PETER STROHMAYER

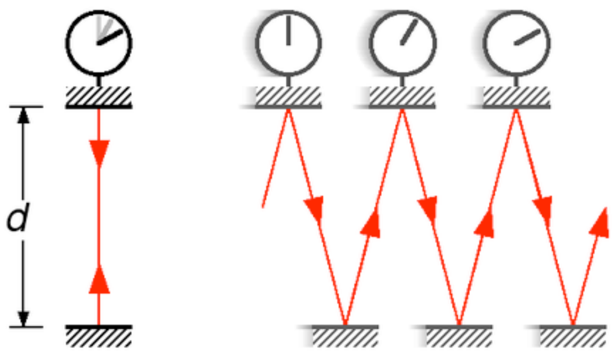
Kritik der bewegten Lichtuhr

(Zur Didaktik der speziellen Relativitätstheorie)

1. Die Effekte der speziellen Relativitätstheorie - Zeitdilatation und Raumkontraktion - lassen sich an einer bewegten Lichtuhr beobachten. Den Takt einer Lichtuhr erzeugt ein Photon, das zwischen zwei Spiegeln in einer Röhre hin und her pendelt. Die Taktlänge hängt von der Länge der Lichtuhr ab.

Der Beobachter S und der Beobachter S' bewegen sich mit der gleichförmigen Relativgeschwindigkeit v aneinander vorbei. Im Augenblick ihrer Begegnung schaltet der Beobachter S seine senkrecht zur Bewegungsachse stehende Lichtuhr ein. Aus seiner Sicht breitet sich das Photon an der Spitze des Lichtpulses vom unteren zum oberen Spiegel der Lichtuhr aus. Es legt den Weg d mit "Lichtgeschwindigkeit" in der Zeit t zurück.

Nun wird die Frage gestellt, wie der andere Beobachter S' die beiden Ereignisse des Aussendens des Photons vom unteren Spiegel und des Eintreffens beim oberen Spiegel "sieht" (d.h., wie er sie nach Ort und Zeit in seinem Bezugssystem verzeichnet). Aus seiner Sicht legt das Photon in der sich vorbeibewegenden Lichtuhr S einen Zick-Zack-Weg zurück.



Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitdilatation#Lichtuhr).

Aus der Sicht des Beobachters S' ist der vom Photon zurückzulegende, zur Bewegungsachse geneigte Weg jedenfalls länger als der senkrecht ausgerichtete Weg d aus der Sicht des Beobachters S.

Nach der experimentell abgesicherten Grundannahme der speziellen Relativitätstheorie erfolgt die Ausbreitung des Photons S sowohl aus der Sicht des Beobachters S als auch aus der Sicht des Beobachters S' mit "Lichtgeschwindigkeit". Mit anderen Worten: Die Relativgeschwindigkeit der Lichtquelle spielt für die Ausbreitung eines Lichtpulses keine Rolle.

In Anbetracht dieser Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" kann das Photon aus der Sicht des Beobachters S' den längeren Weg nicht auch in der Zeitspanne t, sondern nur in der entsprechend längeren Zeitspanne t' zurücklegen. Ein- und derselbe Prozess dauert aus der Sicht des Beobachters S' somit länger als aus der Sicht des Beobachters S.

Bei oberflächlicher Beurteilung dieser merkwürdigen, aus der Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" resultierenden Konsequenz, könnte man meinen, die Ursache dafür läge darin, dass beim ("ruhenden") Beobachter S' mit zunehmender Relativgeschwindigkeit die Zeit immer rascher vergeht, denn dann würde aus seiner Sicht während des gleichen Prozesses mehr Zeit verfließen. Plausibel ist diese Behauptung nicht, denn bei einem Beobachter können nicht wegen verschiedener Relativbewegungen verschiedene Zeiten verschieden rasch vergehen.

Auch die umgekehrte Meinung, beim ("bewegten") Beobachter S würde die Zeit t mit zunehmender Relativgeschwindigkeit immer langsamer vergehen, kann nicht zutreffen. Das Gedankenexperiment geht von einem gegebenen Prozess aus der Sicht des Beobachters S aus. Wird dieser Prozess in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit einer Änderung unterworfen ("weil die Zeit langsamer vergeht"), gerät man bei Durchführung des Gedankenexperiments in einen logischen Zirkel.

Die Vorstellung, eine gleichförmige Relativbewegung von Beobachtern würde sich auf das Vergehen der Zeit (oder auf die Länge von Maßstäben) auswirken, sodass bei Messungen der Ausbreitung des Lichts immer die "Lichtgeschwindigkeit" herauskommt, ist nicht zielführend. Dass ein Prozess aus der Sicht zweier zueinander bewegter Beobachter verschieden lange dauern kann, muss vielmehr Anlass dafür sein, die tradierten Begriffe "Zeit", "Raum", "Relativgeschwindigkeit" und "Lichtgeschwindigkeit" grundsätzlich zu hinterfragen.

2. In Anbetracht der Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" und deren Auswirkung auf die Dauer eines Prozesses muss man sich von der newtonschen Mechanik und von den herkömmlichen Vorstellungen über Zeit und Raum lösen. So ist es zB unmöglich, das Ausmaß der - dem Grunde nach außer Zweifel stehenden - Verlängerung der Prozessdauer von t auf t' auf Basis der newtonschen Mechanik zu berechnen. Diese Berechnung der Zeitspanne t' müsste bei dem rechtwinkeligen Dreieck ansetzen, das aus Sicht des Beobachters S aus der Bewegungsachse der Beobachter - die Strecke v*t -, aus der senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Bahn des Photons - die Strecke c*t - und aus der gesuchten Photonenbahn - die Strecke c*t' - gebildet wird.

Die der Länge der Hypotenuse dieses Dreiecks entsprechende längere Zeitspanne t' hätte aber aus der Sicht des Bezugssystems des Beobachters S' zur Folge, dass sich der andere Beobachter S mit seiner Lichtuhr während des Prozesses nicht nur um die Strecke v*t, sondern um die längere Strecke v*t' entfernt hätte. Auf der der Hypotenuse des beschrieben Dreiecks entsprechenden Bahn würde das Photon - aus der Sicht des im Bezugssystems des Beobachters S' - das obere Ende der Lichtuhr verfehlen. Die auf der Grundlage dieses Dreiecks ermittelte Zeitspanne t' kann nicht richtig sein.

3. Die Berechnung muss einen anderen Ansatz verfolgen.

Die spezielle Relativitätstheorie geht von drei Bedingungen aus, wonach die "Lichtgeschwindigkeit" des Photons, die Höhe der Relativgeschwindigkeit der Beobachter und das Maß des senkrecht zur Bewegungsachse bestehenden räumlichen Abstands von zwei Ereignissen voneinander sowohl aus der Sicht des Beobachter S als auch aus der Sicht des Beobachters S' gleich sind.

Aus der Sicht des Beobachters S beginnt das Photon wie gesagt seine Ausbreitung am unteren Ende der Lichtuhr S (Ereignis E_1) und beendet sie am oberen Ende der Lichtuhr (Ereignis E_2). Dieser Prozess nimmt die Zeitspanne t in Anspruch. Zur Ermittlung der Zeitspanne t', die dieser Prozess aus der Sicht des Beobachters S' dauert, ist ohne Rücksicht auf die newtonsche Mechanik nur unter Zugrundelegung der obigen drei Bedingungen danach zu fragen, welche Bahn das Photon vom unteren Ende der Lichtuhr S (Ereignis E_1) aus nehmen muss, damit es nach Verstreichen der Zeitspanne t' aus der Sicht des Beobachters S' das obere Ende der Lichtuhr erreicht (Ereignis E_2). Diese Vorgaben führen zu einem rechtwinkeligen Dreieck, bestehend aus der Strecke, um die sich der Beobachter S vom Beobachter S' entfernt hat (v*t'), aus der - vom Beobachter S gemessenen - Länge seiner senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Lichtuhr (c*t) und aus der Strecke (c*t'), der gesuchten Bahn des Photons. Aus dem Dreieck ergibt sich, dass die Prozessdauer t' um den sogenannten "Lorentz-Faktor" $1/sqr(1-v^2/c^2)$ länger ist als die Prozessdauer t.

Wird die konstante Wirkungsausbreitung (die "Lichtgeschwindigkeit") "1" gesetzt, so kann die nach Raum und Zeit des eigenen Koordinatensystems gemessene Relativgeschwindigkeit v in dem Dreieck nur einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen (sie ist ein Prozentsatz der "Lichtgeschwindigkeit"). Der Lorentz-Faktor vereinfacht sich auf $t' = t/sqr(1-v^2)$. Dass diese Relativgeschwindigkeit die "Lichtgeschwindigkeit" nicht überschreiten kann, folgt aus ihrer Definition und nicht aus irgendwelchen geheimnisvollen physikalischen Barrieren.

4. Gedankenexperimente zu den Effekten der speziellen Relativitätstheorie gewinnen an Nachvollziehbarkeit, wenn jeder der zueinander bewegten Beobachter bei ihrer Begegnung (Ereignis E_1) von der jeweils bei ihm ruhenden Lichtquelle einen Lichtpuls so aussendet, dass sich die Photonen an der Spitze der Lichtpulse gemeinsam ausbreiten und gemeinsam (zB beim gegenüberliegenden Spiegel einer Lichtuhr) eintreffen (Ereignis E_2). Die sich daraus aus der jeweiligen Sicht ergebenden Photonenbahnen entsprechen jenen, die sich auch beim gegenseitigen "Beobachten" eines Photons in der Lichtuhr ergeben würden. Der Vorteil, den das Abstellen auf die gemeinsame Ausbreitung von Photonen mit sich bringt, liegt aber darin, anschaulich nachvollziehen zu können, wieso die Konstanz bzw. die Unüberschreitbarkeit der Ausbreitung von Wirkungen zu den Effekten der speziellen Relativitätstheorie führt.

Bei gemeinsamer Ausbreitung zweier Photonen an der Spitze zweier Lichtpulse, die am selben Ort zugleich von zwei zueinander bewegten Lichtquellen ausgesendet werden, ist die Länge der jeweiligen Ausbreitung aus der Sicht des jeweiligen Bezugssystems verschieden, weil sich zwar die beiden Photonen am selben Ort befinden (ein Photon kann ein anders nicht überholen), jedoch die zueinander bewegten Ausgangspunkte der Lichtpulse (die Lichtquellen) am Ende des Prozesses je nach Relativgeschwindigkeit und Prozessdauer einen bestimmten Abstand voneinander haben.

Die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses, den ein Beobachter ausgesendet hat, hat in der Relativitätstheorie große Bedeutung. Die absolute substantielle Zeit und der absolute substantielle Raum der newtonschen Theorie werden durch eine relationale Sichtweise ersetzt, die an der absoluten und unüberschreitbaren Wirkungsausbreitung anknüpft. Diese Wirkunsausbreitung, zB in Form der Ausbreitung eines Photons, das von einer beim

Beobachter ruhenden Lichtquelle ausgesendet wird, legt aus der Sicht dieses Beobachters immer das an Raum zurück, was es an Zeit dafür benötigt. Mit anderen Worten: Zeit ist das, was vergeht, wenn sich ein Lichtpuls vom Ereignis seiner Aussendung bis zum Ereignis seines Eintreffens ausbreitet. Raum ist das, was zurückgelegt wird, wenn sich ein Lichtpuls vom Ereignis seiner Aussendung bis zum Ereignis seines Eintreffens ausbreitet. Die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses wird zum grundlegenden Maßstab für Raum und Zeit. Damit hat auch der Umstand, dass die Länge der jeweiligen Ausbreitung von komplementären Lichtpulsen aus der Sicht verschiedener Beobachter verschieden sein kann, umwälzende Konsequenzen.

Aus der Sicht des jeweiligen Beobachters ist die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses vom Start von einer bei ihm ruhenden Lichtquelle (Ereignis E_1) bis zu seinem Eintreffen bei einem Ziel (Ereignis E_2) sowohl die Zeitspanne als auch der Raum, der aus seiner Sicht zwischen diesen beiden Ereignissen liegt. Um die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses zu messen, muss der Beobachter nur die Zeit halbieren, die ein beim zweiten Ereignis reflektierter Lichtpuls von seiner Aussendung bis zur Rückkehr zu ihm benötigt. Diese "Halbzeitreflexion" gilt absolut, sie hängt bei der Ausbreitung von Licht im Vakuum nicht vom Bewegungszustand eines Beobachters ab.

Aus der Verschiedenheit der Ausbreitungslängen von koordinierten Lichtpulsen folgt für zueinander bewegte Beobachter jeweils die Verschiedenheit der Raumstrecken und der Zeitspannen, die aus der Sicht verschiedener Beobachter zwischen den Ereignissen des Aussendens E_1 und des Ankommens E_2 liegen. In Anbetracht der Disponibilität der Zeitspannen sinkt die newtonsche Mechanik zu einer Näherungsrechnung für niedrige Relativgeschwindigkeiten ohne inneren Wahrheitswert herab.

An sich bedarf es einiger Überlegung, in welche Richtung ein Lichtpuls in Abstimmung mit der Richtung des anderen Lichtpulses und der Relativgeschwindigkeit der Lichtquellen bei Begegnung der Lichtquellen ausgesendet werden muss, damit sich die Photonen an der Spitze der beiden Lichtpulse gemeinsam ausbreiten können. Eine Konstellation, in der diese Abstimmung leicht fällt (und die auch dem obigen Gedankenexperiment zu Grunde liegt), ist die, dass der eine Beobachter seinen Lichtpuls senkrecht zur Bewegungsachse und der andere seinen Lichtpuls in einem solchen von der Relativgeschwindigkeit abhängigen Winkel aussendet, dass das oben beschriebene rechtwinkelige Dreieck mit den Seiten v*t', c*t und c*t' entsteht. Daraus lässt sich mit der gleichen Rechnung, wie sie oben (3.) beschrieben wurde, der Lorentz-Faktor für die Umrechnung der Zeitspannen t und t' ableiten.

Ganz automatisch kommt es zu einer gemeinsamen Ausbreitung der beiden Photonen an der Spitze von Lichtpulsen, wenn beide Beobachter bei ihrer Begegnung je einen Lichtpuls in dieselbe Richtung entlang ihrer Bewegungsachse aussenden. Diese Konstellation hat Albert Einstein in einem seiner berühmten Aufsätze aus dem Jahr 1905 der Berechnung des Umrechnungsfaktors für die verschiedenen Zeitspannen zu Grunde gelegt.

5. Die populärwissenschaftliche Erklärungen verkomplizieren diese - an sich durch den vollzogenen Bruch mit der newtonschen Mechanik widerspruchsfrei gewordene - Lösung durch die hinzugefügte philosophische Deutung, die Verlängerung der Prozessdauer t' käme dadurch zu Stande, dass - vom Beobachter S' aus gesehen - die Zeit t beim "bewegten" Beobachter S langsamer vergehen würde. "Je schneller sich der Beobachter S bewegt, desto langsamer vergeht bei ihm die Zeit." "Bei sehr hohen Geschwindigkeiten v bleibt die Zeit fast stehen" (vgl. M. Carrier, Raum-Zeit, Berlin/New York: Walter de Gruyter (2009), 35). "Bewegte Uhren gehen langsamer" (Universität Wien, F. Embacher, "Zeitdilatation"; http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Zeitdilatation.html). "Jill is aging more slowly because she’s moving!" (University of Virginia, M. Fowler, Galileo and Einstein, Special Relativity: What Time is it?; http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109.mf1i.fall03/lectures09.pdf). Die oben gestellte Frage nach der Bahn des Photons aus der Sicht des Beobachters S' wird ganz in den Bahnen des newtonschen Denkens gestellt und dadurch verkompliziert: Um welchen Faktor muss aus der Sicht des mit der Geschwindigkeit v "bewegten" Beobachters S' die Zeit t beim Beobachter S langsamer vergehen, damit das Photon seine Ausbreitung mit c bei der Begegnung der beiden Beobachter am unteren Ende der "bewegten" Lichtuhr S beginnen und an ihrem oberen Ende beenden kann?

Die behauptete Veränderung des Zeitablaufs und damit die Veränderung der Prozessdauer beim Beobachter S führt bei dem Gedankenexperiment zu einem logischen Zirkel, weil beim Beobachter S Länge die Lichtuhr und damit die Prozessdauer unveränderlich ist. Außerdem müssten sich aus der Sicht des Beobachters S' die Lichtpulse des Beobachters S nur bei einigen Richtungen langsamer ausbreiten, während sie sich bei anderen Richtungen schneller ausbreiten müssten. Ein einheitlich langsameres Vergehen der Zeit beim Beobachter S auf Grund einer gleichförmigen Bewegung findet nicht statt.

Der Einwand, es dürften immer nur die Mittelwerte von zusammengesetzten Lichtausbreitungen, die zum Ursprung ihrer Ausbreitung beim Beobachter S zurückkehren, untersucht werden, ist nicht stichhaltig (M. Pössel, "Von der Lichtuhr zur Zeitdilatation", in: Einstein Online Vol. 04 (2010), 1101; https://www.einstein-online.info/spotlight/LichtuhrZeitdilatation/):

"Vorsicht, gefälschte Lichtuhr!

Gelegentlich sieht man Animationen mit Lichtuhren, die doppelt so schnell ticken wie die hier dargestellten. Bei ihnen springt das Zählwerk zum einen dann um, wenn der Puls den oberen Spiegel erreicht, zum anderen, wenn er den unteren Spiegel erreicht. Solche Lichtuhren führen das einfache Funktionsprinzip ad absurdum, denn woher weiß das Zählwerk, wann der Puls beim unteren Spiegel ankommt? Diese Information müsste erst mühsam vom unteren Spiegel zum Zählwerk übertragen werden. Diese Übertragung lässt sich aber nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewerkstelligen. Insbesondere würde die Information das Zählwerk nicht erreichen, bevor der Lichtpuls selbst bereits wieder am oberen Spiegel eintrifft."

Wieso ein Messwert (das oben beschriebene "Sehen" eines Photons) absurd sein soll, nur weil er später mitgeteilt wird, ist nicht nachvollziehbar.

An der Widersprüchlichkeit der Behauptung einer langsamer vergehenden Zeit ändern auch Animationen nichts, in denen eine senkrecht zur Bewegungsrichtung ausgerichtete blinkende Lichtuhr den Eindruck erweckt, als könnte der ruhende Beobachter dabei zusehen, wie beim bewegten Beobachter die Zeit langsamer vergeht. Von dieser Verlangsamung sollen alle Uhren seines Systems betroffen sein (vgl. zB M. Pössel, "Von der Lichtuhr zur Zeitdilatation" in: Einstein Online Vol. 04 (2010), 1101; https://www.einstein-online.info/spotlight/LichtuhrZeitdilatation/; "Offenbar geht die bewegte Lichtuhr von meiner Warte aus deutlich langsamer als meine eigene, baugleiche Lichtuhr. (...) Von meiner Raumstation aus beurteilt laufen alle Uhren der relativ zu mir bewegten Raumstation langsamer als meine eigenen Uhren. Ebenso wie die bewegten Uhren langsamer gehen, laufen auch alle Vorgänge auf der anderen Raumstation für mich langsamer ab - Fünf-Minuten-Eier kochen länger und haben am Ende doch die richtige Konsistenz, und der Pianist an Bord der anderen Station, der den Minutenwalzer spielt, benötigt dafür deutlich mehr Zeit, als es der üblichen Aufführungspraxis entspricht.").

Die schräg verlaufenden Lichtwege, die der Beobachter S' in diesem Beispiel "sieht", stammen von einem Photon, das vom Beobachter S normal zur Bewegungsachse ausgesendet wurde und das bei seiner Rückkehr zu ihm ein Blinkzeichen auslöst. Jedes Blinkzeichen wird entsprechend der Lorentz-Transformation nach Zeit und Ort im Koordinatensystem des Beobachters S' verzeichnet. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit verlängern sich aus der

Sicht des Beobachters S' die Lichtwege und damit die Zeitspannen zwischen den Blinkzeichen (wie oben die Zeitspanne t' gegenüber der definierten Zeitspanne t).

Die mit der Zunahme der Relativgeschwindigkeit einhergehende Frequenzverringerung der Blinkzeichen ist also nichts anderes als der (relativistische) transversale Dopplereffekt aus der Sicht des Beobachters S'. Ein Dopplereffekt hat aber nichts mit einem anderen Vergehen von Zeit in der Sphäre des gleichförmig bewegten Objekts zu tun. Er tritt bei den Beobachtern wechselseitig auf, ohne einen von ihnen auszuzeichnen (Relativitätsprinzip). Bei keinem von ihnen vergeht deswegen die Zeit langsamer. Man kann nicht ernsthaft behaupten, die Zeit in einem sich entfernenden Rettungswagen mit Folgetonhorn würde langsamer vergehen, weil man die Töne tiefer hört.

6. Die Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" ist nicht darauf zurückzuführen, dass sich eine Substanz "Zeit", die mit einer irgendeiner "objektiven" Uhr gemessen würde, und eine Substanz "Raum", der mit einem "objektiven" starren Maßstab gemessen würde, in der Sphäre eines bewegten Beobachters immer so verändern würden, dass für die "Lichtgeschwindigkeit" immer der gleiche Wert herauskommt. Sie ist vielmehr eine Folge des Umstandes, dass die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses sowohl die bei diesem Prozess vergehende Zeit als auch den dabei zurückgelegten Raum repräsentiert. Deshalb muss bei einem Photon das Verhältnis von zurückgelegtem Weg zur dafür benötigten Zeit notwendigerweise aus der Sicht aller Beobachter "1" sein. Das Verknüpft-Sein der "Lichtgeschwindigkeit" mit Raum und Zeit ist der Grund, warum sie auch bei der Messung von Raum und Zeit mit herkömmlichen Maßstäben und Uhren konstant ist.

Die populärwissenschaftliche Darstellung mit ihrer faszinierenden, aber überschießenden Annahme einer langsamer vergehenden Zeit beim "bewegten" Beobachter missachtet das wissenschaftliche Sparsamkeitsprinzip und ist ein Fall für "Ockhams Rasiermesser". Die Zeit ist keine Substanz, die langsamer oder schneller vergehen könnte. Die Ergebnisse des Gedankenexperiments sprechen für die Richtigkeit der Ansicht von Leibniz, der gegen Newton die Ansicht verfocht, die Zeit sei eine Relation (vgl. *S. Clarke*, Der Briefwechsel mit G.W. Leibniz von 1715/16, Übers. *Ed Dellian*, Hamburg, Meiner (1990)).

Wien, 14. Februar 2021

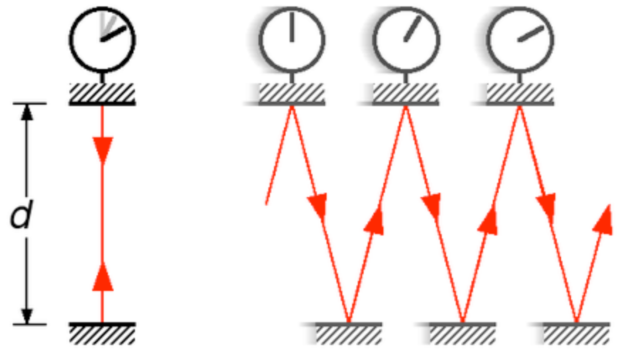
***

Anhang:

1) Deutsche Wikipedia-Ausgabe:

https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitdilatation#Lichtuhr

per 17.7.2019

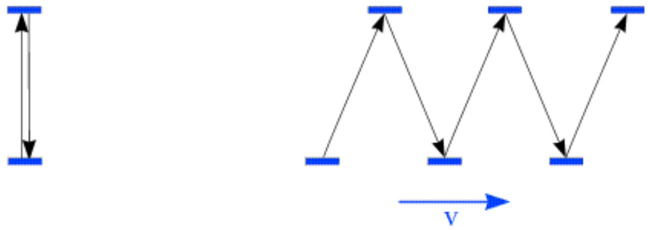


"Wenn eine Lichtuhr A [ruhend im System A] gegeben ist, wird aus Sicht eines mit ihr mitbewegten (also relativ zu ihr ruhenden) Beobachters [aus der Sicht des Systems A] ein Blitz für den einfachen Weg zwischen den Spiegeln die Zeit $T_0 = d/c$ benötigen. (...) Wird nun eine zweite Lichtuhr B [die im anderen System B ruhende Lichtuhr, die nun vom System A aus "beobachtet" werden soll] senkrecht zur Verbindungslinie der Spiegel mit der Geschwindigkeit v bewegt, so muss das Licht aus Sicht des A-Beobachters zwischen den Spiegeln eine größere Strecke zurücklegen als bei Uhr A. Unter der Annahme der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit **geht** für den A-Beobachter **Uhr B** daher **langsamer als Uhr A**. Die Zeit $T' = d'/c$, die der Lichtblitz für den einfachen Weg d' zwischen den Spiegeln benötigt, ergibt sich über den Satz des Pythagoras $d'^2 = d^2 + (vT')^2$. Durch Einsetzen der Ausdrücke für d und d' und Auflösen nach T' erhält man schließlich $T' = T_0 * 1/sqr(1-(v/c)^2)$ (...)."

2) Franz Embacher, Uni Wien:

https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Zeitdilatation.html

per 17.7.2019

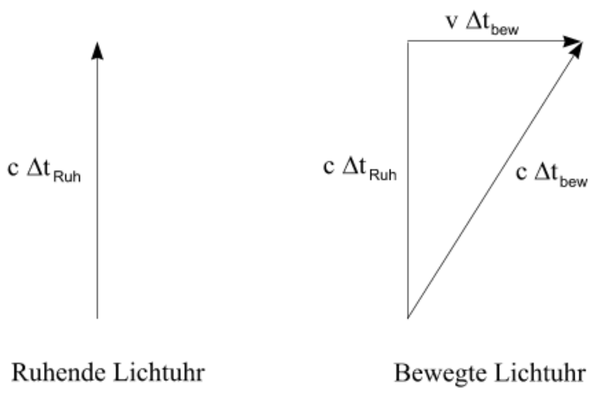


Ruhende Lichtuhr Bewegte Lichtuhr

"Die linke Grafik zeigt die Lichtuhr [S] vom Standpunkt eines Beobachters, der sich ihr gegenüber in Ruhe befindet, d.h. vom Standpunkt ihres Ruhsystems. Wir fragen nun, wie derselbe Prozess in einem dagegen bewegten Inertialsystem [aus Sicht des Systems S'] aussieht, wobei die Bewegungsrichtung quer zur Laufrichtung der Photonen stattfinden soll. Für einen Beobachter in diesem neuen System [aus Sicht des Systems S'] bewegt sich die Lichtuhr [S], und wir bezeichnen den Wert ihrer Geschwindigkeit mit v. Die Photonen werden im bewegten System [aus der Sicht des Systems S'] entlang schräger Bahnen laufen – das ist im rechten Teil der obigen Abbildung dargestellt. Wir können uns auch genau so gut vorstellen, dass zwei Lichtuhren identischer Bauart zur Verfügung stehen und wir [aus der Sicht des Systems S'] eine ruhende (links) [eine Lichtuhr S'] und eine mit Geschwindigkeit v bewegte (rechts) [eine Lichtuhr S] betrachten.

Alle hier dargestellten Photonen haben dieselbe Geschwindigkeit. Die Wegstrecke vom unteren bis zum oberen Spiegel ist jedoch [aus Sicht des Systems S'] für das Photon der bewegten Lichtuhr [S] länger als für das der ruhenden Lichtuhr [S'], und daher vergeht [aus der Sicht des Systems S'] eine größere Zeitspanne, bis es vom einen zum anderen Spiegel gelangt! (...) Die Zeitdauer, die ein Prozess in einem Inertialsystem dauert, ist nicht unbedingt gleich der Zeitdauer, die während desselben Prozesses in einem anderen Inertialsystem vergeht. Die bewegte Lichtuhr [S] hat [aus der Sicht des Systems S'] eine längere Periodendauer als die ruhende. Das bedeutet, dass der Vorgang des Photonenpendelns, wenn er von einem bewegten System [S'] aus beobachtet wird, langsamer ist [längerdauernde Takte finden seltener statt] als im Ruhsystem der Lichtuhr [S] . ... dieser Effekt ... wird oft in knapper Weise mit den Worten **"Bewegte Uhren gehen langsamer"** zusammengefasst und heißt Zeitdilatation ('Zeitdehnung').

(...)



Die Dauer des Prozesses im Ruhsystem der Lichtuhr [aus Sicht des Systems S] wird mit Δt_{Ruh} bezeichnet. Der Abstand der beiden Spiegel ist daher c Δt_{Ruh}, da c die Geschwindigkeit des Photons ist. (...).

Vom bewegten System aus betrachtet [aus Sicht des Systems S'], vergeht während desselben Prozesses ein Zeitintervall, das wir zunächst nicht kennen und mit Δt_{bew} bezeichnen. Der vom Photon (...) zurückgelegte Weg hat daher [aus Sicht des Systems S'] die Länge c Δt_{bew}. Als Abstand der beiden Spiegel übernehmen wir den im Ruhsystem ermittelten Wert c Δt_{Ruh}. Während des Prozesses ist der obere Spiegel um die Strecke v Δt_{bew} vorgerückt (da sich die Lichtuhr in diesem System [aus Sicht des Systems S'] mit der Geschwindigkeit v nach rechts bewegt). Insgesamt bilden diese drei Längen ein rechtwinkeliges Dreieck. (...)

$$(c\ \Delta t_{Ruh})^2 + (v\ \Delta t_{bew})^2 = (c\ \Delta t_{bew})^2$$

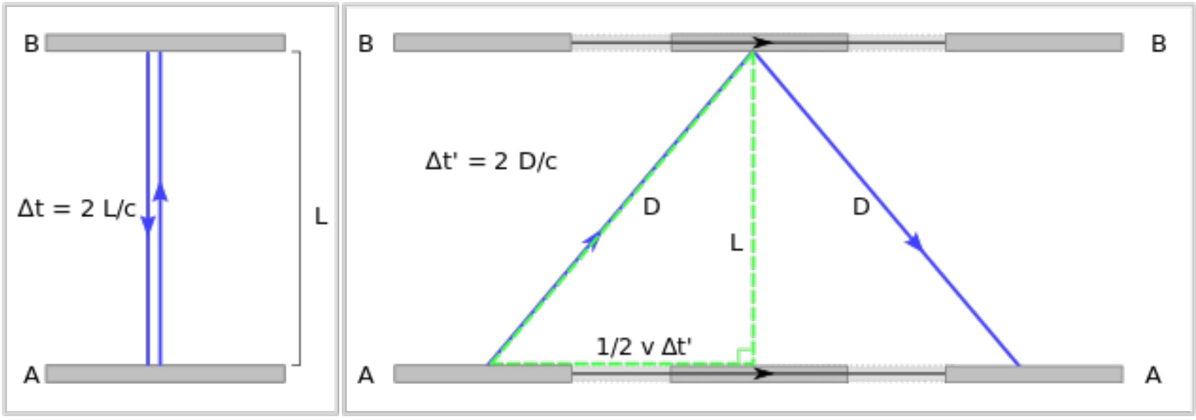
(...)

'Eine mit Geschwindigkeit v bewegte Uhr geht [aus Sicht des Systems S'] um den Faktor $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ langsamer als in ihrem Ruhsystem.' "

3) Englische Wikipedia-Ausgabe:

https://en.wikipedia.org/wiki/Time_dilation

per 17.7.2019



"In the frame in which the clock is at rest (diagram on the left), the light pulse traces out a path of length 2L and the period of the clock is 2L divided by the speed of light: ...

From the frame of reference of a moving observer traveling at the speed v relative to the resting frame of the clock (diagram at right), the light pulse is seen as tracing out a longer, angled path. Keeping the speed of light constant for all inertial observers, requires a lengthening of the period of this clock from the moving observer's perspective. That is to say, in a frame moving relative to the local clock, this clock will appear to be running more slowly. Straightforward application of the Pythagorean theorem leads to the well-known prediction of special relativity: (...)."

{"In dem Bezugssystem ["ruhendes" System S], in dem die Uhr ruht (Diagramm links), folgt der Lichtimpuls [das Photon an der Spitze des Lichtpulses] einem Pfad der Länge 2L. Die Periode der Uhr ist 2L geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit. ... Aus der Sicht des Bezugssystems eines sich [aus Sicht des "ruhenden" Systems S nach links] bewegenden Beobachters [aus Sicht des "bewegten" Systems S'], der mit der Geschwindigkeit v relativ zu dem ruhenden System der Uhr [S] reist (Diagramm rechts), wird der Lichtimpuls als Verfolgung eines längeren, abgewinkelten Pfades gesehen. **Um die Lichtgeschwindigkeit für alle Inertialbeobachter konstant zu halten**, muss der Takt dieser Uhr [die Prozessdauer t der im System S ruhenden Uhr] aus der Sicht des sich bewegenden Beobachters [aus der Sicht des Systems S'] länger werden [t' ist länger als t]. **Das heißt**, **in einem Bezugssystem, das sich relativ zur lokalen Uhr bewegt** [aus Sicht des Systems S'], **scheint diese Uhr** [die im System S ruhende Uhr] **langsamer zu laufen**. Die einfache Anwendung des Satzes von Pythagoras führt zur bekannten Vorhersage der speziellen Relativitätstheorie (...)."}