

# Spezielle Relativität und Newtons Axiome

Dr.-Ing Hartmut Schwab, Reutlingen

## Zusammenfassung

Auf drei voneinander unabhängigen Wegen wird gezeigt, daß die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) einen von einem falsch interpretierten Gedankenexperiment abgeleiteten Effekt beschreibt, d.h. einen Effekt, der tatsächlich nicht vorhanden ist, und damit falsifiziert ist. Die Zeit bleibt absolut und es besteht keine Notwendigkeit für ein Raum-Zeit-Kontinuum.

Die bekanntesten Effekte, die bisher durch die SRT modelliert wurden, werden jetzt mit Hilfe der klassischen Newtonschen Mechanik beschrieben.

### 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 beschreiben, die derzeit mit dem komplexeren Modell der Speziellen Relativitätstheorie beschrieben werden.

Dazu muß zunächst festgehalten werden, daß die Annahme, daß sich Licht in jedem unbeschleunigten Koordinatensystem (nachfolgend KS) mit der konstanten Geschwindigkeit  $c$  fortpflanzt<sup>1</sup>, 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 4).

Die Vorstellung eines Raum-Zeit-Kontinuums mit einer geschwindigkeitsabhängigen Zeit [1] und 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 entfernten Beobachter weiterhin gültig.

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

---

<sup>1</sup> Nach gängiger Auffassung nachgewiesen auf der Erde (Michelson-Morley-Versuch [2]), also in einem näherungsweise unbeschleunigten KS

### 3 Relativität der Zeit

Wenn man in einem Gedankenexperiment Ereignisse wie z.B. den Gang einer Lichtuhr [vgl. z.B. 8] in einem KS mit gegen die Lichtgeschwindigkeit nicht zu vernachlässigender Geschwindigkeit relativ zu einem entfernten Beobachter aus der Sicht eines mitbewegten und eines entfernten Beobachters betrachtet, so ist die relativistische Auffassung, daß der mitbewegte Beobachter die Uhr genauso gehen sieht wie vor der Beschleunigung auf die hohe Geschwindigkeit, der entfernte Beobachter hingegen die mitbewegte Uhr umso langsamer gehen sieht, je mehr sich die Geschwindigkeit des bewegten KS der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Diese Auffassung ist jedoch hinsichtlich der Sicht des entfernten Beobachters unrichtig, weil die sich ändernde Entfernung zwischen entferntem Beobachter und Lichtuhr vom Start des Lichtpulses der Lichtuhr bis zu dessen Rückkehr nicht berücksichtigt wurde. Die Informationen über diese beiden Ereignisse können dem entfernten Beobachter ja auch nur über Licht oder Funk, also mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden, so daß die Information über das zweite Ereignis gegenüber der über das erste verzögert eintrifft (wenn sich die beiden KS des mitbewegten und des entfernten Beobachters voneinander entfernen). Daraus ergibt sich für den entfernten Beobachter der Eindruck, die Lichtuhr gehe langsamer als seine Vergleichsuh. In Kenntnis der Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Koordinatensystemen kann diese Verzögerung herausgerechnet werden, und dann sieht der entfernte Beobachter die Uhr genauso gehen wie der mitbewegte.

Man kann auch – wie bisher üblich – annehmen, daß der entfernte Beobachter die Ereignisse im bewegten Koordinatensystem ohne Verzögerung durch die Informationsübertragung wahrnimmt. Am Ergebnis ändert das nichts. Der entfernte Beobachter sieht nun, wie das Licht scheinbar einen weiteren Weg zurücklegt, woraus bisher geschlossen wurde, daß das Licht länger unterwegs ist und also später wieder beim Sender ankommt. Dabei wurde aber übersehen, daß sich scheinbar auch die Geschwindigkeit erhöht, die der entfernte Beobachter sieht, mit der das Licht unterwegs ist, weil sich der echten Geschwindigkeit des Lichts quer zur Flugrichtung die Differenzgeschwindigkeit des bewegten zum entfernten KS überlagert, und dadurch wird der scheinbar längere Weg exakt kompensiert.

Schließlich kann auch mit Hilfe der SRT gezeigt werden, daß die Sichten des mitbewegten und des entfernten Beobachters auf die Lichtuhr identisch sind: Nach der SRT verkürzen sich die Längen in Bewegungsrichtung der Lichtuhr um den Faktor  $\frac{1}{\gamma}$ . Der Weg, den die Lichtuhr in Bewegungsrichtung während der Zeit zurücklegt, die der Lichtstrahl quer für die Länge  $l$  braucht, ist eine solche Länge ( $v t_1$ , vgl. Anhang, Abschnitt 11.2, Bild 2). Berücksichtigt man diese Verkürzung, so geht die Lichtuhr auch nach der SRT für den entfernten Beobachter genau so schnell wie für den mitbewegten.

Damit ist die Grundlage der SRT widerlegt. Zwischen den Sichten des mitbewegten und des entfernten Beobachters besteht keine Differenz und damit ist die Berechtigung für eine Theorie entfallen, die eine solche Differenz erklärt.

Die experimentellen Befunde und Gedankenexperimente, die bisher mit der SRT erklärt wurden, müssen aber nun in Einklang mit der klassischen Physik gebracht werden. Dies soll für die wichtigsten in den folgenden Abschnitten geschehen.

### 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 im betrachteten KS, bei der Relativgeschwindigkeit Null in diesem KS. 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  $\gamma$  und die Einsteinsche Masse-/Energieäquivalenz ganz aus der klassischen Newtonschen Physik (Anhang, 11.1).

Die Masse wächst natürlich nicht wirklich, sondern der Massenzuwachs rührt vom Äquivalenzprinzip her und ist in Wirklichkeit ein Energiezuwachs. Die entscheidende Erkenntnis daraus ist, daß Energie träge ist.

## 5 Längenkontraktion

Ein Objekt, das sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit von einem entfernten Beobachter wegbewegt, erfährt nach der SRT in Flugrichtung eine Längenverkürzung um den Faktor  $\frac{1}{\gamma}$  ([9]). 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. Die Ursache ist auch hier die Nichtberücksichtigung der scheinbaren Lichtgeschwindigkeit durch den entfernten Beobachter (vgl. Abschnitt 3).

Dies wird in Anhang 11.2 durch Vergleich der Nachberechnungen des Michelson-Morley-Versuches, einmal nach den Vorstellungen der SRT und zum andern nach den Erkenntnissen von Abschnitt 3 gezeigt.

## 6 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 durch Streuung an den Luftmolekülen 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  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$ -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, wenn auch wahrscheinlich, eine Hypothese, 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  $\gamma$ . Das Ergebnis für die geschwindigkeitsabhängige Lebensdauer der Myonen ist also dasselbe wie bei der SRT. Diese Hypothese kann beurteilt werden, wenn es gelungen ist, das Standardmodell der Teilchenphysik um die Teilchenmasse zu erweitern und damit zu untersuchen, ob die mittlere Lebensdauer der Myonen tatsächlich ihrer geschwindigkeitsabhängigen Masse proportional ist.

## 7 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.

## 8 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 1).

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 Zwillinge: 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  $45^\circ$  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. Wenn sie dann aber wieder zusammentreffen, ist aus der Sicht jedes der beiden der jeweils andere älter als er.

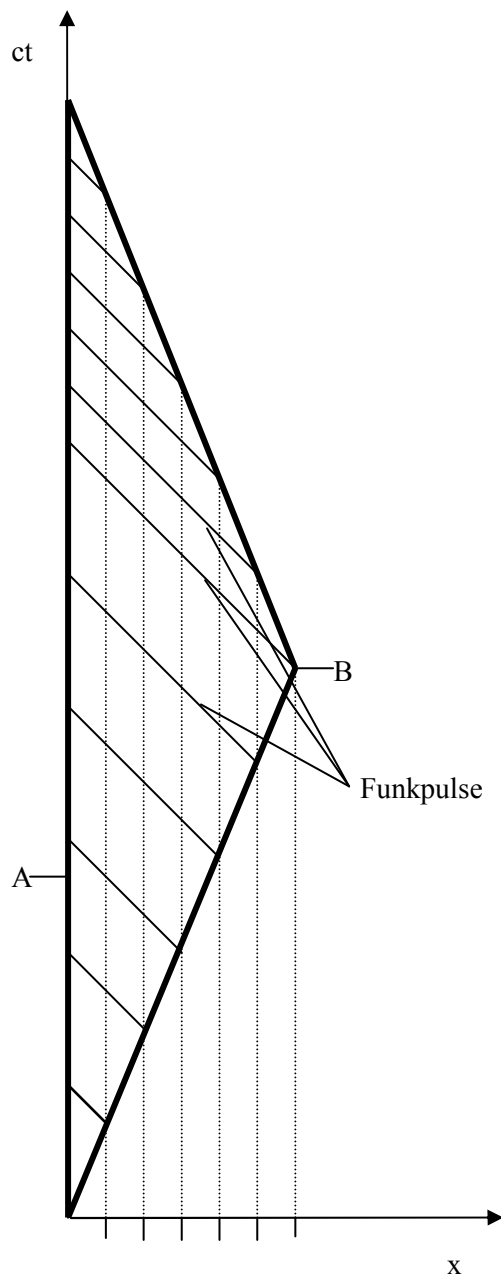


Bild 1: Weltlinien der Zwillingenbrüder beim Zwillingsparadoxon

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  $-45^\circ$  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

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

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 er trotz dessen hohen Alters nicht früher aufgefallen ist.

Gelegentlich wird behauptet, man müsse die Beschleunigungsphasen in die Überlegungen mit einbeziehen. Abgesehen davon, daß während dieser Zeiten die SRT per Voraussetzung nicht anwendbar ist, ändert sich auch dadurch nichts an der additiven Laufzeitänderung der Funkpulse und damit an der Aufhebung des Effekts bei Hin- und Rückflug.

## 9 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, 10.1). ohne die Notwendigkeit zur Annahme unterschiedlicher Sichten des ruhenden und des mitbewegten Beobachters und damit zur Relativität der Zeit Hinzu kommt, daß das Gedankenexperiment (Abschnitt 3), das die Vorstellung einer relativen Zeit begründet, fehlerhaft interpretiert wurde, weswegen diese Vorstellung obsolet ist und mit ihr auch die sie erklärende Theorie.

## 10 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.

## 11 Anhang

### 11.1 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  $\gamma$  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 im betrachteten KS, bei der Geschwindigkeit  $v_0$ . 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

$$K = \frac{d(mv)}{ds} \frac{ds}{dt} \quad (3a)$$

$$Kds \equiv dE_{kin} = vd(mv) \quad (3b)$$

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

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

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

Aus (4) und (5) ergibt sich

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

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

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

Integriert man (6) von  $v_0$  bis  $v$ , so ergibt sich nach kurzer Zwischenrechnung

$$\frac{m(v)}{m(v_0)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{C}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{C}}} \quad (7)$$

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:

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

Damit wird

$$\frac{m(v)}{m(v_0)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; v_0 \ll c: \frac{m(v)}{m(v_0 \approx 0)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8)$$

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 hier beide Beziehungen aus der klassischen Newtonschen Mechanik abgeleitet wurden.

## 11.2 Berechnung des Michelson-Morley-Versuchs nach SRT und Abschnitt 3

Man kann leicht anschaulich zeigen, wie die Forderung nach der Längenverkürzung zustandekommt, indem man den Michelson-Morley-Versuch nachrechnet, einmal nach der Vorstellung der SRT, zum anderen unter Berücksichtigung der scheinbaren Lichtgeschwindigkeit nach Abschnitt 3, aus der Sicht des entfernten Beobachters:



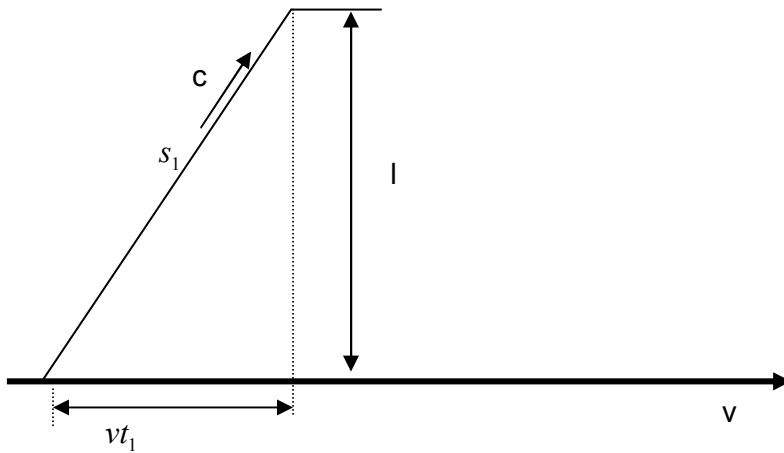


Bild2: Teilstrahl quer zur Bewegungsrichtung der Michelson-Morley-Versuchsordnung nach SRT

Die Länge des Lichtwegs  $s_1$  beträgt

$$s_1 = \sqrt{l^2 + v^2 t_1^2} \quad (10)$$

Die Laufzeit für den Weg  $s_1$  ist

$$t_1 = \frac{s_1}{c} \quad (11)$$

Daraus ergibt sich

$$t_1 = \frac{l}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (12)$$

und für den Hin- und Rücklauf

$$t_0 \equiv 2t_1 = \frac{2l}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (13)$$

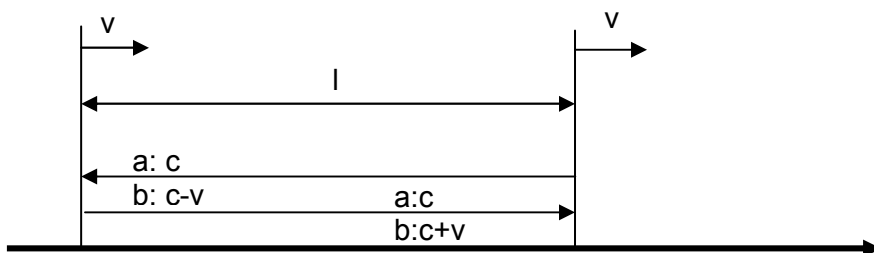


Bild3: Teilstrahl in Bewegungsrichtung beim Michelson-Morley-Versuch

a: nach SRT

b: nach Abschnitt 3

Die Länge des Lichtwegs  $s_1$  auf dem Hinweg beträgt (vgl. Bild 3a)

$$s_1 = l + vt_1 \quad (14)$$

Die Laufzeit für den Weg  $s_1$  ist

$$t_1 = \frac{s_1}{c} \quad (15)$$

Daraus ergibt sich

$$t_1 = \frac{\frac{l}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \quad (16)$$

Die Länge des Lichtwegs  $s_2$  auf dem Rückweg beträgt

$$s_2 = l - vt_2 \quad (17)$$

Die Laufzeit für den Weg  $s_2$  ist

$$t_2 = \frac{s_2}{c} \quad (18)$$

Daraus ergibt sich

$$t_2 = \frac{\frac{l}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \quad (19)$$

und für den Hin- und Rücklauf

$$t_0 \equiv t_1 + t_2 = \frac{2l}{c \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} \quad (20)$$

Vergleicht man die Laufzeiten für die Längs- und Querbewegung des Lichts, so ist offensichtlich die Laufzeit für die Längsbewegung die um  $\gamma$  größere, und daraus resultiert die Forderung der SRT, daß sich die Längen in Flugrichtung um den Faktor  $\frac{1}{\gamma}$  verkürzen müssen, damit beide Laufzeiten übereinstimmen. Dahinter steckt natürlich keinerlei Modellierung eines physikalischen Effekts, sondern es ist lediglich ein Kunstgriff zur Erreichung des gewünschten Ergebnisses, daß der Michelson-Morley-Versuch nicht verletzt werde.

Führt man diese Betrachtung unter Beachtung der Erkenntnisse aus Abschnitt 3 durch, so erkennt man sofort, daß die Laufzeit quer zur Flugrichtung

$$t_0 = 2 \frac{l}{c} \quad (21)$$

ist, und in Flugrichtung die Länge des Hinwegs

$$s_1 = l + vt_1 \quad (22)$$

Die Laufzeit für den Hinweg  $s_1$  ist (vgl. Bild 3b)

$$t_1 = \frac{s_1}{c + v} \quad (23)$$

Aus (22) und (23) ergibt sich

$$t_1 = \frac{l}{c} \quad (24)$$

Die Länge des Lichtwegs  $s_2$  auf dem Rückweg beträgt

$$s_2 = l - vt_2 \quad (25)$$

Die Laufzeit für den Weg  $s_2$  ist

$$t_2 = \frac{s_2}{c - v} \quad (26)$$

Aus (25) und (26) ergibt sich

$$t_2 = \frac{l}{c} \quad (27)$$

und für den Hin- und Rücklauf

$$t_0 \equiv t_1 + t_2 = 2\frac{l}{c} \quad (28)$$

Der Michelson-Morley-Versuch wird also bei der Modellbeschreibung nach Abschnitt 3 zwanglos bestätigt.

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] FLIESSBACH, Torsten: *Mechanik*. 3. Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 1999, S. 275 und S. 287 – 289
- [2] N.N.: *Michelson-Morley-Experiment*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley-Experiment> (Abruf: 12.7.2011)
- [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](http://www.leifiphysik.de/web_ph12/versuche/07myonen/speicherring.htm) (Abruf 20.11.2010)
- [5] PAUS, Hans J.: *Physik in Experimenten und Beispielen*. 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2002, 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
- [8] PÖSSEL, Markus: *Von der Lichtuhr zur Zeitdilatation*. URL: [http://www.einstein-online.info/vertiefung/LichtuhrZeitdilatation/?set\\_language=de](http://www.einstein-online.info/vertiefung/LichtuhrZeitdilatation/?set_language=de) (Abruf 4.6.2012)
- [9] FLIESSBACH, Torsten: a.a.O., S. 286