tilde{t}_0 + \frac{x'}{c}$ wird. Damit setzt er eine neue Zeit t' and der Stelle x' :

$$t' = \tilde{t} - \frac{v}{c^2} \cdot x'$$

Eine analoge Überlegung für den Fall, dass der Forscher sich nach einem Raumpunkt $x' < 0$ begibt, führt zu der selben Umrechnungsformel von \tilde{t} zu t' .

Die neu eingeführte Zeitkoordinate berechnet sich (mit den Gleichungen 4) zu

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

Das ist genau die Zeit-Transformation von (3), so dass es sich bei der neu eingeführten Zeit tatsächlich um die Zeit handelt, welche die Lorentz-Transformation vorschreibt.

Ich vermute nun folgendes. Den Äther gibt es wirklich – zumindest als ausgezeichnetes Bezugssystem. Die Widersprüche, die sich gegen eine Längenkontraktion und einer Prozessverlangsamung ins Feld führen lassen, beruhen darauf, dass diese Auswirkungen für jede Relativbewegung gedacht werden. Sie ereignen sich aber nur im Zusammenhang mit der relativen Bewegung zum Äther und sind relativ zu den gedachten galileischen Koordinaten zu verstehen. Die Maßnahme der “Uhrensynchronisation” mittels Lichtsignalen ist gar nicht so schlecht, in gewisser Hinsicht sogar genial. Sie ist anscheinend diejenige praktikable Methode, welche einer absoluten Synchronisation am nächsten kommt; man erhält dadurch eine in sich stimmige Ort-Zeit-Transformation und kann zudem die Ausbreitung eines Lichtsignals in seinem Bezugssystem angeben, ohne dazu die Geschwindigkeit relativ zum Äther kennen zu müssen. Schließlich haben wir auch auf der Erde verschiedene Zeitzonen vereinbart und eine kontinuierliche Änderung der “Zeitzone” ist von einem theoretischen Standpunkt aus eher gerechtfertigt als eine abrupte. Man hat dann aber die so eingeführte Zeit auch wirklich relativ aufzufassen – nämlich relativ zur Maßnahme der “Uhrensynchronisation”.

Dieser Aufsatz soll die Gedanken dokumentieren, die mich veranlasst haben mich mit der speziellen Relativitätstheorie so zu beschäftigen, dass dabei ein anderer Standpunkt eingenommen wird als heute üblich. Allerdings kann man zurecht einwenden,

dass ich hier schwerwiegende (unnötige) Voraussetzungen gemacht habe, um zu einem “Verständnis” der Lorentz-Transformation zu gelangen. Gerade ein solches Vorgehen kann leicht zu Verwirrungen führen. Wie etwa die, welche behauptet, die gemachten Voraussetzungen wären “bewiesen”, weil sich daraus ein Schluss ziehen lässt, den wir als richtig ansehen. In einem weiteren Beitrag will ich versuchen die Transformationsformeln der speziellen Relativitätstheorie herzuleiten und dabei solche Voraussetzungen möglichst zu vermeiden.

Von einem Standpunkt aber will ich nicht abrücken; und das ist der der globalen Zeit. Von diesem Standpunkt aus kann man die Kritik der Gleichzeitigkeit, welche Einstein in [3] (Zur Elektrodynamik bewegter Körper) vorbringt, so formulieren: Seien an voneinander entfernten Orten A und B zwei baugleiche Uhren gegeben, dann besitzen wir keine Methode zu bestimmen, ob diese Uhren absolut synchron laufen. Ich beharre aber darauf zu sagen: “Wir können uns an den Orten A und B synchron gehende Uhren *denken*.” Beide Aussagen widersprechen sich nicht. Wer die euklidische Geometrie nicht prinzipiell ablehnt, kommt zu einer solchen Zeitvorstellung, indem er im Gedanken, von zwei am Orte A befindlichen gleichen, parallelorientierten und synchronlaufenden Uhren ausgehend, eine Uhr parallel nach dem Ort B verschiebt und sich dabei die Uhren so laufend vorstellt, dass auch ihre Zeiger stets parallel sind. Hierbei wird von der euklidischen Raumvorstellung ausgegangen, der nur eine beschränkte physikalische Gültigkeit zukommen mag. Dies wird jedoch meiner Ansicht nach in der speziellen Relativitätstheorie noch nicht problematisiert, denn auch Einsteins Denkweise in [3] (Zur Elektrodynamik bewegter Körper) ist durchaus euklidisch.

Literatur

- [1] George A. Jennings: Modern Geometry with Application. Universitext, Springer Verlag ³1997.
- [2] Georg Maier: Optik der Bilder. Verlag der Kooperative Dürnau 1986.
- [3] H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski: Das Relativitätsprinzip. B. G. Teubner Stuttgart, 1974.
- [4] F.W. Dustmann: Was ist relativ in der Relativitätstheorie? Eigenverlag – Siegen 1993.
- [5] P. Gschwind: Raum Zeit Geschwindigkeit. Mathematisch-Astronomische Sektion, Dornach 1986.
- [6] A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Ann. d. Phy. 17, 1905.

Zum Ehrenfestparadoxon

VON HERMANN BAUER

Das Problem

Rotiert eine Scheibe um ihre Achse (d.h. die Achse, die rechtwinklig zu ihrer Ebene durch ihren Mittelpunkt geht), so muß sich infolge der Lorentzkontraktion ihr Umfang gegenüber dem Ruheumfang verkleinert sein, während ihr Radius gleich bleibt, was geometrisch unmöglich scheint.

Allerdings müssen dabei auch Zentripetalkräfte auftreten, die im allgemeinen von den elastischen Spannungen bewirkt werden und mit einer Dehnung der Scheibe (zum Ausgleich der Zentrifugalkräfte), verbunden sind und die bei derzeit erreichbaren Geschwindigkeiten den Radius sogar wesentlich stärker vergrößern, als die zu erwartende Lorentzkontraktion ihn zu verkürzen sucht. (Siehe M.v. Laue: *Die Relativitätstheorie, erster Band*, S. 43)

Es scheint also sinnvoll, daß man sich eine Vorrichtung denkt, welche die Spannungen (bzw. die Zentrifugalkräfte) ausgleicht. Dazu müßte man aber ihre genaue relativistische Größe kennen, die aber sicher nicht unabhängig von der Lorentzkontraktion ist, wodurch das Problem unübersichtlich wird, was ja auch die Fülle unterschiedlicher Lösungsversuche zeigt. (Siehe. J. Brandes *Die relativistischen Paradoxien und Thesen in Raum und Zeit*, Karlsbad 2001, S.110.)

Da das Problem in erster Linie theoretischer Natur ist, möchte ich es zunächst auch rein theoretisch angehen. *Wesentlich ist dabei, daß die rotierende Scheibe mit der ruhenden verglichen wird, man muß als ihre Beschleunigung mit einbeziehen.*

Definition

Unter dem „relativistisch-klassischen Unterschied“ verstehe ich den Unterschied, der sich rechnerisch für den Ablauf eines Vorgangs ergibt, wenn er bei gleicher physikalischer Konfiguration und gleichen Zahlenwerten der vorgegebenen physikalischen Größen einmal klassisch und einmal relativistisch berechnet wird.

Die Zeitdilatation, verglichen mit der klassischen Zeit, ist in diesem Sinne ein relativistischer Unterschied, denn bei klassischer Rechnung geht eine bewegte Uhr nicht langsamer als eine im gleichen Inertialsystem ruhende. Entsprechendes gilt für die Längenkontraktion.

Relativistisch-klassischer Unterschied bei einer Kreisbewegung

Auf einen kleinen Körper der Masse m (Massenpunkt), der zu Beginn ruht, wirkt eine konstante Kraft F_t immer in Richtung der augenblicklichen Geschwindigkeit. Gleichzeitig wirkt eine variable Kraft F_n senkrecht zur augenblicklichen Geschwindigkeit

und zwar so, daß der Körper bei klassischer Rechnung auf einer Kreisbahn mit dem Radius r läuft. Die Geschwindigkeit zur Zeit t ist dann:

$$v = \frac{F_t}{m}t = a_t t \quad (1)$$

Für F_n ergibt sich daraus: $F_n = mv^2/r = m(a_t t)^2/r$, also für die Zentripetalbeschleunigung :

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{(a_t t)^2}{r}. \quad (2)$$

Bei relativistischer Rechnung mit den gleichen Kräften (mit der gleichen Richtung bezüglich des Geschwindigkeitsvektors der Masse¹) gilt für die Geschwindigkeit die Gleichung (Siehe z.B. Falk , Ruppel, *Mechanik, Relativität, Gravitation*, S.356)

$$v' = \frac{a_t t}{\sqrt{1 + \left(\frac{a_t t}{c}\right)^2}}, \quad (3)$$

was man auch in folgender Form schreiben kann:

$$v' = a_t t \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2}. \quad (4)$$

Für die Zentripetalbeschleunigung erhält man

$$a'_n = \frac{F_n \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2}}{m} = a_n \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2} \quad (5)$$

wegen der relativistischen Massenzunahme. Daher bewegt sich der Körper auf einer Kurve. Ihr veränderliche Krümmungsradius ist:

$$r' = \frac{(v')^2}{a'_n} = r \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2} \quad (6)$$

Wenn die Kraft F_n nach der Zeit t zu wirken aufhört, so läuft der gedachte „klassische Körper“ mit der Geschwindigkeit v auf dem „klassischen Kreis“ mit Radius r , der wirkliche „relativistische Körper“ mit der Geschwindigkeit v' auf dem „relativistischen Kreis“ mit Radius r' .

Der Unterschied zwischen r' und r , ist dann nach meiner Definition ein relativistisch-klassischer Unterschied. Interessanterweise zeigt er also eine Verkürzung des Kreisradius *entsprechend* der Lorentzkontraktion (obwohl es sich natürlich nicht um eine solche handelt).

¹Es genügt praktisch, wenn F_t ständig in Richtung des „klassischen Kreises“ und F_n immer rechtwinkelig dazu wirkt. Die Unterschiede sind vernachlässigbar klein.

Mein Ergebnis hängt übrigen wesentlich mit dem Unterschied zwischen longitudinaler und transversaler Masse zusammen.

Man kann natürlich fragen, welche Bedeutung hier die klassische Rechnung überhaupt haben soll. Die Antwort ist, daß das Problem doch nur durch den Übergang von der klassischen zu relativistischer Physik entstanden ist. Man kann sich z.B. (natürlich unrealistisch) denken, daß die Lichtgeschwindigkeit zunähme und gegen Unendlich strebte. Dann würde immer mehr die klassische Rechnung gelten, und wenn dann die Lichtgeschwindigkeit wieder auf ihren jetzigen Wert verkleinert würde, würden die Änderungen dem relativistisch-klassischen Unterschied entsprechen.

Relativistisch-klassischer Unterschied beim Sonderfall einer Kreisringrotation

Ein Kreisring, der so dünn ist, daß er praktisch als Umfang des Kreises mit Radius r aufgefaßt werden kann, wird so in Rotation gebracht, daß jeder Punkt des Ringes bei klassischer Rechnung, (also nach klassischen Gesetzen) sich im Ring (entsprechend vorherigem Abschnitt) gleichmäßig beschleunigt auf dem Kreis mit Radius r bewegen würde, also auch eine elastische Ausdehnung (bei klassischer Rechnung!) nicht stattfindet (z. B. unter Einbeziehung einer elektrischen Aufladung und eines magnetischen Feldes. Siehe Brandes a.a.O., S. 91)

Nach vorherigem Abschnitt haben dann die wirkenden Kräfte bei relativistischer Rechnung die Tendenz, den Radius der Bahn jedes Punktes und damit den Radius des Ringes auf die Größe r' zu verkürzen. Die elastischen Kräfte des Rings könnten das allerdings behindern. Da sich aber der Ringumfang dabei auf $U' = 2\pi r \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2}$ zu verringern sucht, was auch durch die Lorentzkontraktion gefordert wird, ist zu *vermuten*, daß die Verkürzung als relativistisch-klassischer Unterschied auch wirklich eintritt. Lorentzkontraktion und Rotationswirkung sind also in diesem Spezialfall in Einklang.

Übergang zur Kreisscheibe

Es ist theoretisch möglich, wenn auch praktisch sicher schwierig, auch hier die Spannungen, die bei klassischer Rechnung auftreten auszugleichen, also eine Konfiguration herzustellen, bei der die wirkenden Kräfte jeden Punkt bei Gültigkeit der klassischen Gesetze auf einem Kreis gleichmäßig beschleunigen würden.

Dann gilt für jeden gedachten Kreisring, isoliert betrachtet, die Überlegung aus dem vorherigen Abschnitt. Allerdings können diese Ringe aufeinander wirken, denn es kommt nach diesen Überlegungen keine einheitliche Rotation der Scheibe zustande, da das Verhältnis von v' zu r' nicht konstant ist, also keine feste Winkelgeschwindigkeit entstehen kann.

Ob dabei Spannungen auftreten, könnte durch (sicher nicht einfache) Experimente untersucht werden. Da die Lorentzkontraktion so erstaunlich unabhängig vom Material

und damit von den elastischen Konstanten ist, müssen Spannungen nicht unbedingt auftreten.

Meine Überlegungen zeigen aber, daß kein Widerspruch zwischen der Gültigkeit der Lorentztransformation und der Rotation einer Scheibe besteht. Sie legen vielmehr nahe, daß man eine Scheibe nicht in Rotation *versetzen* kann, ohne daß im selben Maß eine Tendenz zur Radienverkürzung wie zur Umfangsverkürzung (durch die Längenkontraktion) besteht.

Die meist gemachte Überlegung, daß sich bei Rotation der Umfang verkürzen muß, die Radien aber nicht, übersieht, wie schon betont, daß man die Rotation erst *erzeugen* muß und daß dabei doch eine aus der relativistischen Betrachtung notwendige Radienverkürzung zumindest denkbar ist.

Man kann gegen meine Überlegungen einwenden, daß sie von unrealistischen, da „klassischen“ Kreisbewegungen ausgehe. Aber auch das Pradoxon setzt im Grunde eine klassisch rotierende Scheibe voraus und fragt dann, wie sich Radien und Umfang verhalten, macht also den gleichen „Fehler“.

(Email-)Adressen der Autoren

Hermann Bauer: HEBBauer@t-online.de.

Thomas Schmidt: thomas-cornelia.schmidt@t-online.de.

Peter Schwab: Schildbusch 20, DE-34369 Hombressen

Florian Theilmann: florian.theilmann@goetheanum.ch

