

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

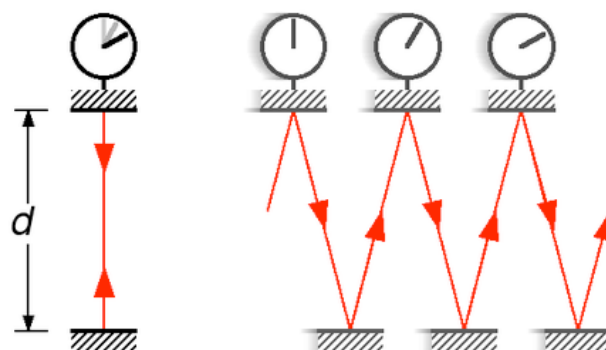
Kritik der bewegten Lichtuhr

1. Die Effekte der speziellen Relativitätstheorie - Zeitdilatation und Raumkontraktion - zeigen sich bei einem Vergleich der Ausbreitung eines Lichtpulses, der von einer ruhenden Lichtquelle ausgesendet wurde, mit der Ausbreitung eines Lichtpulses, der von einer bewegten Lichtquelle ausgesendet wurde.

Traditionellerweise werden diese Effekte an Hand des Gedankenexperiments mit einer bewegten Lichtuhr (einer Röhre, in der ein Photon an der Spitze eines Lichtpulses zwischen zwei Spiegeln hin und her pendelt) demonstriert.

Der Beobachter S, der eine Lichtuhr mit sich führt, und der Beobachter S' (der eine Uhr mit sich führt) bewegen sich mit der gleichförmigen Relativgeschwindigkeit v aneinander vorbei. Im Augenblick ihrer Begegnung schaltet der Beobachter S die senkrecht zur Bewegungsachse gehaltene Lichtuhr ein. Aus der Sicht des Beobachters S breitet sich das Photon 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 erstens des Aussendens des Photons vom unteren Spiegel und zweitens 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 .

In der newtonschen Gedankenwelt wäre die sich aus der Versuchsanordnung ergebende Reisezeit des Photons zwischen den beiden Spiegeln für alle Beobachter gleich lang. Demgemäß müsste die "Geschwindigkeit" des Photons auf der längeren Bahn aus der Sicht des Beobachters S' größer sein als die "Lichtgeschwindigkeit".

Nach der experimentell abgesicherten Grundannahme der speziellen Relativitätstheorie erfolgt aber die Ausbreitung des Photons sowohl aus der Sicht des Beobachters S als auch aus der Sicht des Beobachters S' mit der gleichen "Lichtgeschwindigkeit". Die Relativgeschwindigkeit der Lichtquelle hat auf die Ausbreitung eines Photons an der Spitze eines Lichtpulses keinerlei Auswirkung. Werden zwei Lichtpulse von zueinander bewegten Lichtquellen bei deren Begegnung zugleich in die gleiche Richtung ausgesendet, so können sich die Photonen an der Spitze dieser Lichtpulse dennoch gegenseitig nicht überholen.

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' zurücklegen. 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 einen noch zu bestimmenden Faktor länger dauern als aus der Sicht des Beobachters S .

2. Bei oberflächlicher Beurteilung dieser der newtonschen Physik widersprechenden Konsequenz könnte man meinen, die Ursache dafür läge darin, dass beim ("ruhenden") Beobachter S' mit zunehmender Relativgeschwindigkeit die Zeit immer rascher vergeht. In diesem Fall könnte 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 gegeben sein und diese 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 das Vergehen von Zeit in einem anderen Bezugssystem nicht "beobachten". Die Vorstellung, ein ruhender Beobachter könne die Zeiger einer bewegten Uhr sehen und feststellen, dass beim bewegten Beobachter die Zeit langsamer vergeht, ist zweifach verfehlt. Erstens würden die über den Raum verteilten, synchronisierten Uhren des bewegten Beobachters, wenn man sie denn zu einem bestimmten Zeitpunkt beobachten könnte, alle eine andere Zeit anzeigen. Zweitens ist eine unverfälschte Wahrnehmung nur in dem unendlich kurzen Augenblick der Begegnung mit einer solchen Uhr denkbar. Bewegte Uhren aus der Ferne zu beobachten bedeutet nur, Berichte über die unmittelbaren Wahrnehmungen vor Ort entgegen zu nehmen.

Beobachter können sohin Ereignisse nur in ihrem Bezugssystem nach Ort und Zeit verzeichnen (messen) und diese Messungen mit den Mitteilungen anderer Beobachter über deren Messergebnisse in anderen Bezugssystemen vergleichen. Aber selbst wenn man nun das Beobachten in diesem Sinn versteht, müsste man bei dem besprochenen Lichtpuls, der vom Beobachter S senkrecht zur Bewegungsachse ausgesendet würde, den Schluss ziehen, "dass die Zeit dort langsamer vergeht". Bei einem Lichtstrahl jedoch, der vom Beobachter S - in sonst gleicher Situation - entlang der Bewegungsachse in die Richtung des sich entfernenden Beobachters S' ausgesendet würde, müsste man hingegen den Schluss ziehen, "dass die Zeit dort schneller vergeht". Auch dieses Ergebnis zeigt die Sinnlosigkeit der Vorstellung von einer anders vergehenden Zeit. Ob eine Zeit schneller oder langsamer vergeht kann nicht davon abhängen, in welcher Richtung ein von der bewegten Lichtquelle ausgesendeter Lichtpuls, der "beobachtet" wird, ausgesendet wurde.

Die 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, zwingt vielmehr dazu, die tradierten Begriffe "Zeit", "Raum", "Geschwindigkeit" und "Lichtgeschwindigkeit" in Frage zu stellen.

3. Um herauszufinden, in welche Richtung diese Infragestellung gehen könnte, soll zunächst versucht werden, das Ausmaß der Verlängerung der Prozessdauer von t auf t' auf Basis der newtonschen Mechanik zu berechnen.

Die Berechnung der Zeitspanne t' nach newtonscher Mechanik müsste aus Sicht des Beobachters S von dem rechtwinkligen Dreieck ausgehen, 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 zur Folge, dass sich der Beobachter S mit seiner Lichtuhr während des Prozesses aus der Sicht des Beobachters S' nicht nur um die Strecke $v \cdot t$, sondern um die längere Strecke $v \cdot t'$ entfernen würde (die Relativgeschwindigkeit der Beobachter v muss aus der Sicht beider Beobachter gleich groß sein). 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 ermittelte Zeitspanne t' kann nicht richtig sein.

4. Die zutreffende Berechnung muss demgegenüber konsequent und ohne auf tradierte Vorurteile Rücksicht zu nehmen von folgenden drei Prämissen ausgehen: die "Lichtgeschwindigkeit" c des Photons, die Relativgeschwindigkeit v der Beobachter und der senkrecht zur Bewegungsachse stehende räumliche Abstand von zwei Ereignissen sind aus der Sicht aller Beobachter jeweils gleich.

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 aus dessen Sicht 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 aus dessen Sicht danach zu fragen, welche

Bahn das Photon - ausgehend vom unteren Ende der bewegten Lichtuhr S (Ereignis E_1) - nehmen muss, damit es nach dem 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 $v \cdot t'$ (um die sich der Beobachter S vom Beobachter S' entfernt hat), aus der Strecke $c \cdot t$ (der für beide Beobachter gleichen Länge der senkrecht zur Bewegungsachse stehenden Lichtuhr) und aus der Strecke $c \cdot t'$ (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, erfolgen aus deren jeweiliger Sicht zwei unterschiedliche gleichberechtigte Antworten ($v \cdot t$ bzw. $v \cdot t'$). Nicht nur die besagte Zeitspannen, sondern auch die räumliche Entfernungen zwischen den Beobachtern stellen sich anders dar als nach newtonscher Mechanik.

Wird die Relativgeschwindigkeit der bewegten Lichtuhr bzw. des bewegten Beobachters erhöht, so hat dies aus der Sicht des ruhenden Beobachters nicht nur zur Folge, dass der bewegte Beobachter schneller reist, sondern auch, dass der Prozess des Reisens - wie gezeigt - aus der Sicht des ruhenden Beobachters länger dauert und damit der vom bewegten Beobachter zurückgelegte Weg überproportional zur Geschwindigkeitserhöhung länger wird. Da die Reisedauer aus Sicht des bewegten Beobachters aber gleich bleibt, ist er nun in der Lage, bezogen auf die gewählten Relativgeschwindigkeit ("Koordinatengeschwindigkeit") überproportional weite Reisen zu unternehmen. Die genannte längere Strecke, die er aus Sicht des ruhenden Beobachters zurückgelegt hat, bewegt sich nicht nur mit ebenderselben höheren Relativgeschwindigkeit, sondern zudem verkürzt an ihm vorbei. Nach dem Verhältnis des aus Sicht des ruhenden Beobachters zurückgelegten Weges zu der aus der Sicht des bewegten Beobachters aufgewendeten Reisezeit kann der bewegte Beobachter sehr hohe Eigengeschwindigkeiten erreichen. Auf dieses Verhältnis von Weg (aus Sicht des ruhenden Beobachters) zur Zeit (aus Sicht des bewegten Beobachters) trifft die Aussage, die "Lichtgeschwindigkeit" könne nicht überschritten werden, nicht zu ("Eigengeschwindigkeit").

Wird die konstante Wirkungsausbreitung (die "Lichtgeschwindigkeit") "1" gesetzt, so hat in dem Berechnungsdreieck die Relativgeschwindigkeit v einen Wert zwischen 0 und 1 (diese sogenannte "Koordinatengeschwindigkeit" ist ein Prozentsatz der

"Lichtgeschwindigkeit"). Der Lorentz-Faktor vereinfacht sich auf $t' = t/\sqrt{1-v^2}$. Dass die Koordinatengeschwindigkeit v (anders als die Eigengeschwindigkeit) die "Lichtgeschwindigkeit" c nicht überschreiten kann, folgt aus ihrer Definition als Prozentsatz der "Lichtgeschwindigkeit" und nicht aus irgendwelchen geheimnisvollen physikalischen Barrieren.

5. Damit ist aber noch kein wirkliches Verständnis der speziellen Relativitätstheorie gewonnen. Sämtliche Überlegungen werden bei dem Gedankenexperiment mit der bewegten Lichtuhr schon im Ansatz durch die Aussage in die Irre geleitet, ein Photon hätte für jeden Beobachter "Lichtgeschwindigkeit". Mit der Verwendung des tradierten und scheinbar unproblematischen Begriffs der "Geschwindigkeit" zur Beschreibung der Ausbreitung von Lichtpulsen bewegt sich die Deutung der Vorgänge in den Bahnen der newtonschen Mechanik und kann über ihr Verständnis von Zeit und Raum nicht hinausgelangen. Dies mündet eben in Aussagen wie die, dass eine gleichförmige Relativgeschwindigkeit den Ablauf der Zeit und das Ausmaß des Raums verändern könnte. Die Veränderung würde so ausfallen, dass für die Ausbreitung von Photonen immer die "Lichtgeschwindigkeit" herauskäme. Auf die inneren Widersprüche derartiger Deutungen wurde bereits hingewiesen.

Die Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" wirft Fragen auf, die zu tief reichen, als dass sie mit einer bloßen Adaption der bisherigen Begriffe beantwortet werden könnten. Wie kann es sein, dass ein Photon ein anderes Photon nicht überholen kann, obwohl die beiden Photonen von Lichtquellen ausgesendet wurden, die sich aneinander vorbei bewegen? Wie kann es sein, dass eine Kugelwelle aus Licht einer bewegten Lichtquelle eine andere Kugelwelle aus Licht einer ruhenden Lichtquelle nicht überholen kann? Wie kann es sein, dass sich die Fronten der beiden Kugelwellen gemeinsam in Form eines Mantels ausbreiten, der mit euklidischer Geometrie nicht beschrieben werden kann?

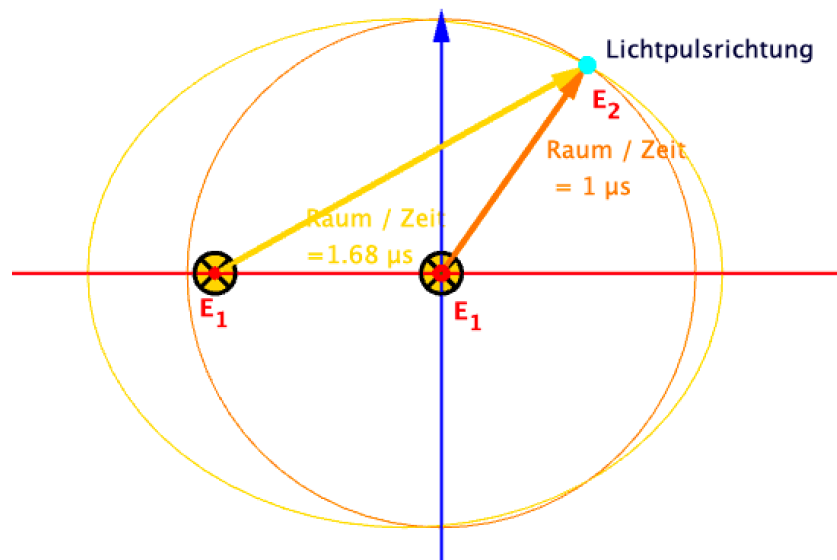
Die newtonschen Begriffe von Zeit, Raum und Geschwindigkeit sind nicht geeignet, diese Fragen widerspruchsfrei zu beantworten. Man darf nicht von diesen Begriffen ausgehen, um das Phänomen der konstanten "Lichtgeschwindigkeit" zu erklären, sondern man muss vom Phänomen der "Lichtgeschwindigkeit" ausgehen, um zu brauchbaren Begriffen von Zeit, Raum und Geschwindigkeit zu gelangen. Die konstante und unüberschreitbare Ausbreitung von Wirkungen abseits der Bewegung von Massepunkten (also die "Lichtgeschwindigkeit") ist der archimedische Punkt dieser Überlegungen.

Die genannte gemeinsame Ausbreitung zweier Photonen an der Spitze zweier Lichtpulse, die am selben Ort zugleich von zwei zueinander bewegten Lichtquellen ausgesendet werden, hat erstaunliche Konsequenzen. Erstens ist 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, weil sich zwar die beiden Photonen an den Spitzen der Lichtpulse gemeinsam ausbreiten (ein Photon kann ein anderes nicht überholen), aber die Ausgangspunkte dieser Lichtpulse, die zueinander bewegten Lichtquellen, sich voneinander entfernen. Zweitens kehren die Photonen an der Spitze dieser Lichtpulse, die gemeinsam an einem Spiegel reflektiert wurden, dennoch so zu den zueinander bewegten Lichtquellen (den Beobachtern) zurück, dass die Reflektion aus der Sicht jedes Beobachters zur Hälfte der Zeit der jeweiligen Gesamtausbreitung seines Photons stattgefunden hat (Absolutheit der Halbzeitreflektion; der Hinweg eines von dem betreffenden Beobachter ausgesendeten Photons ist immer gleich dem Rückweg). Dies erlaubt es den jeweiligen Beobachtern, die Länge der Ausbreitung seines Lichtpulses autonom zuverlässig festzustellen.

Dieser Befund legt es nahe, an die Stelle starrer Maßstäbe und tickender Uhren, deren für absolut gehaltenen Messergebnisse den bisherigen Begriffen von Zeit, Raum und Geschwindigkeit zu Grunde lagen, die Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses aus der Sicht des Beobachters, der diesen Lichtpuls ausgesendet hat, zu setzen. Die zwischen einem Beobachter und einem bestimmten Ereignis liegende Entfernung wird dadurch gemessen, dass der Beobachter die von seiner Lichtuhr angezeigte Zeit halbiert, die ein bei dem Ereignis reflektierter Lichtpuls von der Aussendung bis zur Rückkehr benötigt. Diese "Halbzeitreflexion" gilt absolut. Sie hängt bei der Ausbreitung von Licht im Vakuum nicht vom "Bewegungszustand" eines Beobachters ab.

Die Eignung der Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses zur Messung von Raum und Zeit beruht auf der These, dass ein Photon an der Spitze eines Lichtpulses, den ein Beobachter von einer bei ihm ruhenden Lichtquelle aussendet, von diesem Beobachter aus berechnet immer das an Raum zurücklegt, was es 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 (die Ereignisse haben einen „lichtartigen Abstand“). Unsere bisherigen Vorstellungen von Zeit und Raum sind Rekonstruktionen aus den über den Gesichtssinn zu uns herangetragenen Daten der Ausbreitung von Lichtpulsen.



Ein lichtartiger Abstand zwischen zwei Ereignissen E_1 und E_2 aus der jeweiligen Sicht zweier zueinander bewegter Beobachter (siehe Applet <https://www.geogebra.org/m/yajn74gr>)

Aus der Verschiedenheit der Ausbreitungslängen von koordinierten Lichtpulsen folgt für zueinander bewegte Beobachter jeweils die Verschiedenheit der räumlichen und der zeitlichen Entfernungen, 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 sein Maßstab für Raum und Zeit. Die absolute substantielle Zeit und der absolute substantielle Raum der newtonschen Theorie weichen einer relationalen Auffassung von Zeit und Raum, die an die endliche und konstante Wirkungsausbreitung anknüpft. Die newtonsche Mechanik sinkt zu einer nur für niedrige Relativgeschwindigkeiten brauchbaren Näherungsrechnung ohne inneren Wahrheitsgehalt herab.

6. Der eingangs erwähnte, unausweichlich notwendige Vergleich zwischen der Ausbreitung zweier Lichtpulse findet auch im Fall des Gedankenexperiments mit der bewegten Lichtuhr statt. Das ist allerdings erst auf den zweiten Blick erkennbar. Unabhängig von der vermeintlichen "Beobachtung" der Ausbreitung eines Lichtpulses in der bewegten Lichtuhr wird die Dauer der Ausbreitung jedenfalls mit einer ruhenden Uhr gemessen, bei der es sich wiederum um eine Lichtuhr, handelt, deren hinzuzudenkender Lichtpuls das Vergleichsobjekt darstellt. Ohne sich dies bewusst zu machen, kann das Gedankenexperiment nicht verstanden werden.

Die Vorstellung eines "Beobachtens" eines Photons, das von einer bewegten Lichtquelle ausgesendet wird, muss in dem Gedankenexperiment durch die Vorstellung ersetzt werden, dass jeder der zueinander bewegten Beobachter bei ihrer Begegnung (Ereignis E_1) von einer jeweils bei ihm ruhenden Lichtquelle einen Lichtpuls so aussendet, dass sich die Photonen an der Spitze der beiden Lichtpulse gemeinsam ausbreiten, bis sie am Ende des Prozesses gemeinsam ankommen, also zB beim gegenüberliegenden Spiegel einer Lichtuhr eintreffen (Ereignis E_2). So wird der tiefe innere Zusammenhang sichtbar, der zwischen der Unüberschreitbarkeit der Ausbreitung von Wirkungen und Zeit und Raum besteht.

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 $t' = t/\sqrt{1-v^2}$) ergibt sich aus dem bereits erwähnten rechtwinkligen Dreieck mit den Seiten t , $v \cdot t$ und t' , das aber - statt von einem "Beobachten" des Photons - nunmehr aus dem koordinierten Aussenden zweier Photonen von zwei zueinander bewegten Beobachtern abgeleitet wird.

7. Die populärwissenschaftlichen Erklärungen verkomplizieren diese - durch den Bruch mit der newtonschen Mechanik abgeschlossene - Erklärung durch die - das newtonsche Denken wieder aufnehmende - 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.mfl1.fall03/lectures09.pdf>).

Die oben gestellte Frage nach der Bahn des Photons aus der Sicht des Beobachters S' wird in den Gewohnheiten des newtonschen Denkens gestellt und damit ein Erkenntnisgewinn erschwert: 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 beim bewegten Beobachter S und damit die Veränderung der Prozessdauer bei diesem Beobachter S (angeblich nur "aus Sicht des Beobachters S'", was immer darunter zu verstehen sein soll), führt bei der Beurteilung des Gedankenexperiments zu einem logischen Zirkel, weil beim Beobachter S die Länge der Lichtuhr und damit die Prozessdauer die unveränderlichen Ausgangspunkte des Gedankenexperiments bilden. Wenn sich daher ein Zeitablauf selbst irgendwo verändern würde (was aber tatsächlich nicht der Fall ist), so könnte das nur der Zeitablauf beim Beobachter S' sein, wie die verschiedenen, bei unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten von ihm gemessenen Zeitspannen zeigen würden. Die durch einen ruhenden Beobachter S' erfolgende "Beobachtung" eines langsameren Vergehens der Zeit bei einem bewegten Beobachter S ist eine unsinnige Vorstellung.

Das wird zusätzlich dadurch klar, dass sich die vom Beobachter S jeweils in bestimmte Richtungen ausgesendeten Lichtpulse im Rahmen eines (vom Beobachter S' beobachteten) langsameren Zeitablaufs, bei anderen Richtungen aber im Rahmen eines (vom Beobachter S' beobachteten) schnelleren Zeitablaufs ausbreiten müssten. Auch der dagegen erhobene Einwand, es dürften immer nur die Mittelwerte von zusammengesetzten Lichtausbreitungen, die zum Beobachter S als dem Ursprung ihrer Ausbreitung zurückkehren, untersucht werden, 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." (M. Pössel, "Von der Lichtuhr zur Zeitdilatation", in: Einstein Online Vol. 04 (2010), 1101; <https://www.einstein-online.info/spotlight/LichtuhrZeitdilatation/>).

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, mit zunehmender Geschwindigkeit immer langsamer 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', der sich je nach dem Winkel der Annäherung verändern bzw. sich auch umkehren kann. Ein Dopplereffekt hat 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.

8. 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 konstante Wirkungsausbreitung gebiert Raum und Zeit im Verhältnis von 1:1.

Die populärwissenschaftliche Darstellung mit ihrer spektakulären Annahme einer beim gleichförmig "bewegten" Beobachter langsamer vergehenden Zeit 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, 7. Jänner 2022

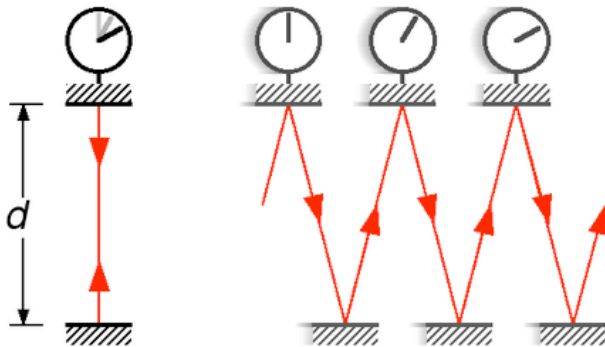
Anhang:

Populärwissenschaftliche Darstellungen (eckige Klammern [] nicht im Original):

1) Deutsche Wikipedia-Ausgabe:

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

per 17.7.2019

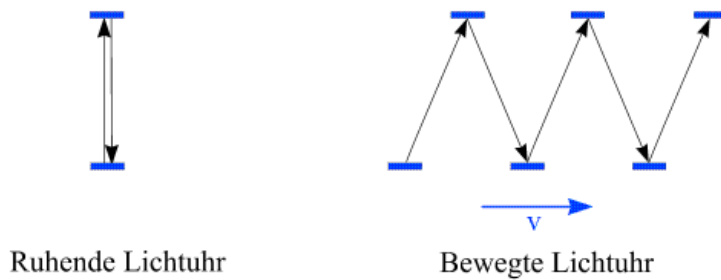


"Wenn eine Lichtuhr A gegeben ist, wird aus Sicht eines mit ihr mitbewegten (also relativ zu ihr ruhenden) Beobachters [*aus der Sicht des Systems A*] ein Blitz für den einfachen Weg zwischen den Spiegeln die Zeit $T_0 = d/c$ benötigen. (...) Wird nun eine zweite Lichtuhr B [*die im anderen System B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

2) Franz Embacher, Uni Wien:

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

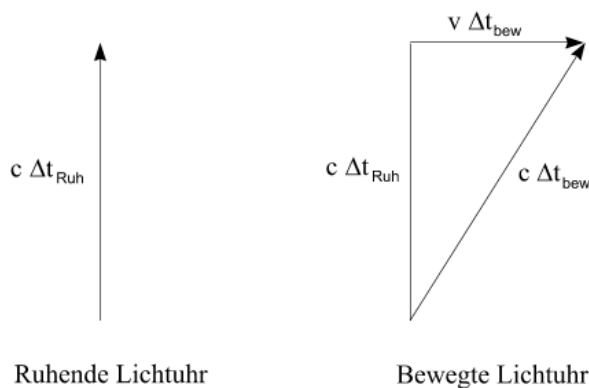
per 17.7.2019



"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. (...)

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

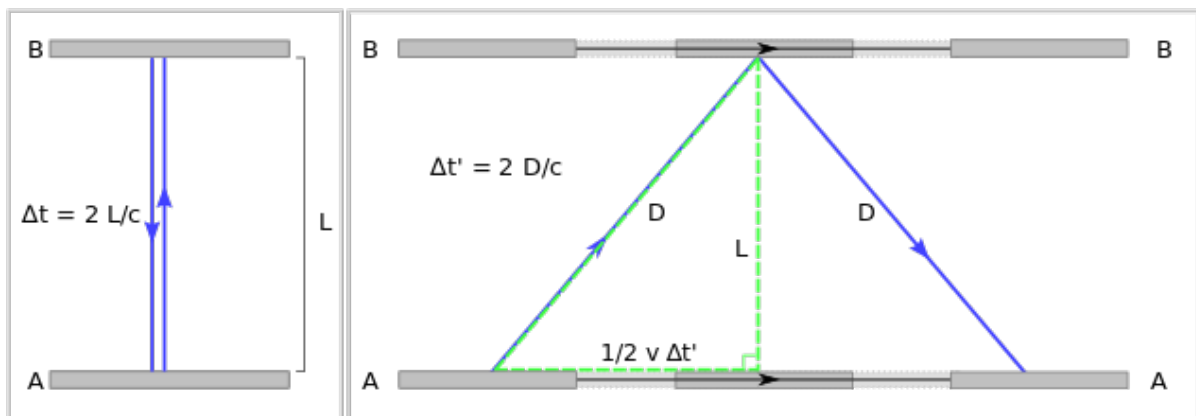
(...)

'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 (...)."