

P E T E R S T R O H M A Y E R

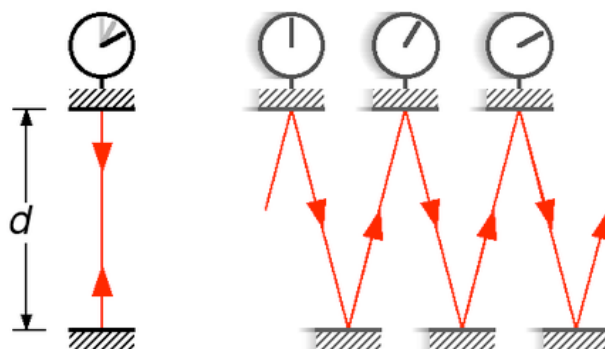
Kritik der bewegten Lichtuhr

(Zur Didaktik der speziellen Relativitätstheorie)

1. Die Effekte der speziellen Relativitätstheorie - Zeitdilatation und Raumkontraktion - lassen sich am Beispiel einer bewegten Lichtuhr erklären.

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. Den Takt der Lichtuhr bestimmt ein Photon, das in der senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Röhre zwischen zwei Spiegeln hin und her pendelt. Aus der Sicht des Beobachters S 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 sowohl aus der Sicht des Beobachters S als auch aus der Sicht des Beobachters S' mit "Lichtgeschwindigkeit". Die Relativgeschwindigkeit der Lichtquelle spielt für die Ausbreitung eines Lichtpulses keine Rolle. In Anbetracht dieser Begrenztheit und 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' bewältigen. Ein- und derselbe Prozess (die Zeitspanne zwischen dem Ereignis des Aussendens und dem Ereignis des Eintreffens) muss daher aus der Sicht des Beobachters S' um irgendeinen Faktor länger dauern als aus der Sicht des Beobachters S.

Bei oberflächlicher Beurteilung dieser merkwürdigen 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 anderer Massepunkte 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 aus der Sicht des Beobachters S definierten Prozess (mit einem Ereignis an dessen Beginn und einem Ereignis an dessen Ende sowie einer zwischen diesen Ereignissen liegenden Zeitspanne) aus. Wird dieser gegebene Prozess bzw. diese Zeitspanne in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit nachträglich abgeändert ("weil dort die Zeit langsamer vergeht"), gerät man bei der Beurteilung des Gedankenexperiments in einen logischen Zirkel.

An dem Ungenügen der Erklärungen kann auch der Vorbehalt nichts ändern, die Zeit beim ("ruhenden") Beobachter S' würde nicht an sich, sondern nur aus der Sicht des Beobachters S schneller vergehen bzw. die Zeit beim ("bewegten") Beobachter S würde nicht an sich, sondern nur aus der Sicht des Beobachters S' langsamer vergehen. Beobachter können Ereignisse in ihrem Bezugssystem nach Ort und Zeit verzeichnen (messen) und daraus die dargestellten oberflächlichen Schlüsse für andere Bezugssysteme ziehen. Sie können aber das

Vergehen von Zeit in einem anderen Bezugssystem nicht direkt beobachten. Bei einem Lichtstrahl zB senkrecht zur Bewegungsachse könnte man den Schluss ziehen, "dass die Zeit dort langsamer vergeht". Bei einem Lichtstrahl zB in die Bewegungsrichtung könnte man den Schluss ziehen, "dass die Zeit dort schneller vergeht".

Die naive Vorstellung, eine gleichförmige Relativbewegung von Beobachtern würde sich auf das Vergehen der Zeit im herkömmlichen Sinn (oder auf die Länge von Maßstäben in herkömmlichen Sinn) auswirken, ist nicht zielführend. Dass ein Prozess aus der Sicht zweier zueinander bewegter Beobachter verschieden lange dauern kann, stellt vielmehr die tradierten Begriffe "Zeit", "Raum", "Geschwindigkeit" und "Lichtgeschwindigkeit" selbst grundlegend in Frage.

2. In welche Richtung diese Infragestellung gehen muss, zeigt sich an der Unmöglichkeit, das Ausmaß der Verlängerung der Prozessdauer von t auf t' auf Basis der newtonschen Mechanik zu berechnen.

Die Berechnung der Zeitspanne t' müsste aus Sicht des Beobachters S auf dem rechtwinkligen Dreieck beruhen, das aus der Strecke $v \cdot t$ (dem Weg des Beobachters S' entlang der gemeinsamen Bewegungsachse), der Strecke $c \cdot t$ (der senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Bahn des Photons seiner Lichtuhr) und der Hypotenuse $c \cdot t'$ (der gesuchten Photonenbahn) gebildet wird.

Die auf Grund der größeren Länge der Hypotenuse dieses Dreiecks entsprechend längere Zeitspanne t' hätte aber - der Sicht des Beobachters S' zu Grunde gelegt - zur Folge, dass sich der Beobachter S mit seiner Lichtuhr während des Prozesses nicht nur um die Strecke $v \cdot t$, sondern um die längere Strecke $v \cdot t'$ entfernen würde. Auf der der Hypotenuse des beschriebenen Dreiecks entsprechenden Bahn $c \cdot t'$ würde das Photon - aus der Sicht des Beobachters S' - das obere Ende der Lichtuhr des bereits zu weit entfernten Beobachters S verfehlen. Die auf der Grundlage dieses Dreiecks vom ermittelte Zeitspanne t' kann nicht richtig sein.

3. Die Berechnung muss einen anderen Ansatz verfolgen, der konsequent auf den Prämissen der speziellen Relativitätstheorie aufbaut: aus der Sicht jedes der beiden Beobachter haben die "Lichtgeschwindigkeit" c des Photons, die Relativgeschwindigkeit v

der Beobachter und der senkrecht zur Bewegungsachse stehende räumliche Abstand von zwei Ereignissen den gleichen Wert.

Aus der Sicht des Beobachters S beginnt das Photon 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 unter Zugrundelegung der obigen drei Bedingungen danach zu fragen, welche Bahn das Photon aus der Sicht des Beobachters S' vom unteren Ende der Lichtuhr S (Ereignis E_1) ausgehend nehmen muss, damit es nach Verstreichen der Zeitspanne t' das obere Ende der Lichtuhr des Beobachters S erreicht (Ereignis E_2). Die Antwort ergibt sich aus einem rechtwinkligen Dreieck, bestehend aus der Strecke $v*t'$ (um die sich der Beobachter S vom Beobachter S' entfernt hat), aus der Strecke $c*t$ (der für beide Beobachter gleichen Länge der senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Lichtuhr) und aus der Strecke $c*t'$ (der gesuchten Bahn des Photons).

Daraus ergibt sich, dass die Prozessdauer t' um den sogenannten "Lorentz-Faktor" $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ länger ist als die Prozessdauer t . Die Beobachter sind sich zwar über den Zeitpunkt des Eintritts des ersten Ereignisses E_1 (ihrer Begegnung), nicht aber über den Zeitpunkt des Eintritts des zweiten Ereignisses E_2 einig. Auf die Frage, wie weit sie zum Zeitpunkt des Eintritts des zweiten Ereignisses voneinander entfernt sind, gibt es zwei verschiedene, aber gleichberechtigte Antworten ($v*t$ bzw. $v*t'$).

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

4. Die Beurteilung des Gedankenexperiments mit der bewegten Lichtuhr wird durch die Aussage in die Irre geleitet, ein Photon hätte für jeden Beobachter "Lichtgeschwindigkeit". Mit der Verwendung des tradierten Begriffs der "Geschwindigkeit" zur Beschreibung der Ausbreitung von Lichtpulsen wird das newtonsche Verständnis von Zeit und Raum übernommen und einzementiert. Dies mündet zB in Theorien, dass hohe Geschwindigkeiten Zeit und Raum verändern könnten. Die Veränderungen würden so

ausfallen, dass für die Ausbreitung von Photonen immer die "Lichtgeschwindigkeit" herauskäme.

Die fundamentalen Veränderungen in den Grundlagen der Begriffe für Zeit, Raum und Geschwindigkeit werden dabei nicht genügend gewürdigt:

Ein Photon kann ein anderes Photon nicht überholen. Eine Kugelwelle aus Licht kann eine andere Kugelwelle aus Licht nicht überholen. Diese Fakten sind den Begriffen von Zeit, Raum und Geschwindigkeit vorgelagert.

Bei gemeinsamer Ausbreitung zweier Photonen an der Spitze zweier Lichtpulse, die am selben Ort zugleich von zwei zueinander bewegten Lichtquellen ausgesendet werden, muss die Länge der Ausbreitung des einen Lichtpulses aus der Sicht des einen Bezugssystems von der Länge der Ausbreitung des anderen Lichtpulses aus der Sicht des anderen Bezugssystems verschieden sein, weil sich zwar die beiden Photonen immer gemeinsam am selben Ort befinden (ein Photon kann ein anders nicht überholen), jedoch die zueinander bewegten Ausgangspunkte der Lichtpulse (die Lichtquellen) sich bis zum Ende des Prozesses - je nach Relativgeschwindigkeit und Prozessdauer - voneinander entfernt haben.

Ganz selbstverständlich 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 Aufsätze aus dem Jahr 1905 der Berechnung des Umrechnungsfaktors für die verschiedenen Zeitspannen zu Grunde gelegt.

Aber nicht Zeit oder Raum im bisherigen Sinn, sondern die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses, den ein Beobachter ausgesendet hat, gewinnt bei dieser Sichtweise grundlegende Bedeutung. Die Wirkungsausbreitung (zB in Form der Ausbreitung eines Photons, das von einer beim Beobachter ruhenden Lichtquelle ausgesendet wird) legt immer das an Raum zurück, was sie an Zeit dafür benötigt. Mit anderen Worten: Aus der Sicht eines Beobachters ist Zeit 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. 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 seines Lichtpulses zu messen, muss der Beobachter nur die Zeit halbieren, die

ein beim zweiten Ereignis reflektierter Lichtpuls insgesamt 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. Die Länge der Ausbreitung eines von einem Beobachter (allenfalls fiktiv) ausgesendeten Lichtpulses ist von nun an sein Maßstab für Raum und Zeit. Die absolute substantielle Zeit und der absolute substantielle Raum der newtonschen Theorie werden durch eine relationale Auffassung von Zeit und Raum ersetzt, die an die endliche und konstante Wirkungsausbreitung anknüpft. Die newtonsche Mechanik sinkt zu einer Näherungsrechnung für niedrige Relativgeschwindigkeiten ohne inneren Wahrheitswert herab.

Diese Überlegungen können nun auch dem Gedankenexperiment mit der bewegten Lichtuhr zu Grunde gelegt werden. Jeder der zueinander bewegten Beobachter sendet bei deren Begegnung (Ereignis E_1) von einer jeweils bei ihm ruhenden Lichtquelle einen Lichtpuls so aus, dass sich die Photonen an der Spitze der beiden Lichtpulse gemeinsam ausbreiten, bis sie gemeinsam (zB beim gegenüberliegenden Spiegel einer Lichtuhr) eintreffen (Ereignis E_2). Um bei dem obigen Beispiel zu bleiben, sendet der Beobachter S seinen Lichtpuls senkrecht zur Bewegungsachse aus, während der Beobachter S' seinen Lichtpuls in einem solchen Winkel zur Bewegungsachse aussendet, dass es zur besagten gemeinsamen Ausbreitung der Photonen kommt. Der Winkel (bzw. das Verhältnis von t zu t') ergibt sich wie oben aus dem rechtwinkligen Dreieck mit den Seiten t , $v \cdot t'$ und t' . Es baut auf den drei Prämissen der speziellen Relativitätstheorie auf und gewährleistet in dieser Konstellation, dass das vom Beobachter S' ausgesendete Photon gemeinsam mit dem vom Beobachter S ausgesendeten am oberen Ende der Lichtuhr des Beobachters S eintrifft. Der Effekt ergibt sich nicht mehr aus dem (nach newtonscher Mechanik nicht nachvollziehbaren) gegenseitigen "Beobachten" von Photonen, sondern aus der gemeinsamen Ausbreitung von Photonen. Nicht geheimnisvolle Veränderungen von Zeit und Raum in newtonschen Sinn, sondern die endliche und konstante Wirkungsausbreitung ist der Grund für die Effekte der speziellen Relativitätstheorie.

5. Die populärwissenschaftliche Erklärungen verkomplizieren diese - an sich durch den vollzogenen Bruch mit der newtonschen Mechanik widerspruchsfreie - Lösung durch die hinzugefügte philosophische Deutung, die Verlängerung der Prozessdauer t' käme dadurch zu Stande, dass aus der Sicht des Beobachters S' 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 "aus Sicht des Beobachters S' " führt bei dem Gedankenexperiment zu einem logischen Zirkel, weil beim Beobachter S die Länge der Lichtuhr und damit die Prozessdauer den unveränderlichen Ausgangspunkt des Gedankenexperiments bilden. Außerdem müssten sich aus der Sicht des Beobachters S' die Lichtpulse des Beobachters S bei einigen Richtungen im Rahmen eines langsameren Zeitablaufs, bei anderen Richtungen aber im Rahmen eines schnelleren Zeitablaufs ausbreiten. Die "Beobachtung" eines einheitlich langsameren Vergehens der Zeit beim bewegten Beobachter S 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 Frequenzverringerng 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. Zusammenfassend ist die Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" 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. Die besagte Konstanz ist vielmehr eine Folge des Umstandes, dass sich Photonen gegenseitig nicht überholen können und 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. Die konstanten Wirkungsausbreitung gebiert Raum und Zeit im Verhältnis von 1:1. Die "Lichtgeschwindigkeit" ist definitionsgemäß konstant, auch wenn sie statt mit einer Lichtuhr mit herkömmlichen Maßstäben und Uhren gemessen wird.

Die populärwissenschaftliche Darstellung mit ihrer faszinierenden Annahme einer langsamer vergehenden Zeit beim "bewegten" Beobachter missachtet das wissenschaftliche Sparsamkeitsprinzip. 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)).

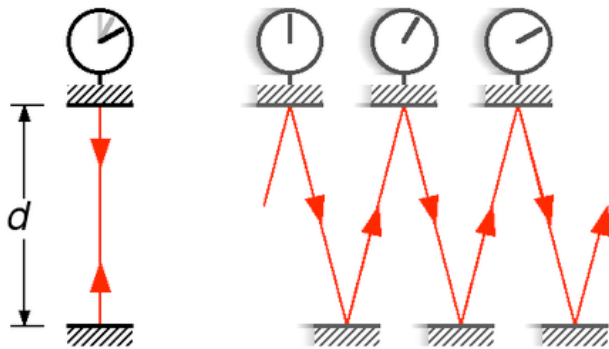
Wien, 14. September 2021

Anhang:

1) Deutsche Wikipedia-Ausgabe:

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

per 17.7.2019

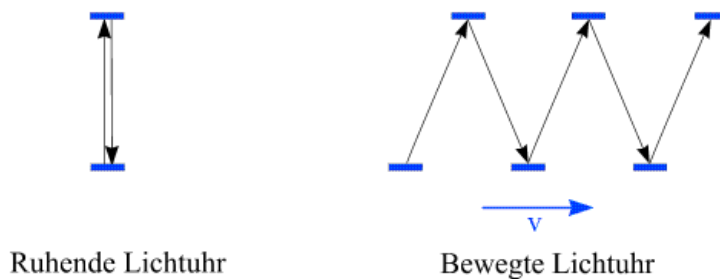


"Wenn eine Lichtuhr A [ruhend im System A] gegeben ist, wird aus Sicht eines mit ihr mitbewegten (also relativ zu ihr ruhenden) Beobachters [aus der Sicht des Systems A] ein Blitz für den einfachen Weg zwischen den Spiegeln die Zeit $T_0 = d/c$ benötigen. (...) Wird nun eine zweite Lichtuhr B [die im 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 $T' = T_0 * 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ (...)."

2) Franz Embacher, Uni Wien:

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

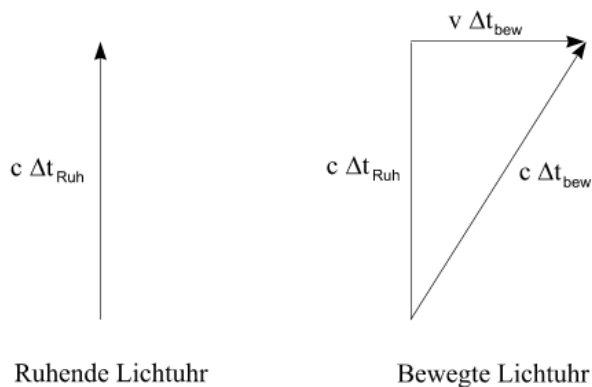
per 17.7.2019



"Die linke Grafik zeigt die Lichtuhr [S] vom Standpunkt eines Beobachters, der sich ihr gegenüber in Ruhe befindet, d.h. vom Standpunkt ihres Ruhesystems. 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 Ruhesystem 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 Ruhesystem der Lichtuhr [aus Sicht des Systems S] wird mit Δt_{Ruh} bezeichnet. Der Abstand der beiden Spiegel ist daher $c \Delta t_{\text{Ruh}}$, 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 $c \Delta t_{\text{bew}}$. Als Abstand der beiden Spiegel übernehmen wir den im Ruhesystem ermittelten Wert $c \Delta t_{\text{Ruh}}$. Während des Prozesses ist der obere Spiegel um die Strecke $v \Delta t_{\text{bew}}$ 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. (...)

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

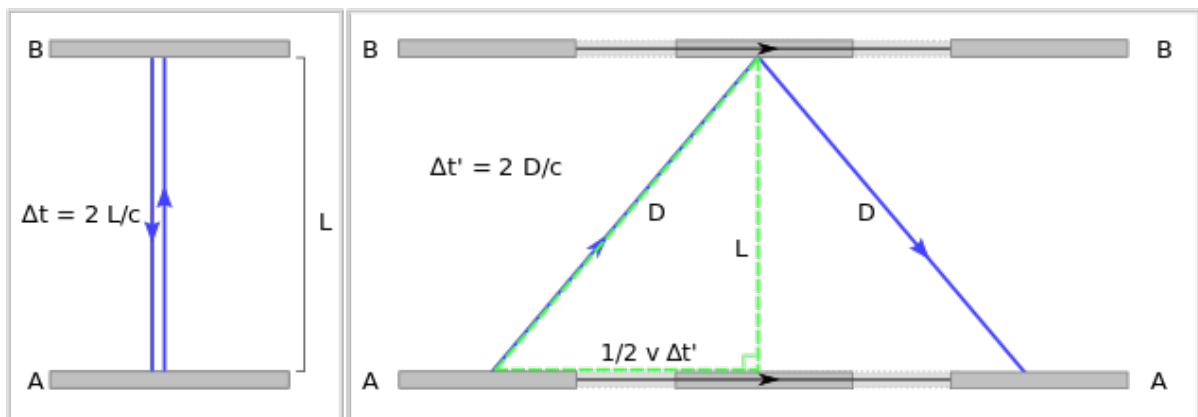
(...)

'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 Ruhesystem.' "

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 (...)."