

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

Kritik der bewegten Lichtuhr

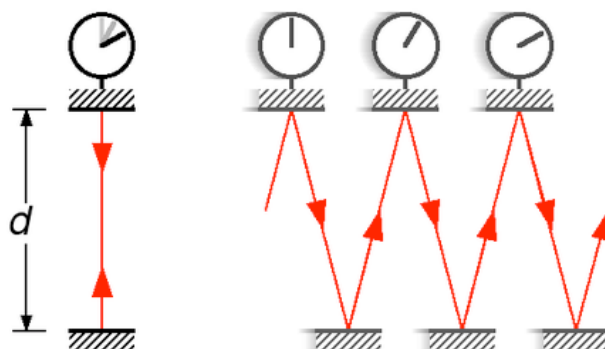
(Zur Didaktik der speziellen Relativitätstheorie)

1. Die meisten populärwissenschaftlichen Erklärungen der speziellen Relativitätstheorie berufen sich auf ein Gedankenexperiment, in dem zwei Beobachter, die sich zueinander in Bewegung befinden, wechselseitig ihre "Lichtuhren" betrachten. Eine Lichtuhr misst die Zeit mit dem Takt eines Photons, das an der Spitze eines Lichtpulses zwischen zwei Spiegeln auf und abpendelt.

Die Beobachter S und S' bewegen sich mit der gleichförmigen Relativgeschwindigkeit v aneinander vorbei. Im Augenblick ihrer Begegnung schaltet der Beobachter S seine Lichtuhr ein. Das Photon an der Spitze des Lichtpulses beginnt sich aus der Sicht dieses Beobachters S vom unteren Spiegel zum oberen Spiegel seiner Lichtuhr auszubreiten.

Nun wird die Frage gestellt, wie der andere Beobachter S' dieses Photon "sieht". Da die Bahn eines Photons nicht im herkömmlichen Sinn von der Seite aus "gesehen" werden kann, ist die Frage dahin zu verstehen, wie die Beobachter die Ereignisse der Anwesenheit des Photons zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort in ihren Koordinatensystemen S bzw. S' verzeichnen.

Aus der Sicht des Beobachters S, bei dem die Lichtuhr S ruht, steigt das Photon senkrecht zur Bewegungsachse auf und pendelt auf dem kurzen Weg d auf und ab. Aus der Sicht des relativ dazu bewegten Beobachters S' beschreibt das Photon in der sich vorbeibewegenden Lichtuhr S einen längeren Zick-Zack-Weg.



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

Nach der auf dem Versuch von Michelson und Morley beruhenden Grundannahme der speziellen Relativitätstheorie, der Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" (im Folgenden: c), erfolgt die Ausbreitung des Photons S sowohl aus der Sicht des Beobachters S als auch aus der Sicht des Beobachters S' mit c . Mit anderen Worten: Die Relativgeschwindigkeit der Lichtquelle spielt für die Ausbreitung eines Lichtstrahls keine Rolle.

Aus der Sicht des Beobachters S' ist der vom Photon zurückgelegte schräge Weg länger als der senkrechte Weg aus der Sicht des Beobachters S . Das Photon legt diesen längeren Weg in Anbetracht seiner gleich bleibenden "Lichtgeschwindigkeit" aber nicht mehr in der Zeitspanne t , sondern in der entsprechend längeren Zeitspanne t' zurück. Ein- und derselbe Prozess dauert aus der Sicht des einen Beobachters S' länger (t') als aus der Sicht des Beobachters S (t). Dies ist die notwendige Konsequenz daraus, dass die "Lichtgeschwindigkeit" konstant ist.

Mit dieser Schlussfolgerung ist freilich noch keine wirkliche Einsicht in die Bedeutung dieses Vorgangs verbunden. Um ihn durchschauen zu können, müssen die Begriffe Zeit, Raum, Relativgeschwindigkeit und Lichtgeschwindigkeit von der newtonschen Mechanik gereinigt werden.

2. Das zeigt sich daran, dass es unmöglich ist, die Verlängerung der Prozessdauer t auf die Prozessdauer t' auf der Grundlage der newtonschen Mechanik zu berechnen. Die Strecke d (siehe oben) geteilt durch die "Lichtgeschwindigkeit" würde die Zeitspanne t ergeben, die das Photon an der Spitze des Lichtpulses benötigt, um an das obere Ende der Lichtuhr zu gelangen. In dieser Zeit t hätten sich die Lichtuhr S und der Beobachter S' um die Strecke $v \cdot t$ voneinander entfernt. Die Länge der schrägen Photonenbahn p würde sich mit $p = \sqrt{c^2 \cdot t^2 + v^2 \cdot t^2}$ errechnen, die längere Zeitspanne $t' = p/c$ mit $t \cdot \sqrt{1+v^2/c^2}$. Würde aber aus Sicht des Beobachters S' die längere Zeit t' vergehen, so hätte sich die Lichtuhr S vom Beobachter S' nicht nur um die Strecke $v \cdot t$, sondern um die Strecke $v \cdot t'$ entfernt. Das hätte zur Folge, dass das Photon auf der Bahn p das obere Ende der Lichtuhr verfehlt.

Die Berechnung muss anders erfolgen. Es geht nicht darum, wie der Beobachter S' das Photon in der Lichtuhr S in herkömmlicher newtonscher Auffassung "sieht", sondern darum, auf welcher - der newtonschen Physik widersprechenden - Bahn das Photon aus der Sicht des

Beobachters S' 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, wenn folgende drei Voraussetzungen gegeben sind:

Erstens: das Photon breitet sich mit c aus. Zweitens: die räumlichen Abstände senkrecht zur Bewegungsachse bleiben aus der Sicht beider Beobachter gleich. Drittens: die Relativgeschwindigkeit v der beiden Beobachter ist wechselseitig betrachtet gleich.

Aus der Sicht des "bewegten" Systems S sind gegeben: die Länge d der senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Lichtuhr (und damit die Prozessdauer t) und die Relativgeschwindigkeit v des Beobachters S'.

Aus der Sicht des "ruhenden" Beobachters S' breitet sich das Photon mit c aus, die senkrecht zur Bewegungsachse stehende "bewegte" Lichtuhr S hat die Länge d und der "bewegte" Beobachter S hat die Relativgeschwindigkeit v . Nun muss aus diesen Vorgaben die passende Zeitspanne t' errechnet werden, in der aus der Sicht des "ruhenden" Beobachters S' das Photon S im Zuge des Bewegungsablaufs senkrecht über dem "bewegten" Beobachter S aufsteigt bis es schließlich das obere Ende der Lichtuhr S erreicht.

Aus dem rechtwinkligen Dreieck mit den Seiten $v \cdot t'$ und $c \cdot t$ sowie der Hypotenuse $c \cdot t'$ ergibt sich, dass die Prozessdauer t' um den sogenannten "Lorentzfaktor" $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ länger ist als die Prozessdauer t . Wird die Wirkungsausbreitung folgerichtig (siehe unten) "1" gesetzt ($c = "1"$), so hat die Geschwindigkeit v einen Wert zwischen 0 und 1 (ein Prozentsatz der "Lichtgeschwindigkeit"). Die Formel für die Lorentz-Transformation vereinfacht sich auf $t' = t/\sqrt{1-v^2}$.

3. Die populärwissenschaftliche Erklärungen verkomplizieren diese - an sich durch den vollzogenen Bruch mit der newtonschen Physik widerspruchsfreie und abgeschlossene - Lösung durch die hinzugefügte philosophische Komponente, 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' verwickelt sich: 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? Mit dieser ganz in den Bahnen des newtonschen Denkens gestellten Frage wird Verwirrung gestiftet.

Die behauptete Veränderung des Zeitablaufs ist aus dem Gedankenexperiment nicht ableitbar, soll sie doch in der Sphäre des Beobachters S eintreten, obwohl gerade der Takt der Lichtuhr des Beobachters S den Prozess definieren soll, der bei jeder Relativgeschwindigkeit den gleich bleibenden Orientierungspunkt des Gedankenexperiments bildet. Außerdem breiten sich nur einige Lichtpulse des Beobachters S in bestimmte Richtungen aus der Sicht des Beobachters S' langsamer aus, einige Lichtpulse in andere Richtungen müssten sie sich aus der Sicht des Beobachters S' schneller ausbreiten. Deshalb kann bei dieser Erklärung von einem einheitlichen langsameren Vergehen der Zeit beim Beobachter S keine Rede sein. Der Einwand, es dürften immer nur die Mittelwerte von zusammengesetzten Lichtausbreitungen, die zum Ursprung ihrer Ausbreitung beim Beobachter S zurückkehren, untersucht werden (M. Pössel, "Von der Lichtuhr zur Zeitdilatation", in: Einstein Online Vol. 04 (2010), 1101; <https://www.einstein-online.info/spotlight/LichtuhrZeitdilatation/>), ist nicht stichhaltig:

"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, bleibt unerfindlich.

An 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.

4. Die populärwissenschaftliche Darstellung ist mit ihrer Annahme einer langsamer vergehenden Zeit ein Beispiel für eine Missachtung des wissenschaftlichen Sparsamkeitsprinzips. Sie wäre ein klassischer Fall für "Ockhams Rasiermesser".

Die Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" ist nicht etwa darauf zurückzuführen, dass sich eine Substanz "Zeit", die mit einer irgendeiner "objektiven" Uhr gemessen würde, und eine Substanz "Raum", der mit einem "objektiven" 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 die Konsequenz der Grundtatsache,

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 immer und überall "1" sein. Das ist der Grund, warum die "Lichtgeschwindigkeit" konstant ist. Ein von jedem beliebigen Beobachter ausgesendetes Photon legt aus dessen Sicht das an Raum zurück, was es an Zeit dafür benötigt. Mit anderen Worten: Zeit ist das, was ein Lichtpuls zurücklegt. Raum ist das, was ein Lichtpuls zurücklegt.

5. Die Konstanz der Wirkungsausbreitung hat tiefgreifende Konsequenzen. Diese werden sichtbar, wenn zwei zueinander bewegte Beobachter je einen Lichtpuls in dem Augenblick aussenden, in dem sie sich bei ihrer Relativbewegung begegnen. Wenn die Beobachter ihre Lichtpulse jeweils in eine bestimmte, aufeinander abgestimmte Richtung aussenden, dann verknüpfen sich die Photonen an der Spitze dieser beiden Lichtpulse so miteinander, dass sie sich vom ersten Ereignis, dem ihrer Aussendung, bis zum zweiten Ereignis, dem ihres Ankommens, gemeinsam ausbreiten ("ein Photon kann ein anderes nicht überholen" - Prinzip der Absolutheit der Wirkungsausbreitung). Am einfachsten erfolgt diese Verknüpfung, wenn beide Lichtpulse entlang der Bewegungsachse der Beobachter (in Winkeln von Null Grad) ausgesendet werden. Die Lichtpulse sind nichts anderes als zwei ideale Maßstäbe, mit denen die zwei Beobachter den zeitlichen und räumlichen Abstand zweier Ereignisse - dem des gemeinsamen Aussendens und dem des gemeinsamen Ankommens der Photonen - voneinander messen. Praktisch kann das so erfolgen, dass die Beobachter die Zeit, die der beim zweiten Ereignis reflektierte Lichtstrahl bis zur Rückkehr zum jeweiligen Beobachter benötigt, jeweils halbieren.

Die Lorentz-Transformation lässt "den Fluss der Zeit" unberührt. 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)).

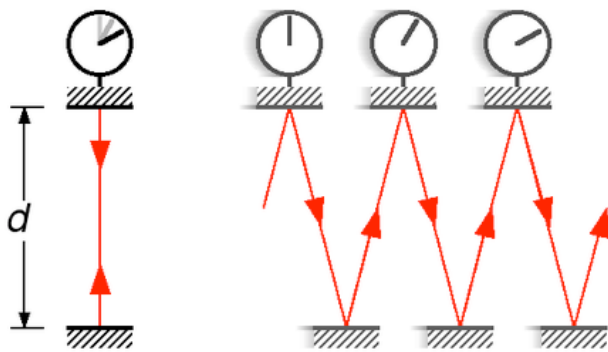
8.10.2020

Anhang:

1) Deutsche Wikipedia-Ausgabe:

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

per 17.7.2019

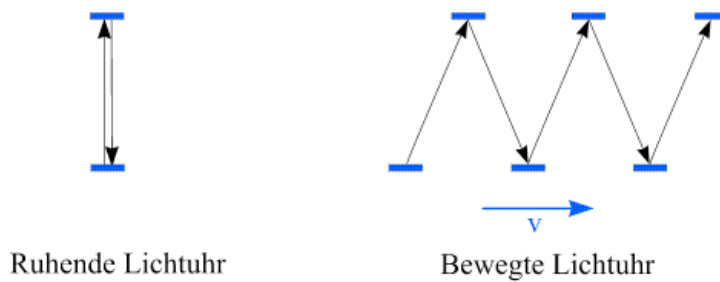


"Wenn eine Lichtuhr A [ruhend im System A] gegeben ist, wird aus Sicht eines mit ihr mitbewegten (also relativ zu ihr ruhenden) Beobachters [aus der Sicht des Systems A] ein Blitz für den einfachen Weg zwischen den Spiegeln die Zeit $T_0 = d/c$ benötigen. (...) Wird nun eine zweite Lichtuhr B [die im 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>

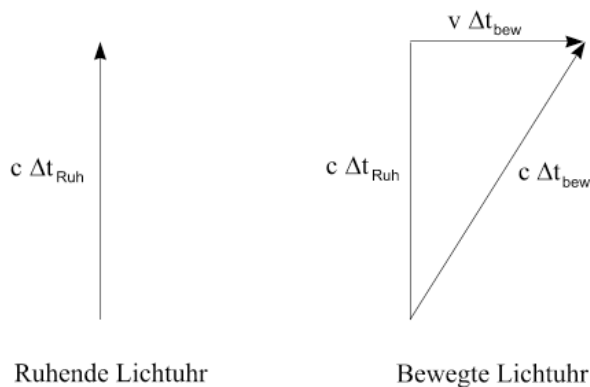
per 17.7.2019



"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. (...)

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

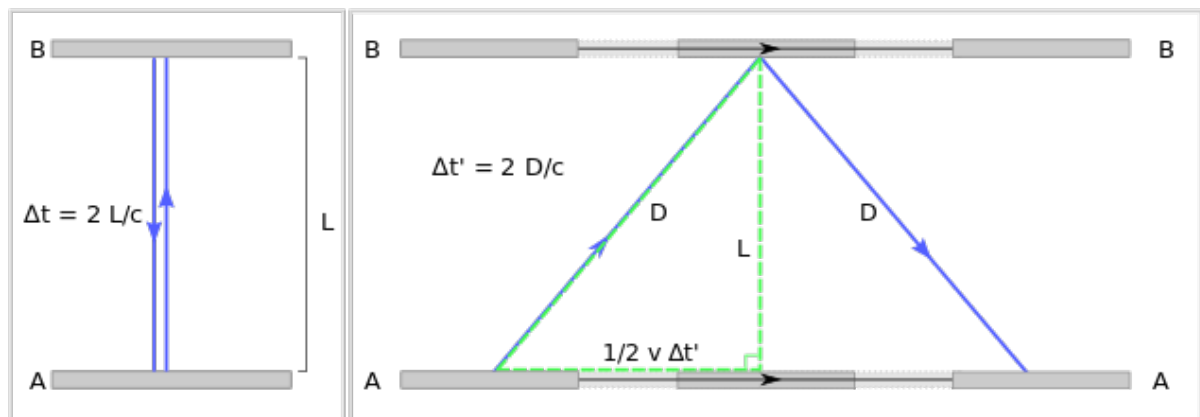
(...)

'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 (...)."