Ein alternativer Zugang zur speziellen Relativitätstheorie

M. Pohlig

1 Energie-Masse-Äquivalenz

Folgt man der Physik, wie sie sich historisch entwickelte, stellt man fest, dass sie oft steinige Wege zurücklegen musste, um kleine aber auch große Theorien zu formulieren. Orientiert man sich beim Lernen und Lehren an diesen „alten Pfaden", ist man in vielen Fällen gezwungen, unnötigen Ballast mit sich zu schleppen. Auch die Relativitätstheorie ist davon nicht verschont geblieben. In diesem Aufsatz soll ein alternativer Zugang zur Relativitätstheorie aufgezeigt werden. Neben seiner wissenschaftlichen Begründung wird der Versuch unternommen, zu zeigen, wie schnell man mit wenig Aufwand zu den wesentlichen Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie kommen kann.

1.1 Was macht die nichtrelativistische klassische Mechanik zur Relativitätstheorie – der traditionelle Weg

Beim Unterrichten der speziellen Relativitätstheorie beginnen wir üblicherweise mit der Diskussion über das Scheitern des *Michelson-Morley*-Experiments. *Fitzgeralds* Hypothese, die *Lorentz* ausarbeitete, war, dass alle Körper in Bewegungsrichtung verkürzt sein sollten. Er führte diese Kontraktion auf spezielle molekulare Kräfte zurück. Diese Überlegungen führten zu den bekannten *Lorentz*-Formeln wie z. B. der Formel für die Längenkontraktion. Von ganz anderer Qualität war die Konsequenz, die *Einstein* aus dem Scheitern des *Michelson-Morley*-Experiments zog. Er formulierte ein Postulat, das man als Axiom im mathematischen Sinne auffassen kann. Fügt man es zur klassischen *Newton*-Mechanik hinzu, wird diese zur speziellen Relativitätstheorie. Wie hieß nun sein Axiom?

Axiom: *Die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum hat in allen Bezugssystemen den gleichen Wert und ist unabhängig von der Bewegung des emittierenden Körpers.*

Betont sei, dass *Einsteins* Postulat aus keinem Experiment und aus keiner anderen Theorie ableitbar ist. Es ist eine Konstruktion des menschlichen Geistes. Längenkontraktion, Zeitdilatation und die Äquivalenz von Masse und Energie erscheinen dann als Sätze seiner Theorie. Das *Michelson-Morley*-Experiment ist somit nicht mehr als Scheitern sondern als das Bestätigen einer Theorie zu verstehen, nur dass es eben zeitlich vor der Formulierung der Theorie lag. Diese Bestätigung ist natürlich kein Beweis[1]. Erst die experimentelle Bestätigung von Vorhersagen, die man aus *Einsteins* Postulat gewann, bestärkten die Physiker darin, dass *Einsteins* Postulat vernünftig sei.

Eine Bemerkung noch zur Äquivalenz von Masse und Energie: Sie wird häufig missverständlich formuliert, weshalb wir sie, in etwas modernerer Sprache, zitieren:

Satz: *Masse und Energie sind lediglich zwei verschiedene Namen für die selbe physikalische Größe.*[2]

In eine Formel gefasst, hat dieser Satz die Gestalt

$$E = m\,c^2. \tag{1}$$

Diese Gleichung wird häufig so interpretiert: Energie könne in Masse und umgekehrt, Masse könne in Energie umgewandelt werden. Ein solches Verständnis der Gleichung führt dann zu Irrtümern, wenn man sie auf das gleiche System anwendet. Denn es würde bedeuten, Energie könne auf Kosten der Masse, und umgekehrt, Masse könne auf Kosten der Energie zunehmen. Dies jedoch ist nicht richtig. Bei (1) handelt es sich nicht um eine Bilanzgleichung. Die Mathematik der Gleichung sagt vielmehr, der Faktor c^2 in Formel (1) ist lediglich ein Umrechnungsfaktor für die Einheiten Kilogramm (kg) und Joule (J) und „mehr nicht".

1.2 Die Masse-Energie-Äquivalenz als Axiom – der alternative Weg

Für Mathematiker ist es nicht unüblich, in einer Theorie ein Axiom durch einen Satz der gleichen Theorie zu ersetzen, also zu einem Axiom zu machen. Das „alte" Axiom wird bei dabei zu einem Satz. Ein Satz und ein Axiom tauschen also ihre Rollen[3]. Dieser Aufsatz soll u. a. zeigen, dass man die gleiche Relativitätstheorie[4] bekommt, wenn man die Inhalte von Axiom und Satz in 1.1 vertauscht [3]. Wir gehen also von folgendem Axiom aus:

Axiom: *Masse und Energie sind lediglich zwei verschiedene Namen für dieselbe physikalische Größe.*

Da man Energie und Masse üblicherweise in verschiedenen Einheiten angibt, lässt sich das Axiom in der folgenden Form fassen:

$$E = k\,m. \tag{2}$$

Dass der „Umrechnungsfaktor" das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit ist und diese in allen Bezugssystemen den

[1] Einen Beweis für einen Satz in einer Theorie der Physik in dem Sinne, dass er seine Gültigkeit in der Natur beweist, kann es nie geben.

[2] *Einstein* schreibt in seinem Artikel: „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?": „Die Masse eines Körpers ist ein Maß für seinen Energieinhalt; ändert sich seine Energie L, so ändert sich die Masse in dem selben Sinne um $L/9\cdot 10^{20}$, wenn die Energie in Erg und die Masse in Gramm gemessen wird." (zitiert nach [1]). In [2] schreibt *Einstein*: Nach der Relativitätstheorie gibt es keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Masse und Energie,... und „Masse ist Energie."

[3] Der Mathematiker fordert allerdings, dass ein solches Vertauschen nur zulässig ist, wenn der zum Axiom gewordene Satz nicht stärker ist als das alte Axiom, d. h. dass aus der neu formulierten Theorie nicht mehr Sätze ableitbar sind als in der alten. Diese Forderung wollen wir fallen lassen und begründen dies mit der leichteren Zugänglichkeit zur Theorie.

[4] Bei unserem Nachweis beschränken wir uns auf die wesentlichen Ergebnisse der Relativitätstheorie.

gleichen Wert hat, muss genauso bewiesen werden wie die quantitativen Aussagen über Längenkontraktion und Zeitdilatation.

1.3 Energie-Impuls-Zusammenhang bewegter Körper

Führt man einem Körper Energie mit dem Träger Impuls zu, so gilt für den Zusammenhang von Energiestrom P und Impulsstrom F:

$$P = vF \quad \text{oder} \quad \frac{dE}{dt} = v\frac{dp}{dt}.$$ [5)]

Nach Multiplikation mit dt erhalten wir

$$dE = v\ dP.$$

Es handelt sich also um einen reinen Energie-Impuls-Transport. Wegen (2) und

$$p = m(v)\ v$$

gilt

$$d(k\ m(v)) = v\ d(m(v)\ v).$$

Dass die Masse eines Körpers von seiner Geschwindigkeit abhängt, ist wegen (2) einleuchtend und stellt keine zusätzliche Bedingung dar. Umgekehrt würde die Konstanz der Masse vorauszusetzen, eine logisch nicht begründbare Einschränkung bedeuten. Anwenden der Produktregeln der Differenzialrechnung liefert

$$k\ dm(v) = v^2\ dm(v) + v\ m(v)dv.$$

Wir separieren die Variablen und erhalten

$$\frac{1}{m(v)}dm(v) = \frac{v}{k - v^2}dv, \tag{3}$$

integrieren die Gleichung (3)

$$\int_{m(v=0)}^{m(v)} \frac{1}{m^*(v)}dm^*(v) = \int_{v=0}^{v} \frac{v^*}{k - v^{*2}}dv^*$$
$$= -\frac{1}{2}\int_{v=0}^{v} \frac{-2v^*}{k - v^{*2}}dv^*$$

und bekommen

$$\left[\ln(m^*(v))\right]_{m(v=0)}^{m(v)} = -\frac{1}{2}\left[\ln\left(k - v^{*2}\right)\right]_{v=0}^{v}.$$

Mit $m(v = 0) = m_0$ – wir nennen diese Masse, die der Körper in Ruhe hat, Ruhemasse – erhalten wir

$$\ln\frac{m(v)}{m_0} = -\frac{1}{2}\cdot\ln\frac{k - v^2}{k}$$

und umgeformt

$$= \ln\sqrt{\frac{k}{k - v^2}}$$
$$= \ln\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{k}}}.$$

Wir lösen die letzte Gleichung nach $m(v)$ auf:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{k}}}. \tag{4}$$

Formel (4) zeigt, welchen Wert die Masse eines Körpers in einem Bezugssystem hat, bezüglich dem er sich mit der Geschwindigkeit v bewegt. Der Körper, der sich selbst immer in Ruhe sieht, würde von sich sagen, seine Masse sei m_0. Für $v \geq \sqrt{k}$ ist $m(v)$ nicht definiert, d. h. $\sqrt{k}$ kann man als eine obere Schranke für die Geschwindigkeit des Körpers verstehen. Ein Beschleunigen eines Körpers, genauer: eine Impulszunahme eines Körpers zeigt sich anfänglich – der Wert von v darf als sehr klein gegen angenommen werden – in einer Erhöhung seiner Geschwindigkeit. Nimmt sein Impuls weiter zu, zeigt sich diese Zunahme immer mehr in einer Zunahme seiner Masse.
Da nun k als Umrechnungsfaktor zwischen der Einheit von E und Einheit von m in allen Bezugssystemen denselben Wert hat, ist die Grenzgeschwindigkeit $\sqrt{k}$ eine universelle Konstante und damit unabhängig vom Bezugssystem.

1.4 Der Wert der Lichtgeschwindigkeit ist in allen Bezugssystemen derselbe

Mit (4) haben wir aber auch

$$E(v) = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{k}}}, \tag{5}$$

wobei E_0 die Ruhenergie ist, also die Energie des Körpers, der sich in einem Bezugssystem befindet, in dem er keinen Impuls hat. Wegen

$$\frac{v^2}{k} = \frac{v^2 m^2(v)k}{k m^2(v)k} = \frac{p^2 k}{E^2(v)}$$

können wir in (5) v^2/k durch $p^2 k/E^2(v)$ ersetzen, was letzten Endes bedeutet, dass wir v eliminieren, die Energie des bewegten Körpers also nicht mehr in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit, sondern stattdessen in Abhängigkeit von seinem Impuls p schreiben. (5) bekommt damit die Gestalt

$$E(p) = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{p^2 k}{E^2(p)}}}.$$

Diese Gleichung soll nach $E(p)$ aufgelöst werden. Dazu quadrieren diese Gleichung und stellen die Terme mit $E(p)$ auf eine Seite.

[5)] Der Einfachheit halber beschränken wir uns auf Impulsströme, die in Bewegungsrichtung des Körpers zeigen.

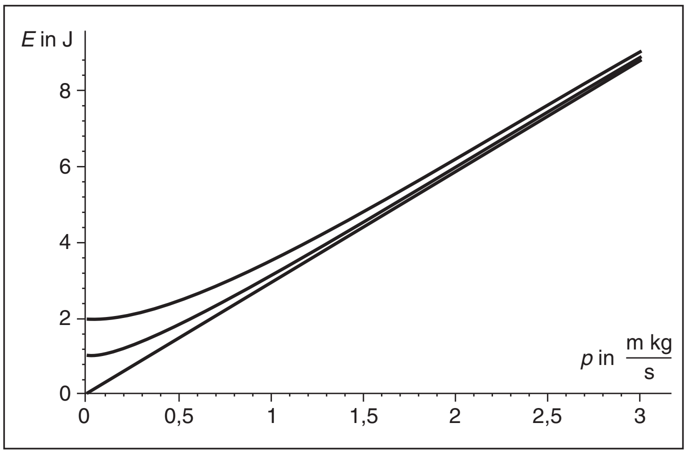


Abb. 1: ***E-p*-Diagramme für E_0 = 0 J, 1 J und 4 J mit *k* = 9**

$$E^2(p) = \frac{E_0^2}{1 - \frac{p^2 k}{E^2(p)}}.$$

Wir formen den Nenner um und multiplizieren damit die ganze Gleichung:

$$E^2(p) - p^2 k = E_0^2$$

und lösen nach $E(p)$ auf:

$$E(p) = \sqrt{E_0^2 + p^2 k}. \qquad (6)$$

Abb. 1 zeigt *E*-*p*-Diagramme für verschiedene E_0-Werte bei einem zunächst willkürlich gewählten $k = 9$ J/kg
Ist $p^2 k$ sehr viel größer als E_0, erhält man die Asymptote

$$E = p\,\sqrt{k}.$$

Diese Beziehung gilt exakt und nicht nur asymptotisch für „Körper“ mit der Ruhenergie 0 J bzw. Ruhemasse gleich 0 kg. Diese „Körper“ zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur bei der Grenzgeschwindigkeit $\sqrt{k}$ „existieren“, die Begriffe Ruheenergie und Ruhemasse haben dann streng genommen keinen Sinn mehr. Den tatsächlichen Wert von *k* und damit den Grenzwert für die Geschwindigkeit bewegter Körper kennen wir folglich dann, wenn wir Teilchen finden, die keine Ruheenergie haben. Wir kennen solche Teilchen, es sind die Photonen[6]. Für sie gilt die Beziehung

$$E = p\,c, \qquad (7)$$

wobei *c* die Geschwindigkeit der Photonen, also die Lichtgeschwindigkeit ist. Wir fassen das Gefundene zu einem Resultat zusammen: Unser Faktor *k*, angelegt als eine universelle Konstante, ist das Quadrat der Grenzgeschwindigkeit aller bewegter Körper und, da

$$\sqrt{k} = c$$

ist, ist die Lichtgeschwindigkeit eine für alle Bezugssysteme universelle Konstante, hat also in allen Bezugssystemen denselben Wert. Das hat eigenartige Konsequenzen: Das Licht, das eine bewegte Taschenlampe in Bewegungsrichtung aussendet, hat den gleichen Wert, wie die Geschwindigkeit des Lichts einer ruhenden Taschenlampe. *Einsteins* Axiom, auf unserem alternativen Weg ein Satz, ist somit bewiesen. „Unser“ Axiom können wir jetzt in der bekannten Gestalt schreiben:

$$E = m\,c^2.$$

und unsere wichtigsten bisherigen Ergebnisse, festgehalten in den Gleichungen (4), (5) und (6), haben dann die gewohnte Form:

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

$$E(v) = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9)$$

$$E(p) = \sqrt{E_0^2 + p^2 c^2}. \qquad (10)$$

2 Licht in einem „Spiegelkasten“

2.1 Längenkontraktion

In einem Gedankenexperiment betrachten wir Licht einer bestimmten Frequenz f_0, das in einem ideal verspiegelten Kasten eingeschlossen ist. Für die Energie des Lichts gilt:

$$E_0 = N\,h\,f_0. \qquad (11)$$

Dabei ist *N* die Anzahl der Photonen im Spiegelkasten, *h* das *Planck*'sche Wirkungsquantum. Wir betrachten nun den gleichen Spiegelkasten von einem Bezugssystem aus, bezüglich dem sich der Kasten mit einer Geschwindigkeit *v* bewegt. Für die Energie des Photonen-Gases gilt dann:

$$E_0 = N\,h\,f. \qquad (12)$$

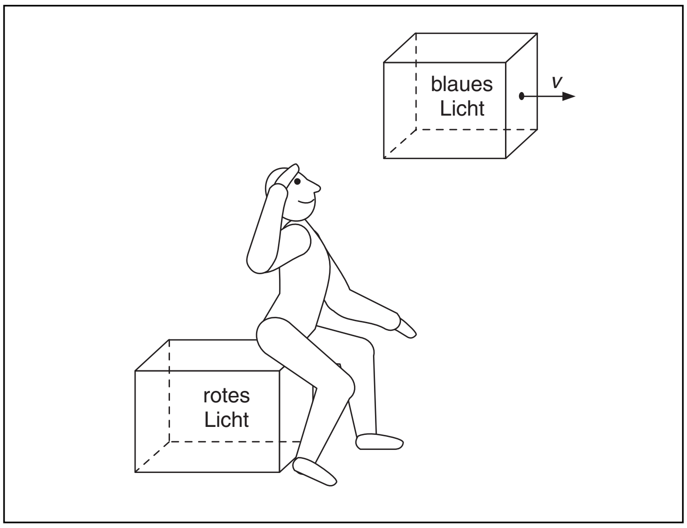
Anzahl der Photonen und das *Planck*'sche Wirkungsquantum *h* sind dabei unabhängig vom Bezugssystem. Aus (5), (11) und (12) gewinnt man leicht:

$$f(v) = \frac{f_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (13)$$

Das Licht, das in einem bewegten Spiegelkasten eingesperrt ist, erscheint „blauer“ als in einem System, in dem der Kasten ruht (vgl. Abb. 2).
Für die nächste Überlegung wählen wir einen etwas eigenartig abgewandelten Spiegelkasten. Er bestehe jetzt aus einem unendlich ausgedehnten, parallel angeordneten Spiegelpaar[7]. Zwischen die Spiegelplatten werde wieder Licht

[6] Energie und Impuls eines Photons drücken sich in seiner Frequenz aus. $E = hf$ und $p = hf/c = h/\lambda$. Eine Zunahme des Impulses und damit der Energie lässt sich nur über eine Zunahme der Frequenz erreichen.

[7] Wir fordern, dass die beiden Spiegelplatten unendlich ausdehnt sein sollen, um Beugungen an den Rändern zu vermeiden. In der grafischen Darstellungen jedoch erscheinen diese unendlich ausgedehnten Spiegelplatten als Rechtecke. Wir kennen dieses Vorgehen auch aus der Mathematik, wo man (unbegrenzte) Ebenen als Rechtecke darstellt.



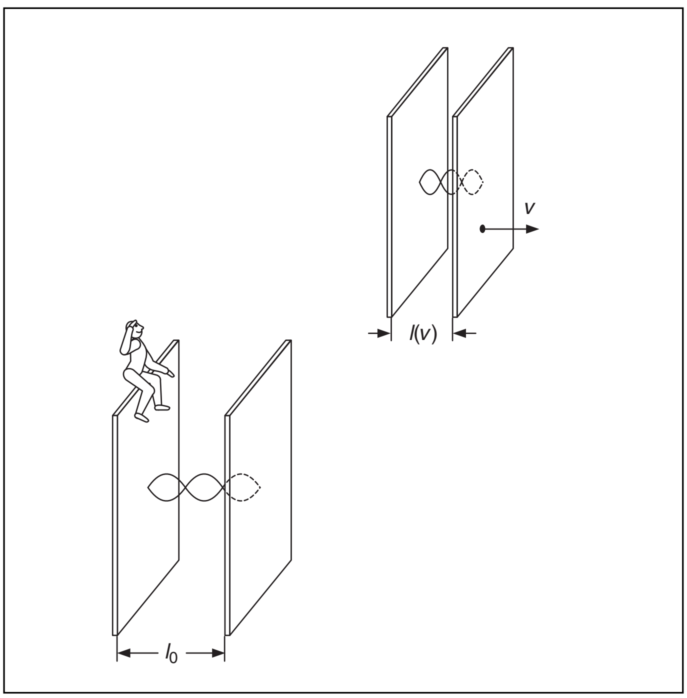


Abb. 2 (oben): Das Licht in dem für den Beobachter sich bewegenden Kasten erscheint diesem „blauer".

Abb. 3 (unten): Die bewegten Spiegelplatten erscheinen für den ruhenden Beobachter näher zusammengerückt.

der Frequenz f_0 eingesperrt, dessen Wellenvektor senkrecht auf den Spiegelplatten steht. Der Abstand der beiden Platten sei λ_0. Ohne die Strenge der Logik zu verletzen, können wir fordern, dass λ_0 und f_0 so gewählt seien, dass sich zwischen den Platten stehende Wellen mit N Knoten bilden. Der Abstand der beiden Spiegel lässt sich dann so ausdrücken:

$$l_0 = (N-1)\frac{\lambda_0}{2} = (N-1)\frac{c}{2f_0}.^{8)} \tag{14}$$

Betrachten wir wieder unser Spiegelpaar mit den eingeschlossenen stehenden Wellen von einem Bezugssystem aus, bezüglich dem unsere Spiegel sich, parallel zur Spiegelnormalen, mit v bewegen. Die Tatsache, dass sich stehende Wellen ausgebildet haben, und die Anzahl der Knoten bleibt dabei unangetastet (vgl. dazu Abb. 3). Der Abstand der beiden Spiegel muss also einen Wert haben, der von v abhängt:

$$l(v) = (N-1)\frac{c}{2f(v)}. \tag{15}$$

In den Quotienten

$$\frac{l(v)}{l_0} = \frac{f_0}{f(v)}$$

setzen wir (13) ein. Auflösen nach $l(v)$ liefert die bekannte Gleichung:

$$l(v) = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}. \tag{16}$$

Wählen wir den Plattenabstand als Maßstab, so sagt uns Gleichung (16), dass ein Maßstab, der sich uns gegenüber mit v bewegt, für uns verkürzt erscheint, und zwar umso mehr, je größer seine Geschwindigkeit ist.

2.2 Zeitdilatation

Wir messen die Geschwindigkeit eines Körpers, der eine gleichförmige Bewegung ausführt, mit:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \tag{17}$$

Diesen Wert der Geschwindigkeit können wir auf zwei Arten messen. Im ersten Fall legen wir einen Messpunkt fest, an dem der Körper, dessen Geschwindigkeit wir messen wollen, sich vorbeibewegt.
Wir markieren auf dem Körper parallel zur Bewegungsrichtung eine Strecke $\Delta s(v) = l(v)$ und messen die Zeitspanne. Dabei ist t_1 der Zeitpunkt, wo die markierte Strecke unseren Messpunkt zu passieren beginnt, und t_2 der Zeitpunkt wo die Passage endet. Für die Geschwindigkeit v erhalten wir also:

$$v = \frac{l(v)}{\Delta t_0} = \frac{l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{\Delta t_0}.^{9)} \tag{18}$$

Kommen wir nun zu der zweiten Möglichkeit, die Geschwindigkeit unseres Körpers zu messen. Wir legen eine Messstrecke mit der Länge $\Delta s = l_0$ fest und markieren auf unserem Körper, dessen Geschwindigkeit wir ermitteln wollen, einen Punkt. Wir fragen jetzt nach der Zeit, die der Körper benötigt, um vom Anfang bis zum Ende der festgelegten Strecke zu kommen. Genauer: wir fragen den Körper, welche Zeit er für das Passieren der Messstrecke benötigt hat. Damit wird deutlich, dass die Zeitspanne eine Größe des für uns in Bewegung erscheinenden Körpers ist. Wir erhalten in diesem Fall für die Geschwindigkeit:

$$v = \frac{l_0}{\Delta t(v)}. \tag{19}$$

8) Da sich an den Spiegelwänden Knoten bilden, gibt es $(N-1)$ Bäuche.

9) Der Index 0 bei Δt_0 markiert hier keinen Zeitpunkt, sondern er sagt, dass das Zeitintervall in einem Bezugssystem gemessen wird, das sich nicht bewegt.

Beide Messungen müssen die gleiche Geschwindigkeit liefern, weshalb wir die rechten Seiten der Gleichungen (18) und (19) gleichsetzen dürfen.

$$\frac{l(v)}{\Delta t_0} = \frac{l_0}{\Delta t(v)}. \tag{20}$$

Wenn wir Gleichung (20) nach $\Delta t(v)$ auflösen und $l(v)$ von Gleichung (16) verwenden, bekommen wir

$$\Delta t(v) = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \tag{21}$$

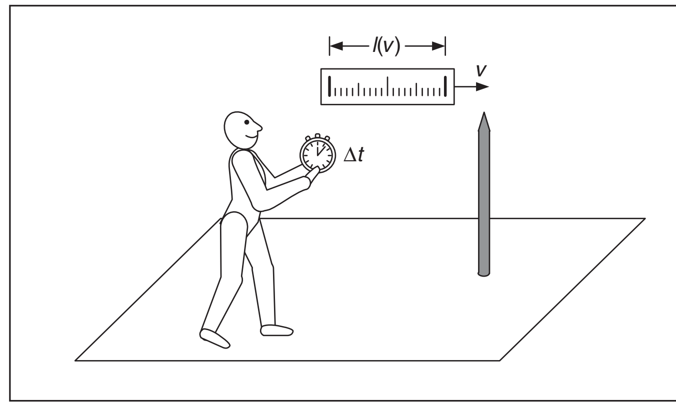
die Gleichung also, die die Zeitdilatation beschreibt: Die Uhr eines Körpers, der sich uns gegenüber in Bewegung befindet, läuft für uns langsamer.
Zur Veranschaulichung betrachten wir das „Überleben" von Myonen (μ-Mesonen) auf ihrem Weg durch die Atmosphäre, das klassisch betrachtet paradox erscheint. Sie entstehen ca. 10 km oberhalb der Erdoberfläche, haben eine Halbwertszeit von 2,19 μs und eine Geschwindigkeit von $v = 0{,}9998\,c$. Mit den Regeln der klassischen Mechanik gerechnet, würde ein Myon eine Strecke von 657 m mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 „überleben". Nur 0,0026% der Myonen würden demnach die Erdoberfläche erreichen. Das heißt, selbst wenn sie in großer Zahl in 10 km Höhe erzeugt werden, wären auf der Eroberfläche praktisch keine Myonen mehr nachweisbar. Bekanntlich ist aber das Gegenteil der Fall, was auch nicht verwundert, wenn wir relativistisch rechnen. Für das Myon bewegt sich nämlich der Rest der Welt mit einer Geschwindigkeit von 0,9998 c. Die Strecke zwischen seinem „Geburtsort" und der Erdoberfläche verkürzt sich für das Myon auf:

$$\Delta t(0{,}9998\,c) = \frac{2{,}19\cdot 10^{-6}\,\mathrm{s}}{\sqrt{1-\frac{(0{,}9998\,c)^2}{c^2}}} \approx 0{,}00011\,\mathrm{s}.$$

Das Myon hat also bei seiner „Lebenserwartung" von 2,19 μs große Chancen, die Erdoberfläche zu erreichen. 81% der Myonen erreichen die Erdoberfläche. Betrachten wir den Flug des Myons nicht aus der Position des Myons, sondern aus Position eines Beobachters auf der Erdoberfläche, so ist die Strecke, „die es zu überleben gilt", 10 000 m. Die Uhr, die wir zur Zeitmessung verwenden müssen, ist aber die Uhr des bewegten Myons, die wegen der hohen Geschwindigkeit eine starke Zeitdilatation erfährt; das Myon lebt für den Beobachter länger, nämlich:

$$\Delta t(0{,}9998\,c) = \frac{2{,}19\cdot 10^{-6}\,\mathrm{s}}{\sqrt{1-\frac{(0{,}9998\,c)^2}{c^2}}} \approx 0{,}00011\,\mathrm{s}.$$

Diese „Lebenserwartung" reicht bei einer Geschwindigkeit von 0,9998 c aus, eine Strecke von 32,8 km mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 zu überleben, das Myon hat also auch nach dieser Rechnung gute Chancen, die Erdoberfläche zu erreichen. Nachrechnen liefert auch hier ca. 81%.
Eine Bemerkung noch: Die Relativgeschwindigkeit zweier Körper zu einander ist symmetrisch, d. h., wenn eine Person



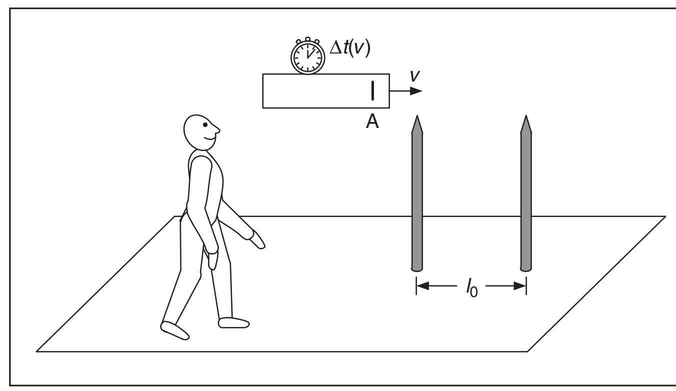


Abb. 4 (oben): Der Beobachter misst die Zeitspanne Δt, die vergeht, wenn die markierte Strecke AB eine ruhende Markierung passiert.

Abb. 5 (unten): Ein Markierung A auf dem bewegten Körper benutzt dieser, um die Zeitspanne zu messen, die er aus der Sicht der ruhenden Person benötigt die Strecke l_0 zurückzulegen.

A sagt, B bewege sich ihr gegenüber mit einer Geschwindigkeit v, so kommt Person B zum gleichen Ergebnis, B wird also sagen, A bewege sich ihr gegenüber ebenfalls mit der Geschwindigkeit v. Messungen müssen in beiden Fällen den gleichen Wert von v liefern. Wir haben diese Symmetrie in (20) ausgenützt. Die Zeitdilatation kann also nicht die Erklärung für das bekannte Zwillingsparadoxon liefern. Die ruhende Person A wird über den bewegten Zwilling B sagen, dass dieser, also B langsamer altere. Mit gleichem Recht kommt der Zwilling B zur selben Behauptung und wird von A sagen, dieser altere langsamer, da er sich bewege. Die Literatur beschreibt das Zwillingsparadoxon so, dass sich am Ende einer langen Reise zwei unterschiedlich alte Zwillinge wieder treffen. Tatsächlich ist der Fall nicht symmetrisch in dem Sinne, wie wir es beschrieben haben. Die beiden Zwillinge können sich nur dann wieder begegnen, wenn einer von beiden auf seiner Reise umkehrt. Das Zwillingsparadoxon wird also erklärbar, wenn man auf die Äquivalenz von Beschleunigungs- und Gravitationsfeld und damit auf die allgemeine Relativitätstheorie zurückgreift. (Vgl. dazu etwa [4])

Literatur

[1] *Lorentz-Einstein-Minkowski*: Relativitätsprinzip; Wissenschaftliche Buchgesellschaft; Darmstadt; 1982. Der Artikel war zum ersten Mal in Ann. D. Phys 17 (1905) veröffentlicht
[2] *Einstein, Infeld*: Die Evolution der Physik; rororo, rde 12, 101.-108. Tausend, Juli 1966. Erstes Zitat S. 134. Zweites Zitat S. 164
[3] *Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs Band 1; AULIS Verlag Deubner Köln und LEU Stuttgart; ISBN 3-7614-2095-1; 1997
[4] *Falk-Ruppel*: Mechanik, Relativität, Gravitation; 2. Aufl. 1975; Springer

Anschrift des Verfassers:
StD *Michael Pohlig*, Schaafweide 21, 76467 Bietigheim

Ein alternativer Zugang zur speziellen Relativitätstheorie

M. Pohlig

Legt man sich nicht auf den traditionellen Weg fest, so kann man mit einfachen Mitteln schnell zu den wichtigen Ergebnissen der speziellen Relativitätstheorie gelangen. Man verwendet Kenntnisse, die man bereits auf anderen Gebieten der Physik gewonnen hat. Der Aufsatz zeigt diesen Weg auf und begründet ihn.

PdN-PhiS. X/XX, S. XX

passt nicht mehr hinein!

[10] Wie jeden periodischen Vorgang können wir auch das regelmäßige Schlagen des menschlichen Herzens als Uhr verwenden.