

Spezielle Relativität und Newtons Axiome

1 Einführung

Ein bekanntes Einstein-Zitat lautet: „Mache die Dinge so einfach wie möglich – aber nicht einfacher“.

Ziel dieser Arbeit ist es, dem Zitat folgend, zu untersuchen, wie weit man mit der klassischen Physik kommt, also den ersten beiden Newton'schen Axiomen, um die von der Experimentalphysik aufgezeigten und die aus Gedankenexperimenten abgeleiteten Phänomene zu erklären, die derzeit mit dem komplexeren Modell der Speziellen Relativitätstheorie erklärt werden.

Dazu muß zunächst festgehalten werden, daß die Annahme, daß sich Licht in jedem unbeschleunigten Koordinatensystem (nachfolgend KS) mit der konstanten Geschwindigkeit c fortpflanzt¹, und daß diese Geschwindigkeit von keinem mit Ruhemasse ausgestatteten Objekt erreicht werden kann, nicht erfordert, durch eine mathematische Operation, hier die Lorentz-Transformation, erzwungen zu werden. Die Natur sorgt selbst dafür (vgl. Abschnitt 5).

Die Vorstellung eines Raum-Zeit-Kontinuums mit einer geschwindigkeitsabhängigen Zeit [1] und (vermeintlich, vgl. Abschnitt 5) unterschiedlichen Sichten von Beobachtern in KS mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist damit nicht notwendig.

2 Bestätigung und Erweiterung des Relativitätsprinzips von Galilei

Aus der Experimentalphysik ist bekannt, daß Objekte mit endlicher Ruhemasse sich nicht bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen lassen, weil mit der Annäherung an diese ihre Masse immer mehr zunimmt. Damit ist die Begrenzung aller Objekte mit endlicher Ruhemasse auf Geschwindigkeiten unterhalb der Lichtgeschwindigkeit gewährleistet, eines zusätzlichen Begrenzungsmechanismus bedarf es nicht. Ein singulärer Fall ist der von Objekten ohne Ruhemasse, also etwa Photonen. Diese bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit in jedem KS und stellen damit insofern eine Ausnahme dar, daß sie sich entweder bewegen und eine endliche Masse besitzen oder sich nicht bewegen und damit ihre Existenz auf- und ihre Bewegungsenergie vollständig abgeben. Damit ist die Galileitransformation als lineare Additionsvorschrift von Geschwindigkeiten eines unbeschleunigten KS und von darin gleichförmig bewegten Objekten gegenüber einem ruhenden Beobachter weiterhin gültig.

Es besteht also keine Notwendigkeit für eine Modifikation oder eine Ersetzung des Galileischen Relativitätsprinzips.

3 Messung der Absolutgeschwindigkeit eines Bezugssystems

Bekanntlich ist man bisher der Auffassung, daß Geschwindigkeiten im Raum nur relativ gegen andere Objekte, aber mangels eines bekannten ruhenden Bezugssystems im Raum nicht absolut gemessen werden können. Man behilft sich dadurch, daß man ein Bezugssystem als unbeschleunigtes KS betrachtet, wenn es eine konstante Geschwindigkeit gegenüber weit entfernten Himmelsobjekten hat, was natürlich nicht exakt zutrifft, weil man nicht davon ausgehen kann, daß diese Objekte sich unbeschleunigt bewegen.

Modifiziert man die Vorstellung einer absoluten Geschwindigkeit im Raum als derjenigen, die gegen ein nicht bekanntes, ruhendes Bezugssystem gemessen wird, in der Weise, daß man ein Objekt als in Ruhe im Raum betrachtet, wenn es keine Geschwindigkeit gegenüber Licht hat, so ist das im Ergebnis gleichbedeutend mit der Messung gegen ein ruhendes Bezugssystem, da die Lichtgeschwindigkeit

¹ nachgewiesen auf der Erde (Michelson-Morley-Versuch), also in einem näherungsweise unbeschleunigten KS

isotrop und konstant ist. Die Geschwindigkeit eines Objekts gegen die Lichtgeschwindigkeit läßt sich messen: Ordnet man an einem Ende einer optischen Bank eine (Laser-) Lichtquelle und am anderen Ende einen Maßstab quer zur Bank an und dreht die Bank um ihre Hochachse, bis das Laserlicht in der Achse der Bank verläuft, so besitzt die Bank quer zu ihrer Ausrichtung keine Geschwindigkeitskomponente. Dreht man nun die Bank um 90°, so ist die Abweichung des Lichtstrahls von der Achse der Bank ein Maß für ihre Geschwindigkeitskomponente in der Ebene ihrer Ausrichtung:

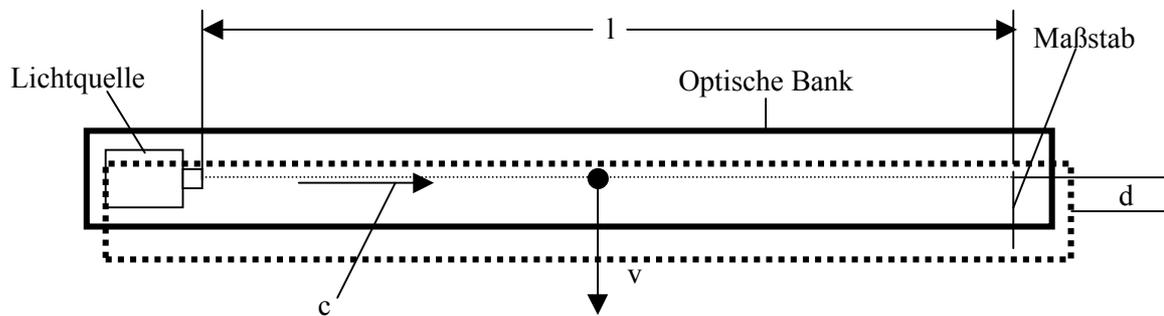


Bild1: Geschwindigkeitskomponente v der optischen Bank in ihrer Ausrichtungsebene relativ zu Licht

$$\frac{v}{c} = \frac{d}{l} \quad (1)$$

Wiederholt man das Verfahren in den beiden anderen orthogonalen Koordinatenrichtungen, so hat man die Relativgeschwindigkeit der Bank zum Licht und damit ihre Absolutgeschwindigkeit im Raum ermittelt.

Damit kann man die Definition eines unbeschleunigten KS exakter machen: Es ist dann definiert durch seine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit relativ zur Lichtgeschwindigkeit, und die Abweichungen der Bewegung eines Bezugssystems auf einem realen Objekt wie z.B. der Erde gegenüber einem unbeschleunigten KS können mit obiger Meßmethode durch Aufnahme einer Bahnkurve bestimmt werden.

4 Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit

Der von der SRT vorausgesagte Massenzuwachs eines Objekts mit endlicher Ruhemasse bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit, der durch zahlreiche Experimente bestätigt wurde, läßt sich auch mit der klassischen Newtonschen Physik zeigen, wenn man noch die Erkenntnis berücksichtigt, daß Masse und Energie äquivalent sind, wofür es vielfache Bestätigungen aus der Hochgeschwindigkeits-Teilchenphysik gibt.

Eine beschleunigte Masse gewinnt Geschwindigkeit und kinetische Energie; letztere ist einer zusätzlichen Masse äquivalent, die bei weiterer Beschleunigung mitbeschleunigt werden muß und dafür zusätzliche Energie erfordert. Damit wird die Masse geschwindigkeitsabhängig mit einem Minimum, der Ruhemasse, bei der Absolutgeschwindigkeit Null. Wegen der geschwindigkeitsabhängigen Masse gilt das Newtonsche Beschleunigungsgesetz (zweites Newtonsches Axiom) allerdings jetzt nur noch in der Impulsform. Wenn wir nun den infinitesimalen Zuwachs an kinetischer Energie bei einem infinitesimalen Beschleunigungsschritt als infinitesimalen Massenzuwachs auffassen, der beim nächsten Beschleunigungsschritt mitbeschleunigt werden muß, ergibt sich durch die entsprechende Integration der dies beschreibenden Differentialgleichung bis zur Lichtgeschwindigkeit der Massenzuwachsfaktor γ und die Einsteinsche Masse-/Energieäquivalenz ganz aus der klassischen Newtonschen Physik ohne die Notwendigkeit zur Annahme unterschiedlicher

Sichten des ruhenden und des mitbewegten Beobachters und damit zur Relativität der Zeit (Anhang, 12.1).

5 Sichten des ruhenden und des mitbewegten Beobachters

Zur Illustration der unterschiedlichen Sichten wird häufig das Beispiel von Bild 2 benutzt, wo sich zwei Raumschiffe mit gleicher, annähernd Lichtgeschwindigkeit auf gleicher Höhe und auf Parallelkurs bewegen. Im mitbewegten KS befinden sie sich in Ruhe.

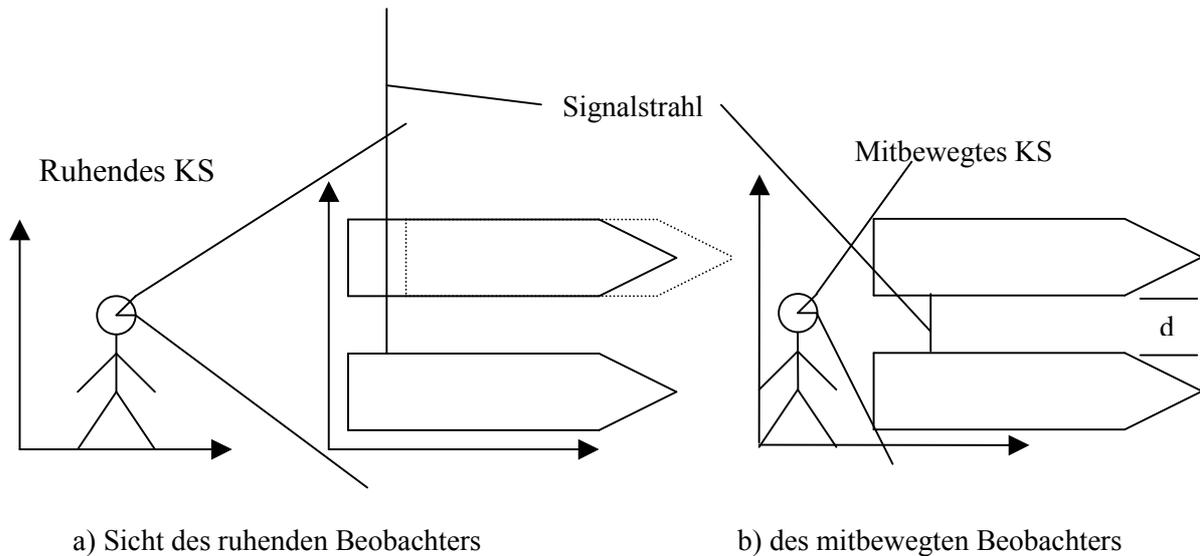


Bild 2: Sichten a) des ruhenden und b) des mitbewegten Beobachters auf zwei Raumschiffe auf Parallelkurs mit annähernd Lichtgeschwindigkeit nach gängiger Lehrmeinung

Die gängige Lehrmeinung ist: Da die Raumschiffe sich im mitbewegten KS in Ruhe befinden, können sie z.B. mit einem Lichtstrahl quer zu ihrer Flugrichtung kommunizieren. Für den entfernten ruhenden Beobachter hingegen verschwindet der Signalstrahl hinter dem angefunkten Raumschiff im All, da sich dieses weiterbewegt, während der Signalstrahl unterwegs ist. Diese Diskrepanz ist die Begründung für die Annahme einer relativen Zeit und die Anwendung der Lorentztransformation für den Übergang vom ruhenden zum mitbewegten Koordinatensystem.

Nun sollte aber das Ergebnis eines physikalischen Vorgangs für zwei Beobachter unabhängig von ihrem Bewegungszustand schon das gleiche sein. Hier jedoch erhält für den mitbewegten Beobachter das zweite Raumschiff die übermittelte Information, für den entfernten ruhenden Beobachter hingegen nicht. Oder an einem drastischen Beispiel erläutert: Ein Mensch in einem Raumschiff schießt mit einer Laserpistole auf einen anderen ihm quer zur Flugrichtung gegenüberstehenden und trifft ihn tödlich. Da das Raumschiff hinreichend schnell war, sieht der ruhende entfernte Beobachter den tödlichen Laserstrahl hinter der Zielperson vorbeigehen und vielleicht ein Loch in die Raumschiffwand brennen. Für ihn erfreut sich der „Erschossene“ bester Gesundheit, während nun, im Gegensatz zur Sicht des mitbewegten Beobachters, das Raumschiff beschädigt ist.

Ein weiteres Gedankenexperiment zeigt, daß die Annahme falsch ist, der mitbewegte Beobachter sähe unabhängig von seiner Geschwindigkeit das, was er auch in Ruhe sähe: Schickt jemand von hinten im Raumschiff einen Lichtimpuls in Flugrichtung auf einen Spiegel weiter vorne, so kommt der reflektierte Impuls nach gängiger Lehrmeinung aus der Sicht des Senders, der sich relativ zum Raumschiff in Ruhe befindet, nach einer Laufzeit, die sich aus dem doppelten Abstand von Person und Spiegel und der Lichtgeschwindigkeit ergibt, zu ihr zurück. Das jedoch ist unmöglich: die Lichtgeschwindigkeit ist absolut, d.h. das ausgesendete Licht bewegt sich für den entfernten ruhenden und den mitbewegten Beobachter genau gleich. Ersterer sieht, wie sich das Licht bewegt und der

Sender ihm nacheilt, der andere sieht, wie sich das ausgesendete Licht langsam von ihm fortbewegt. Der Spiegel hat die gleiche Geschwindigkeit wie der Lichtsender und damit (fast) die gleiche Geschwindigkeit wie das emittierte Licht in der Richtung des Lichtes. Es wird ihn deshalb erst nach langer Zeit erreichen. Das aber ist genau das, was auch der entfernte ruhende Beobachter sehen würde. Entsprechend würde den Beobachter im Raumschiff auch kein Signal von „hinten“ mehr erreichen können. Daraus jedoch zu schließen, daß im Raumschiff die Zeit stillstehe, ist absurd.

Der Fehler liegt in der Annahme, daß in einem bewegten KS Bewegungen in diesem KS für den mitbewegten Beobachter unabhängig von der Absolutgeschwindigkeit des KS immer gleich aussähen. Dies setzt voraus, daß sich die Geschwindigkeitsvektoren des KS und die der bewegten Objekte darin addieren. Dies ist aber gerade bei Licht wegen seiner absoluten Geschwindigkeit nicht so.

6 Längenkontraktion

Ein Objekt, das sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, erfährt nach der SRT in Flugrichtung eine Längenverkürzung um den Faktor $\frac{1}{\gamma}$ (vgl. [2]). Mit Annäherung an die

Lichtgeschwindigkeit geht seine Länge also gegen Null, seine Masse gegen unendlich. Das würde ein Schwarzes Loch ergeben, was auch bei den größten Teilchenbeschleunigern bisher, wenn auch befürchtet, aber noch nicht beobachtet worden ist. Eine scheinbare Längenkontraktion um die Hälfte läßt sich jedoch mit optischen Regeln ableiten (Anhang, 12.2).

7 Myonen

Myonen entstehen in etwa 10 km Höhe durch Zusammenstoß energiereicher Höhenstrahlung mit Luftmolekülen und haben bei ihrer Entstehung eine Geschwindigkeit sehr nahe bei der Lichtgeschwindigkeit. Sie haben eine mittlere Lebensdauer in Ruhe von ca. 2,2 Mikrosekunden (zum Meßverfahren vgl. z.B. [3]).

Mit dieser Lebensdauer, die einer zurückgelegten Flugstrecke bis zum Zerfall von ca. 660 m entspricht, sollten auf der Erdoberfläche keine Myonen nachgewiesen werden können, was aber nicht der Fall ist. Um die Erdoberfläche ohne Reduzierung ihrer Geschwindigkeit zu erreichen, wäre aber eine Lebensdauer von 33 Mikrosekunden erforderlich, und da die Myonen auf ihrem Weg durch die Atmosphäre zweifellos gebremst werden, tatsächlich noch erheblich mehr.

Es wird nun argumentiert, da die Myonen bei ihrer Entstehung fast Lichtgeschwindigkeit besitzen, daß sie nach der SRT eine Lebensdauer hätten, die um den Faktor λ größer sei als die Lebensdauer in Ruhe, also gemäß einer Ermittlung der Lebensdauer an relativistischen Myonen im Speicherring eine solche von ca. 64 Mikrosekunden [4]. Mit dieser größeren Lebensdauer könnten die Myonen die Erdoberfläche erreichen. Eine Rückrechnung über γ führt dann ebenfalls auf ca. 2 Mikrosekunden für Myonen in Ruhe, und dies wird als glänzende Bestätigung der SRT gewertet.

Zweifellos haben die Myonen eine geschwindigkeitsabhängige Lebensdauer, jedoch ist dies eine indirekte Abhängigkeit, die nichts mit einer geschwindigkeitsabhängigen Zeitdilatation zu tun hat.

Die Zerfallsreihe z.B. eines negativen Myons ist dieselbe, ob es bei nahezu Lichtgeschwindigkeit oder in Ruhe zerfällt: ein Elektron, ein Photon, ein Myonen- und ein Anti-Elektronenneutrino. Diese Teilchen sind aber in Ruhe mit viel weniger Masse versehen als wenn das Myon noch bei fast Lichtgeschwindigkeit zerfällt. Wäre der Massenverlust beim Zerfall in beiden Fällen derselbe, würde die Ruhemasse des Myons den Massenverlust gar nicht abdecken können, d.h. das Myon müßte vollständig in γ -Strahlung umgewandelt werden.

Der Massenverlust und damit die Bindungsenergie ist also bei „hohen“ Geschwindigkeiten erheblich größer als in Ruhe, und da die Zerfallswahrscheinlichkeit mit höherer Bindungsenergie sinkt, steigt die

Lebensdauer. Nimmt man nun an, und das ist eine Hypothese, die aber mindestens genau so viel, wenn nicht mehr Berechtigung hat als die SRT, daß die mittlere Lebensdauer eines Myons seiner Masse, einerseits in Ruhe, andererseits bei der Geschwindigkeit seiner Entstehung, proportional ist, so ist der Faktor der Massen- und der Lebensdauerzunahme identisch, nämlich der Lorentzfaktor γ . Das Ergebnis für die geschwindigkeitsabhängige Lebensdauer der Myonen ist also dasselbe wie bei der SRT, nur muß dazu keine relativistische Annahme getroffen werden. Diese Hypothese kann beurteilt werden, wenn es gelungen ist, das Standardmodell der Teilchenphysik um die Teilchenmasse zu erweitern. Bis dahin stehen sich diese Hypothese und die SRT auf gleicher Ebene gegenüber: beide sind Hypothesen.

8 Atomuhr im Flugzeug

Das Experiment mit einer Atomuhr im Flugzeug im Vergleich zu einer identischen am Boden, bei dem ein geringes Nachgehen der Uhr im Flugzeug nachgewiesen wurde, scheint die Zeitdilatation mit der Geschwindigkeit zu stützen. Dieser Versuch aus dem Jahr 1971, der von Hafele und Keating durchgeführt wurde [7], enthält derart gravierende Mängel, die zumindest teilweise später auch von seinen Urhebern eingeräumt wurden, daß er nicht ernst genommen werden kann. Außerdem ist zu bedenken, daß die Voraussetzung, daß sich die Uhren in unbeschleunigten KS befinden, bei beiden nicht erfüllt ist, und daß das Anheben der Uhr im Flugzeug von der Erdoberfläche auf die Flughöhe im Gravitationsfeld der Erde dieser Uhr (potentielle) Energie zugeführt, sie also an Masse zugenommen hat, wobei die zugeführte potentielle Energie bei einer Fluggeschwindigkeit von 250 m/s und einer Flughöhe von 10 km ungefähr 1,5 mal größer ist als die kinetische und damit gegenüber jener die wesentlichere Rolle spielt.

Es werden Zeitdilatationen von ungefähr zweihundertfünfzig Nanosekunden bei Flugdauern von 65 Stunden und mehr berichtet, was bei einer Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne von ca. 30 km/s eine Zeitdilatation (Differenz der Erduhr, 30 km/s, zu Flugzeuguhr, 30,25 km/s) nach der SRT von ca. 0,09 ns/s ergeben würde, also eine Zeitdilatation pro Stunde Flugzeit gegenüber der Uhr auf der Erde von 324 ns, eine Zeitdifferenz, die aber beim Versuch nicht mit einer, sondern mit 65 Stunden Flugdauer erreicht wurde. Da die Umlaufgeschwindigkeit der Sonne um das Milchstraßenzentrum aber noch viel höher ist (270 km/s), ergibt die korrekte SRT-Berechnung eine viel höhere (zehnfache) Zeitdilatation.

9 Zwillingsparadoxon

Hierunter versteht man folgendes Gedankenexperiment: Ein Zwillingsbruder begibt sich auf eine Raumfahrt geradlinig von der Erde weg und mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit, dreht um, nachdem z.B. fünf Jahre auf seiner Uhr vergangen sind, und kommt nach zehn Jahren wieder auf der Erde an. Er ist nach seiner Uhr zehn Jahre älter geworden, stellt aber verwundert fest, daß sein auf der Erde gebliebener Bruder jetzt wesentlich älter ist als er. Nach der SRT läuft die Zeit in Systemen, deren Geschwindigkeit nicht klein gegen die Lichtgeschwindigkeit ist, langsamer als in Systemen in Ruhe, und deshalb ist er weniger schnell gealtert als sein Bruder.

Mit Hilfe einer (x,t)-Darstellung läßt sich leicht überprüfen, ob diese Aussage zutrifft (Bild 3).

Wir dimensionieren die t-Achse so, indem wir sie mit der Lichtgeschwindigkeit multiplizieren, daß sich die gleiche Wegstrecke pro Zeiteinheit ergibt wie auf der x-Achse, wenn man sich in ihrer Richtung mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Ein Objekt, das sich örtlich in Ruhe befindet, bewegt sich also auf oder parallel zu der Zeitachse, eines, das sich örtlich bewegt, sowohl in Richtung der Zeit- als auch der Ortskoordinate, und könnte es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, auf einer $\pm 45^\circ$ -Geraden.

Verfolgen wir nun die beiden Brüder: A bleibt auf der Erde zurück und „bewegt“ sich auf der t-Achse. B bewegt sich mit hoher, gegen die Lichtgeschwindigkeit nicht zu vernachlässigender Geschwindigkeit ab $t=0$ und in positiver x-Richtung geradlinig von der Erde weg, d.h. er bewegt sich

auf einer Ursprungsgeraden, die weniger als 45° gegen die t-Achse geneigt ist. Er sendet nach seiner Uhr jede Sekunde einen Funkpuls an A. Da er sich von A schnell entfernt, wird die Laufzeit jedes nachfolgenden Funkpulses größer und jeder Puls kommt deshalb bei A mehr als eine Sekunde später als der vorige an. Für A sieht es so aus, als ob die Zeit im Raumschiff von B langsamer laufe als bei ihm auf der Erde. Man kann das Ganze auch umdrehen und A funken lassen. Dann hat B den Eindruck, bei A liefe die Zeit langsamer.

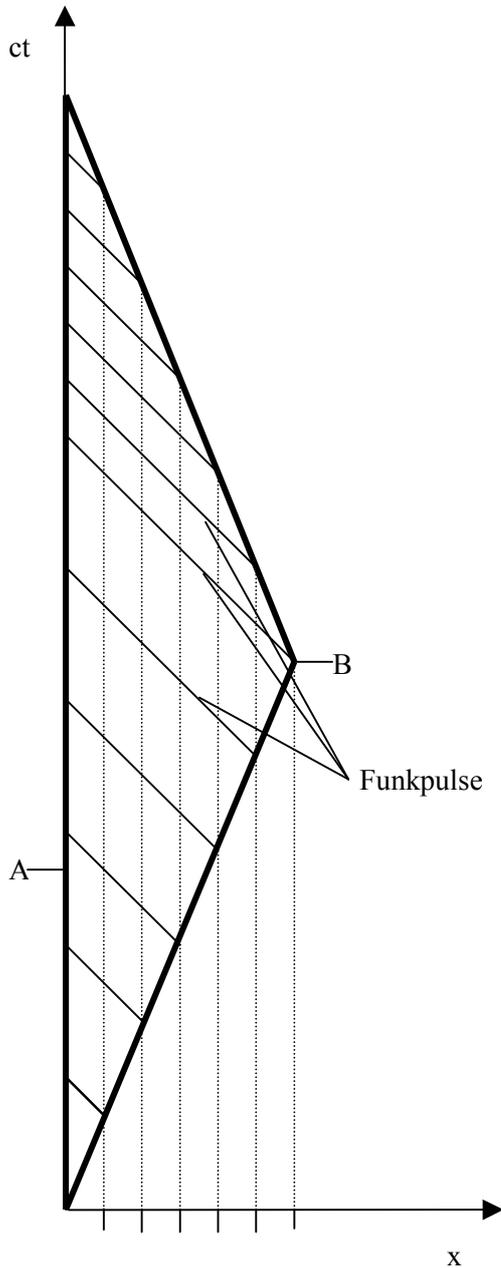


Bild 3: Weltlinien der Zwillingen beim Zwillingsparadoxon

Der Zeitdehnungsfaktor ergibt sich nach der SRT als Bondischer Faktor k ($k = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$, vgl. [5]).

Wenn das Raumschiff sich auf den Rückweg macht, bewegt es sich auf einer gegen die t-Achse um weniger als -45° geneigten Geraden. Nun kommen die Funkpulse von B bei A im Abstand von

weniger als einer Sekunde an. Nach Paus [5] ist der Verkürzungsfaktor $\frac{1}{k}$. Demnach vergeht, wenn B auf beiden Hälften der Raumfahrt je n Pulse geschickt hat, für ihn die Zeit

$$t = 2nT$$

und für den Bruder A

$$t' = n\left(k + \frac{1}{k}\right)T \equiv 2nT\gamma \geq t$$

Wie man leicht erkennt, ist jedoch der Zuwachs an Laufzeit der Funkpulse nicht multiplikativ, sondern additiv der zwischen zwei Pulsen gewachsenen Entfernung des Raumschiffs proportional, $\Delta t = \frac{v}{c}T$,

und bei der Rückfahrt gilt das gleiche für die Verringerung der Laufzeit:

$$t' = n(T + \Delta t) + n(T - \Delta t) \equiv t$$

Das „Zwillingsparadoxon“ entpuppt sich damit als ein logischer Fehler beim Gedankenexperiment, wobei erstaunlich ist, daß dieser trotz dessen hohen Alters nicht früher aufgefallen ist.

10 Wesentliche Folgerungen

Um die Phänomene zu beschreiben, die bei hohen, gegen die Lichtgeschwindigkeit nicht zu vernachlässigenden Geschwindigkeiten auftreten, ist es nicht nötig, die Zeit als relativ anzunehmen. Vielmehr genügt das zweite Newtonsche Axiom völlig (vgl. Anhang, 12.1), zumal die offensichtlich falsche Folgerung der SRT, bei genügender Annäherung eines Objekts mit endlicher Ruhemasse an die Lichtgeschwindigkeit ginge seine Ausdehnung in Bewegungsrichtung gegen Null, ersetzt wird durch eine scheinbare Verkürzung auf die Hälfte, die durch die optischen Gesetze zwanglos erklärt wird. Hinzu kommt, daß das Gedankenexperiment (Abschnitt 5), das die Vorstellung einer relativen Zeit begründet, fehlerhaft interpretiert wurde.

11 Ausblick

Die Rückkehr zu einer absoluten Zeit hat erhebliche Auswirkungen auf die Astronomie und Kosmologie. Es ist deshalb jede Modellvorstellung zu überprüfen, wo die Relativität der Zeit eine Rolle spielt, insbesondere daraufhin, ob man ohne die Annahme relativer Zeit alle beobachteten Phänomene befriedigend erklären und mit Hilfe der klassischen Physik brauchbar modellieren kann, also das berühmte „Ockham's razor“ anzuwenden. Insbesondere ist da an die Feldtheorien wie z.B. die Allgemeine Relativitätstheorie sowie an die bekanntesten Folgerungen (z.B. „Schwarze Löcher“) zu denken.

12 Anhang

12.1 Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit, bestimmt mit dem zweiten Newtonschen Axiom

Aus Experimenten mit Teilchenbeschleunigern ist bekannt, daß sich Teilchen mit nicht verschwindender Ruhemasse nicht bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen lassen, sondern bei Annäherung immer schwerer werden mit einem Pol der Masse bei der Lichtgeschwindigkeit. Dies wird durch die SRT bestätigt, nach der das Verhältnis γ von geschwindigkeitsabhängiger Masse zu Ruhemasse

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

ist. Außerdem ist bekannt, ebenfalls aus Versuchen mit Teilchenbeschleunigern, daß Masse und Energie zueinander äquivalent sind, weil die eine in die andere umgewandelt werden kann:

$$E \sim m = C \cdot m \quad (2)$$

Eine beschleunigte Masse gewinnt Geschwindigkeit und kinetische Energie; letztere ist gemäß (2) einer zusätzlichen Masse äquivalent, die bei weiterer Beschleunigung mitbeschleunigt werden muß und dafür zusätzliche Energie erfordert. Damit wird die Masse geschwindigkeitsabhängig mit einem Minimum, der Ruhemasse, bei der Absolutgeschwindigkeit Null, die wir nach Abschnitt 3 aus der zu messenden Absolutgeschwindigkeit v der Masse und γ bestimmen können. Wegen der geschwindigkeitsabhängigen Masse gilt das Newtonsche Beschleunigungsgesetz allerdings jetzt nur noch in der Impulsform ,

$$K = \frac{dp}{dt} \equiv \frac{d(mv)}{dt} \quad (3)$$

Der Zuwachs an kinetischer Energie für eine infinitesimale Geschwindigkeitserhöhung ist dann

$$K = \frac{d(mv)}{ds} \frac{ds}{dt}$$

$$K ds \equiv dE_{kin} = v d(mv)$$

$$dE_{kin} = v^2 dm(v) + \frac{1}{2} m(v) dv^2 \quad (4)$$

Dieser Energiezuwachs ist einem infinitesimalen Massenzuwachs äquivalent, der beim nächsten (infinitesimalen) Beschleunigungsschritt mitbeschleunigt werden muß (vgl. (2)):

$$dE_{kin} = C dm(v) \quad (5)$$

Aus (4) und (5) ergibt sich

$$C dm(v) = v^2 dm(v) + \frac{1}{2} m(v) dv^2$$

$$(C - v^2) dm(v) = \frac{1}{2} m(v) d(v^2)$$

$$\frac{dm(v)}{m(v)} = \frac{1}{2} \frac{d(v^2)}{C - v^2} \equiv -\frac{1}{2} \frac{d(1 - \frac{v^2}{C})}{1 - \frac{v^2}{C}} \quad (6)$$

Integriert man (6) von $v=0$ bis v , so ergibt sich nach kurzer Zwischenrechnung

$$\frac{m(v)}{m(v=0)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{C^2}}} \quad (7)$$

Teilchen mit endlicher Ruhemasse lassen sich nicht bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, wie aus Experimenten mit Teilchenbeschleunigern hervorgeht. Ihre Masse wächst bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit über alle Grenzen, d.h. die Masse hat für $v=c$ einen Pol. Daraus folgt:

$$1 - \frac{v^2}{C^2} = 0 \text{ für } v=c, \text{ also } C = c^2$$

Damit wird

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8)$$

und mit (2)

$$E = mc^2 \quad (9)$$

Das ist exakt die Beziehung für m , die sich auch aus der SRT unter Anwendung der Lorentztransformation ergibt, ohne daß hier eine Annahme zu unterschiedlichen Sichten des ruhenden und des mitbewegten Beobachters und damit zur Relativität der Zeit erforderlich war, und für E aus Einsteins Fotoemissionsversuch [6], wobei beide Beziehungen aus der klassischen Newtonschen Mechanik abgeleitet wurden.

12.2 Scheinbare Längenkontraktion bei Annäherung eines Objektes an die Lichtgeschwindigkeit

Unsere optische Wahrnehmung macht sich ein (Moment-)Bild aus den optischen Informationen, die gleichzeitig beim optischen Empfänger, dem Auge, ankommen.

Wie sind da die Verhältnisse bei einem länglichen Objekt wie z.B. einer Rakete, die von uns wegfliegt? Die Spitze der Rakete ist um ihre Länge weiter von uns entfernt als ihr Heck, und deshalb hat das Licht von der Spitze bis zu unserem Auge einen längeren Weg als das Licht vom Heck. Gleichzeitig sieht das Auge also das Licht, das vom Heck zu einem Zeitpunkt t_1 emittiert wurde und von der Spitze zu einem so viel früheren Zeitpunkt t_0 , daß bis zum Zeitpunkt t_1 das Licht von der Spitze bis zum Heck gelangen konnte. Man sieht also ein Bild vom Heck der Rakete zum Zeitpunkt t_1 und von der Spitze zum früheren Zeitpunkt t_0 . Da sich die Rakete im Zeitintervall $t_1 - t_0$ weiter vom Auge entfernt hat, sieht man also eine verkürzte Rakete. Bild 4 mag dies verdeutlichen:

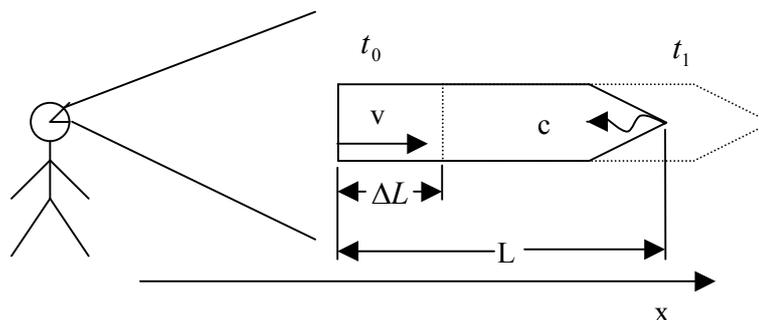


Bild 4: Scheinbare Verkürzung von Objekten in Bewegungsrichtung, die sich vom Beobachter entfernen

Zum Zeitpunkt t_0 bewegen sich die Photonen, die das Bild der Raketenspitze zu diesem Zeitpunkt darstellen und später das Auge des Beobachters erreichen, mit der Geschwindigkeit c in Richtung des Raketenecks. Gleichzeitig bewegt sich das Raketeneck mit der Geschwindigkeit v in Richtung der Raketenspitze. Zum Zeitpunkt t_1 treffen sich Heck und Bild der Spitze vom Zeitpunkt t_0 , wobei das Heck sich in der Zeit $t_1 - t_0$ um ΔL vom Beobachter entfernt hat. Um diese Strecke sieht der Beobachter die Rakete verkürzt:

$$\Delta L = v(t_1 - t_0)$$

$$L - \Delta L = c(t_1 - t_0)$$

Daraus ergibt sich nach kurzer Zwischenrechnung die scheinbare Verkürzung

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}$$

und die scheinbare Länge

$$\frac{L - \Delta L}{L} = \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$$

Wie man sieht, ist die scheinbare Länge der Rakete für den Beobachter 50% der Länge bei Stillstand für $v \rightarrow c$.

13 Literaturverzeichnis

- [1] FLIESSBACH, Torsten: *Mechanik*. 3. Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 1999, S. 275 und S. 287 – 289
- [2] PAUS, Hans J.: *Physik in Experimenten und Beispielen*. 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2002, S. 133 – 135
- [3] SEYFARTH, Ulrich: *Lebensdauer von Myonen*. Versuchsprotokoll zum F-Praktikumsversuch C 2.0, TU Darmstadt
- [4] N.N.: *Das Myonenexperiment im Speicherring von CERN*. URL: http://www.leifiphysik.de/web_ph12/versuche/07myonen/speicherring.htm (Abruf 20.11.2010)
- [5] PAUS, Hans J.: a.a.O., S. 129
- [6] EINSTEIN, Albert: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* Annalen der Physik 18, 1905, S. 639 – S. 643
- [7] HAFELE, J.C.; KEATING, R.E.: *Around-the-world atomic clocks: observed relativistic time values*. Science 177 (1972), S. 168 – S. 170