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

Die Rolle der Wirkungsausbreitung in der speziellen Relativitätstheorie

1. Um eine Geschwindigkeit eines Materiepunkts als Verhältnis von Weg zur Zeit zu ermitteln, misst ein ruhender Beobachter den zurückgelegten Weg und die dafür benötigte Zeit. Bei anhaltender Beschleunigung müsste der vom Materiepunkt in einer bestimmten Zeit zurückgelegte Weg immer länger (bzw. die für das Zurücklegen eines bestimmten Wegs benötigte Zeit immer kürzer) werden. Damit erscheinen auch unendlich hohe Geschwindigkeiten denkbar. Außerdem müssten synchronisierte Uhren unabhängig von ihrer Bewegung immer die gleiche, absolut vergehende Zeit anzeigen.

2. An diesen Ansichten traten gegen Ende des 19. Jahrhunderts Zweifel auf. Bei der Addition von hohen Geschwindigkeiten war es zu merkwürdigen Ergebnissen gekommen. Bei einem von Michelson und Morley durchgeführten Versuch hatte sich herausgestellt, dass die "Geschwindigkeit des Lichts" im Vakuum für alle Beobachter - unabhängig von ihren Bewegungen zueinander - immer gleich ist. Ein Photon überholt jeden Beobachter mit "Lichtgeschwindigkeit", ganz gleich, wie schnell er sich gegenüber der Lichtquelle bewegt.

Alle Versuche, die Konstanz und Unüberschreitbarkeit der "Lichtgeschwindigkeit" auf dem Boden der herkömmlichen Vorstellungen von Zeit und Raum zu erklären (zB Äthertheorien), sind in der Folge gescheitert. Als Grund für dieses Scheitern wurde schließlich die Unrichtigkeit der herkömmlichen Auffassungen über Zeit und Raum erkannt.

3. Man darf nicht von den vorgefassten Begriffen von Zeit und Raum ausgehen, um das Phänomen der konstanten "Lichtgeschwindigkeit" zu erklären (und dabei zu scheitern), sondern man muss vom Phänomen der "Lichtgeschwindigkeit" ausgehen, um sich über die Begriffe von Zeit und Raum Klarheit zu verschaffen.

Dabei kommt aber nicht etwa dem Licht als physikalischem Phänomen der Ausbreitung von elektromagnetischen Feldern (nach den Maxwellschen Gleichungen) eine derart weitreichende Bedeutung zu. Vielmehr steht die Lichtausbreitung (ebenso wie zB die Ausbreitung von Gravitationswellen) stellvertretend für ein fundamentales Prinzip des Seins: die Endlichkeit und Konstanz der Wirkungsausbreitung (Kausalausbreitung). Eine Ursache kann nie instantan eine Wirkung auslösen. Zwischen Ursache und Wirkung liegt immer eine Kluft. Bestünde keine solche "Getrenntheit", hätten jedenfalls mit einer ersten Ursache instantan deren Wirkungen und mit diesen wiederum auch alle Folgewirkungen eintreten müssen. Die Welt müsste mit ihrem Beginn zu Ende sein.

Es wäre falsch zu sagen, die Wirkungsausbreitung würde die Kluft zwischen Ursache und Wirkung mit einer bestimmten "Geschwindigkeit" überbrücken, denn die Wirkungsausbreitung (Lichtausbreitung) hat keine "Geschwindigkeit". Es hat keinen Sinn zu fragen, wie viel Raum ("Meter") ein Lichtpuls in einer Zeit ("Sekunde") zurücklegt. Es verhält sich umgekehrt: Raum, Zeit und Geschwindigkeit werden erst durch die Wirkungsausbreitung definiert.

4. Wir gewinnen einen aus der Sicht jedes unbeschleunigten Koordinatensystems gleichen Maßstab für den Raum und für die Zeit, indem wir einen in der Natur vorkommenden, reproduzierbaren Prozess als "materielle Konstante" zu Grunde legen, zB den Zerfall eines Atoms in einer aus der Sicht eines Koordinatensystems ruhenden Atomuhr. Dieser natürliche Prozess markiert zwei Ereignisse, die aus der Sicht dieses Koordinatensystems am selben Ort nacheinander stattfinden. Er würde sich in jedem der zueinander bewegten Koordinatensysteme

gleich abspielen. Kein System ist vor den anderen ausgezeichnet (Relativitätsprinzip).

Ein Lichtpuls, der sich während des durch die beiden Ereignisse determinierten Prozesses ausbreitet, legt aus der Sicht des betreffenden Koordinatensystems auf Basis der gewählten "materiellen Konstante" eine reproduzierbare Portion "Raum" in einer reproduzierbaren Portion "Zeit" zurück. Die räumliche "Länge der Ausbreitung des Lichtpulses" während des Prozesses reicht aus der Sicht des betreffenden Koordinatensystems vom Ort seiner Aussendung bis zum Ort seines Eintreffens. Die zeitliche "Länge der Ausbreitung des Lichtpulses" während des Prozesses reicht aus der Sicht des betreffenden Koordinatensystems vom Zeitpunkt seiner Aussendung bis zum Zeitpunkt seines Eintreffens.

Da beide "Längen der Ausbreitung des Lichtpulses" auf derselben Wirkungsausbreitung beruhen, ist aus der Sicht des betreffenden Koordinatensystems die räumliche "Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses" gleich groß wie die zeitliche "Länge der Ausbreitung eines Lichtpulses". Es hat bei der Wirkungsausbreitung keinen Sinn, zwischen der Größe der Portion an Raum, die sie zurücklegt, und der Größe der Portion an Zeit, die sie zurücklegt, zu unterscheiden.

Eine Signalfont des Lichts legt stets das an Raum zurück, was sie an Zeit dafür benötigt. Raum und Zeit bilden im Hinblick auf ihr gemeinsames Fundament, die Wirkungsausbreitung, eine Einheit, die "Raumzeit". Die Kluft, die aus der Sicht eines Koordinatensystems zwischen dem Beginn und dem Ende einer Wirkungsausbreitung (zwischen zwei Ereignissen) liegt, ist sowohl die "Zeit" als auch der "Raum". Beide sind ein aus den Relationen der Wirkungsausbreitung gewonnenes geistiges Konstrukt.

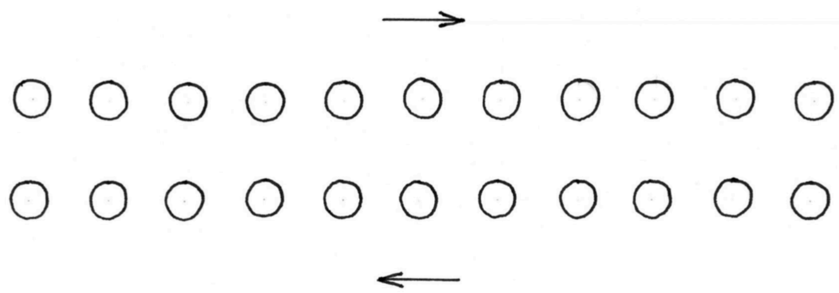
Die "Länge der Ausbreitung des Lichtpulses im betreffenden Koordinatensystem" (die Wirkungsausbreitung) definiert zwei gleich große Maßeinheiten: einen räumlichen Abstand als Maßeinheit für den Raum und einen zeitlichen Abstand als Maßeinheit für die Zeit. Die Portion an Raum, die während des gewählten Prozesses vom Licht durchmessen wird, ist die Maßeinheit für eine räumliche Entfernung ("Lichtsekunde"). Die Portion an Zeit, die der gewählte Prozess gedauert hat, ist die Maßeinheit für die zeitliche Entfernung (ebenfalls "Lichtsekunde"). Die "Lichtgeschwindigkeit" ist das Verhältnis der zurückgelegten Portion an Raum zur gleich großen zurückgelegten Portion an Zeit, also dimensionslos "1".

Die "Geschwindigkeit" ist das aus der Sicht des jeweiligen Bezugssystems bestimmte Verhältnis des vom Materiepunkt zurückgelegten Wegs zu der dafür benötigten Zeit. Sowohl der Weg des Materiepunkts als auch die für die Zurücklegung benötigte Zeit wird in Lichtsekunden (der Maßeinheit der Wirkungsausbreitung) gemessen, wobei bei ihm die Zeit immer länger ausfällt als der bewältigte Weg. In der Zeit von "1" (in einer zeitlichen Lichtsekunde) kann ein Materiepunkt höchstens einen Weg von annähernd "1" (annähernd eine räumliche Lichtsekunde) zurücklegen. Als Verhältnis von Weg zu Zeit ist die Geschwindigkeit daher ein Bruchteil bzw. ein Prozentsatz der "Lichtgeschwindigkeit" von "1".

Die (Koordinaten)Geschwindigkeit kann schon aus ihrem eigenen Begriff heraus - und nicht wegen irgendwelcher geheimnisvollen physikalischen Barrieren - niemals so groß werden wie die "Lichtgeschwindigkeit". Der so definierten Geschwindigkeit eines Materiepunkts kommt der Wirkungsausbreitung auch bei noch so hoher oder langer Beschleunigung mit keinem Schritt näher. Jeder Lichtpuls, der vom Materiepunkt ausgesendet wird oder an diesem vorbeikommt, überholt den Materiepunkt unter allen Umständen mit "Lichtgeschwindigkeit" (siehe oben).

5.1. Nach herkömmlicher Auffassung zeigen ruhende (unbeschleunigte) Uhren, die einmal synchronisiert worden sind, untereinander immer die gleiche Zeit an. Daran soll sich nichts ändern. Die weitere auf der Vorstellung einer absoluten Zeit beruhende Ansicht, dass solche Uhren auch im unmittelbaren Vergleich mit vorbeibewegten Uhren immer die gleiche Zeit anzeigen würden, stellt sich aber bei näherer Betrachtung als falsch heraus. Nur Uhren, die sich zueinander in Ruhe befinden, zeigen nach ihrer Synchronisation untereinander die gleiche, fortlaufend vergehende Zeit an.

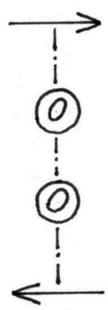
Stellen wir uns aber zB Beobachter vor, die sich - gleichsam wie Autos im Gegenverkehr - in zwei Reihen aneinander vorbeibewegen. Jeder Beobachter führt eine Uhr mit sich.



Alle Uhren haben die gleiche Bauart und gehen gleich schnell.

Nehmen wir an, die Relativgeschwindigkeit (v) der Beobachter beträgt 60% der "Lichtgeschwindigkeit" (c). Aus der Sicht des einen Beobachters bewegt sich also der andere Beobachter mit v = 0,6c an ihm vorbei.

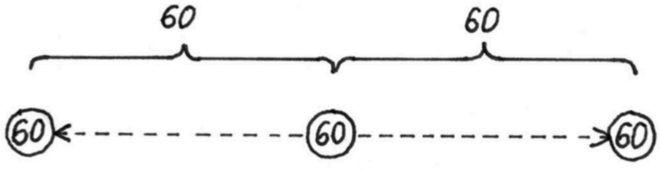
Wir greifen nun zwei Beobachter heraus, zB die beiden Beobachter in der Mitte ihrer Reihe. In dem Augenblick, in dem diese Beobachter aneinander vorbeikommen, stellen sie die Zeiger ihrer Uhren auf "Null" (zu den anderen Uhren der jeweiligen Uhrenreihe siehe unten). Dies bildet die Ausgangsbasis für den Vergleich, ob synchronisierte Uhren, die sich zueinander in einer Relativbewegung befinden, bei ihrer Begegnung immer noch die gleiche Zeit anzeigen oder eben nicht.



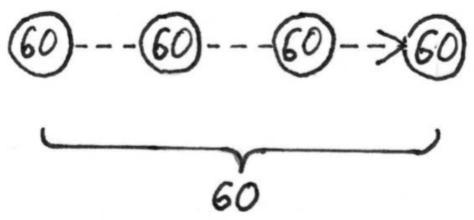
Um alle anderen Uhren der jeweiligen Uhrenreihe auf denselben Stand zu bringen, wie die mittlere Uhr, müssen alle Uhren einer Reihe synchronisiert werden. Zu diesem Zweck muss der jeweilige Beobachter in der Mitte seiner Uhrenreihe einen Lichtpuls zu den aus seiner Sicht vor und hinter ihm ruhenden Uhren aussenden (jedes sonstige gleichförmig bewegte Signal bekannter Geschwindigkeit würde für diesen Zweck aber auch genügen). Das Licht legt aus der jeweiligen Sicht der Beobachter das an Raum zurück, was es an Zeit dafür benötigt. Benötigt der Lichtpuls zB 60 Sekunden bis zur nächsten Uhr, so ist diese Uhr zeitlich 60 Lichtsekunden und räumlich 60 Lichtsekunden von der ersten Uhr entfernt.

Die Zeitspanne, die der Lichtpuls bis zur nächsten Uhr benötigt, wird idealerweise mit einer "Lichtuhr" gemessen, das sind zwei parallele Spiegel in bestimmtem räumlichen Abstand, zwischen denen die Signalfront eines Lichtpulses abzählbare Pendelbewegungen ausführt. Jeder Beobachter kann die Länge der Ausbreitung seines Lichtpulses bis zum Ereignis des Vorbeikommens bei der nächsten Uhr nach dem Prinzip der gleichteiligen "Halbzeitreflexion" von Lichtpulsen feststellen, ohne sich zum anderen Ende der auszumessenden Strecke begeben zu müssen. Er muss lediglich die Zeit für den Hin- und Rücklauf des bei dem betreffenden Ereignis reflektierten Lichtpulses halbieren (vgl. *W. Stegmüller*, Erfahrung, Festsetzung, Hypothese und Einfachheit in der wissenschaftlichen Begriffs- und Theoriebildung, Berlin u.a., Springer (1970), S 79 und 146f).

Werden in dem Augenblick, in dem die Lichtpulse bei den 60 Lichtsekunden weit entfernt aufgestellten Uhren eintreffen, diese auf "60 Sekunden" gestellt, so zeigen alle drei Uhren dieser Uhrenreihe fortan fortlaufend dieselbe Zeit.



Der zwischen Raum und Zeit bestehende Zusammenhang wird sichtbar, wenn sich ein Lichtpuls entlang einer solchen synchronisierten Uhrenreihe ausbreitet. Diejenige Uhr der Uhrenreihe, bei der das Photon an der Spitze des Lichtpulses gerade vorbei kommt, zeigt immer genau den Zeitpunkt an, der ihrer räumlichen Entfernung von der Ausgangsuhr entspricht.

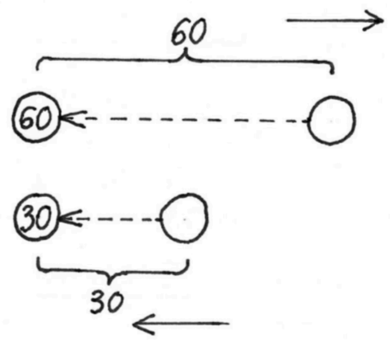


5.2. Nun senden zwei zueinander bewegte Beobachter in der Mitte ihrer jeweiligen Uhrenreihe bei ihrer Begegnung je einen Lichtpuls in die gleiche Richtung entlang ihrer Bewegungsachse (entlang ihrer Uhrenreihen) aus. Die Signalfronten der beiden Lichtpulse können sich wegen der Konstanz und Unüberschreitbarkeit der Wirkungsausbreitung gegenseitig nicht überholen.

Überall, wo die Signalfronten bei ihrer gemeinsamen Ausbreitung vorbeikommen, befinden sich auch zwei bestimmte Uhren der Uhrenreihen der beiden Beobachter, die gerade aneinander vorbeikommen und deren Anzeigen unmittelbar miteinander verglichen werden können. Diese Uhren zeigen jeweils die Zeit an, die der Länge der Ausbreitung des jeweiligen Lichtpulses entspricht.

Während sich die beiden Photonen an der Spitze der beiden Lichtpulse (die Signalfronten) gemeinsam ausbreiten und sich somit immer am selben Ort befinden, haben sich die beiden Beobachter (die Lichtquellen) auf Grund ihrer Relativgeschwindigkeit seit der Aussendung ihrer Lichtpulse voneinander entfernt. Die Längen der Ausbreitung ihrer Lichtpulse bis zu dem genannten Ereignis des

Vorbeikommens der beiden Uhren sind daher aus Sicht der jeweiligen Beobachter verschieden. Somit unterscheiden sich auch die Zeiten, die von den sich begegnenden Uhren der jeweiligen Uhrenreihe angezeigt werden, bei denen die beiden Photonen an der Spitze dieser Lichtpulse unterschiedlicher Ausbreitungslänge gerade eintreffen. Das bedeutet das Ende der newtonschen Physik.



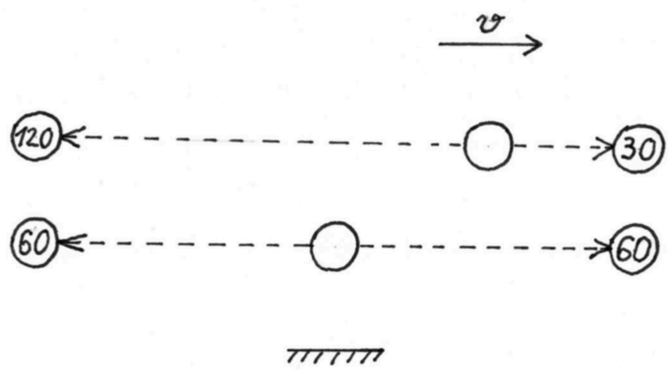
Aneinander vorbeibewegte synchronisierte Uhren der Uhrenreihe können aus diesem Grund bei ihrer Begegnung nicht die gleiche Zeit anzeigen. Die Wirkungsausbreitung, die "Lichtgeschwindigkeit", der Ablauf der Zeit usw. sind in allen Inertialsystemen gleich. Alle Uhren ticken in allen gleichförmig bewegten Systemen gleich schnell. Aber der zeitliche und der räumliche Abstand zwischen (entfernten) Ereignissen sind aus der Sicht verschiedener Systeme nicht gleich.

5.3. Um die Symmetrie des Geschehens zu erfassen, sollen zwei zueinander bewegte Beobachter bei ihrer Begegnung nicht nur in eine, sondern in beide Richtungen entlang ihrer Bewegungsachse je einen Lichtpuls aussenden. Da kein Photon ein anderes überholen kann, breiten sich auf jeder Seite zwei Photonen koordiniert aus und treffen immer gemeinsam bei beliebigen Ereignissen ein.

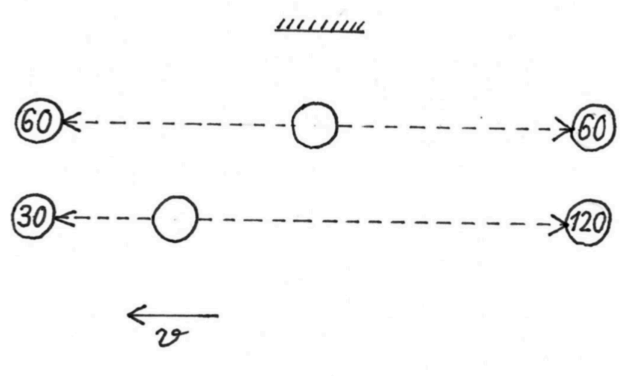
Nun behauptet der eine Beobachter 1 bezogen auf seine “Gegenwart” (nach der Zeitspanne, die aus seiner Sicht seit der Begegnung verstrichen ist), die Ausbreitungen seiner beiden Lichtpulse seien gleich lang und würden aus seiner Sicht bei zwei gleichzeitigen, von ihm gleich weit entfernten Ereignissen eintreffen.

Er hat Recht, denn er befindet sich genau in der Mitte zwischen diesen beiden Ereignissen.

Was soll nun aber der andere Beobachter 2 zu diesen beiden konkreten Ereignissen sagen, die vom Beobachter 1 festgelegt und als "gleichzeitig" beschrieben worden sind? Die Ausbreitungen seiner beiden Lichtpulse (deren Photonen an der Spitze sich gemeinsam mit denen des Beobachters 1 ausgebreitet haben) können in Bezug auf diese Ereignisse nicht ebenfalls gleich lang sein, weil er sich bereits vom anderen Beobachter entfernt hat und er sich daher nicht ebenfalls in der Mitte zwischen diesen beiden Ereignissen befinden kann. Er kommt in Anbetracht der unterschiedlichen Längen der Ausbreitung der von ihm ausgesendeten Lichtpulse zu dem Schluss, dass diese beiden konkret festgelegten Ereignisse nicht gleichzeitig in seiner “Gegenwart” statt gefunden haben. Das eine Ereignis, bei dem sein Lichtpuls mit der kürzeren Ausbreitung eintraf, trat für ihn früher ein, während das andere Ereignis, bei dem sein Lichtpuls mit der längeren Ausbreitung eintraf, für ihn später eintrat.



Umgekehrt finden Ereignisse, die der Beobachter 2 als gleichzeitig beschrieben hat, für den Beobachter 1 nicht gleichzeitig statt.



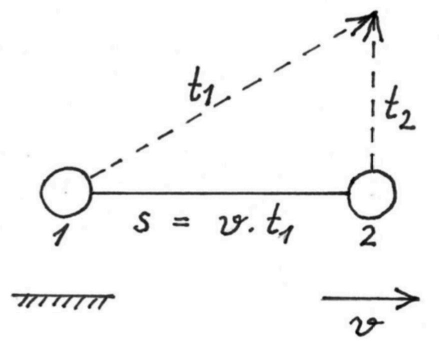
Niemals könnten die zueinander bewegten Beobachter entfernte Ereignisse (außerhalb der "relativistischen Mitte") festlegen, die sowohl aus der Sicht des einen Beobachters als auch aus der Sicht des anderen Beobachters gleichzeitig stattfinden. In diesem Sinn spricht man von der Relativität der Gleichzeitigkeit. Sie steht nicht im Widerspruch zur intuitiven Gewissheit, dass die Wirkungsausbreitung (das Vergehen der Zeit bei jeden der Beobachter als Kategorie des Denkens) in absolutem Gleichschritt erfolgt.

6. Wenn die Beobachter bei ihrer Begegnung nicht nur einzelne Lichtpulse, sondern zwei Kugelwellen aus Licht (Lichtpulse in alle Richtungen) aussenden, können sich die beiden Signalfronten, gebildet aus sämtlichen Photonen an der Spitze aller Lichtpulse, in ihrer Wirkungsausbreitung ebenfalls nicht gegenseitig überholen. Sämtliche Photonen an der Spitze der einzelnen Lichtpulse des einen Systems breiten sich mit den Photonen an der Spitze der einzelnen Lichtpulse des anderen Systems in einer Mantelfläche (der keine "objektive", von einem Bezugssystem unabhängige geometrische Form zukommt) paarweise gemeinsam aus.

Die beiden Lichtpulse, deren Photonen an ihren Spitzen sich vom Ereignis der Begegnung der Beobachter (bzw. der Aussendung) an paarweise gemeinsam ausbreiten, haben - abgesehen vom oben geschilderten Fall der Aussendung entlang der Bewegungsachse - nie die gleiche Richtung. Zu jeder Ausbreitung eines Lichtpulses des Beobachters 2 mit bestimmter Richtung und bestimmter Länge, zB senkrecht zur Bewegungsachse, gehört die Ausbreitung eines komplementären Lichtpulses des Beobachters 1 in eine andere Richtung mit einer anderer Länge, zB schräg geneigt zur Bewegungsachse.

Die Länge der Ausbreitung jedes einzelnen Lichtpulses der einen Kugelwelle aus Licht steht zu der Länge der Ausbreitung jedes einzelnen komplementären Lichtpulses der anderen Kugelwelle aus Licht in einem über die

Relativgeschwindigkeit v berechenbaren Verhältnis relationaler Symmetrie. Dazu ein Beispiel:



Die Skizze zeigt, in welche von der Relativgeschwindigkeit v abhängige Richtung der Beobachter 1 seinen Lichtpuls 1 aussenden muss, damit sich das Photon an der Spitze dieses Lichtpulses 1 gemeinsam mit dem Photon an der Spitze des vom Beobachter 2 senkrecht zur Bewegungsachse ausgesendeten Lichtpulses 2 ausbreiten kann.

Die spezielle Relativitätstheorie geht von der Annahme aus, dass Strecken senkrecht zur Bewegungsachse aus der Sicht beider Beobachter gleich lang sind (vgl. den Vergleich der Höhe einander vorbeifahrender Züge bei Thirring, Die Idee der Relativitätstheorie, Springer 1921, S 57f). Die Länge einer Strecke ist das Produkt von Geschwindigkeit mal Zeit. Die senkrechte Strecke $c*t_2$ ist aus der Sicht beider Beobachter gleich lang. Legt man im Hinblick darauf die Bewegungsabläufe aus der Sicht des Beobachters 1 zu Grunde, so ergibt sich ein rechtwinkeliges Dreieck mit den Seiten $v*t_1$ und $c*t_2$ sowie der Hypotenuse $c*t_1$. Aus dem pythagoräischen Lehrsatz folgt, dass die Prozessdauer t_1 um den sogenannten "Lorentzfaktor" 1/sqr(1-v^2/c^2) länger ist als die Prozessdauer t_2. Setzt man c = "1", vereinfacht sich der Lorentzfaktor auf 1/sqr(1-v^2).

Nun können für alle anderen denkbaren Richtungen, in die die komplementären Lichtpulse ausgesendet werden, die Verhältnisse der jeweiligen Lichtwege bzw. der Prozessdauern zueinander berechnet werden, insbesondere - je nach Bewegungsrichtung - für die oben beschriebenen, entlang der Bewegungsachse ausgesendeten Lichtpulse: $t_1 = t_2*(1+v)/ sqr(1-v^2)$ bzw. $t_1 = t_2*(1-v)/ sqr(1-v^2)$. Es zeigt sich im Fall der Ausbreitung gleich langer Lichtpulse in alle Richtungen entlang den Radien einer Kugel aus der Sicht des einen Systems, dass die komplementären Lichtpulse aus der Sicht des relativ dazu bewegten anderen Systems den Brennstrahlen eines Rotationsellipsoids folgen müssen.

Die Formel für eine Umrechnung der Koordinatenwerte (drei räumliche und eine zeitliche) eines Ereignisses aus Sicht des Systems 1 in die Koordinatenwerte desselben Ereignisses aus Sicht des Systems 2 ergibt sich aus folgender Betrachtung: Zwei im obigen Sinn koordiniert entlang der Raumachse x ausgesendete, dann reflektierte und zurückkehrende Lichtpulse breiten sich aus der Sicht des Systems S im Ausmaß a in die Hinrichtung und im Ausmaß b in die Gegenrichtung aus. Aus der Sicht des anderen Systems S' betragen die Längen der Ausbreitung der komplementären Lichtpulse a' und b'. In Anbetracht der jeweils gemeinsamen Aussendung der beiden Photonen an der Spitze der komplementären Lichtpulse (bei dem im Koordinatenursprung stattfindenden Ereignis 1 sowie bei dem Ereignis der Reflektion) und der jeweils gemeinsamen Rückkehr des Photonenpaares (Ereignis 2) ergeben sich die Koordinatenwerte des Ereignisses 2 aus der Sicht des Systems S mit x=a-b; t=a+b, daher **a=(t+x)/2 und b=(t-x)/2**, bzw. aus der Sicht des relativ dazu mit v bewegten Systems S' mit x'=a'-b'; t'=a'+b', daher **a'=(t'+x')/2 und b'=(t'-x')/2**.

Die Lichtpulse der beiden Systeme stehen zueinander im Verhältnis der aus dem obigen Gedankenexperiment ableitbaren relationalen Symmetrie $a'=a*(1-v)/sqr(1-v^2)$ bzw. $b'=b*(1+v)/sqr(1-v^2)$. Einsetzen von a' und a bzw. b' und b aus den obigen Gleichungen ergibt $t'+x'=(t+x-v*t-v*x)/sqr(1-v^2)$ und $t'-x'=(t-x+v*t-v*x)/sqr(1-v^2)$. Aus den zwei Gleichungen mit den zwei Unbekannten t' und x'ergibt sich:

Zeitlicher Koordinatenwert:

$t'=(t-v*x)/sqr(1-v^2)$

Räumlicher Koordinatenwert in Richtung der Bewegungsachse:

$x'=(x-v*t)/sqr(1-v^2)$

Die zwei anderen räumlichen Koordinatenwerte bleiben als senkrecht zur Bewegungsachse stehend gleich:

$y' = y$

$z' = z$

Aus Zeit und Ort eines Ereignisses aus der Sicht des Koordinatensystems S können Zeit und Ort des Ereignisses aus der Sicht des relativ dazu bewegten Koordinatensystems S' errechnet werden ("Lorentz-Transformation"). Die Lorentz-Transformation beschreibt ein auf der Konstanz bzw. Unüberschreitbarkeit der Wirkungsausbreitung ("Lichtgeschwindigkeit") beruhendes physikalisches Geschehen. Sie gibt für beliebige Ereignisse Auskunft, welche Uhr (Standort, Zeigerstellung) des einen Systems S welcher Uhr (Standort, Zeigerstellung) des anderen Systems S' begegnet. Die daraus (zB in Minkowski-Diagrammen) konstruierten "Weltlinien" sind eigentlich "Uhrenbegegnungslinien", aus denen sich ergibt, wo und wann ein bestimmtes Ereignis des einen Systems aus der Sicht des anderen, relativ dazu bewegten Systems stattfindet.

7. Die Effekte der "Zeitdilatation" und der "Raumkontraktion" können anhand dieser Uhrenbegegnungen nachvollzogen werden.

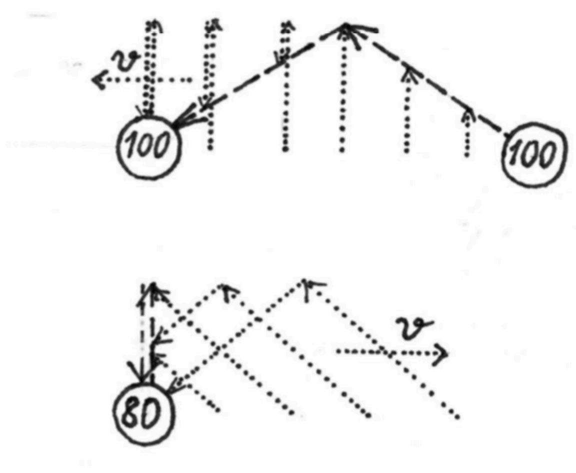
Ein Lichtpuls legt das an Raum zurück, was er an Zeit dafür benötigt. Dieser Zusammenhang bleibt bestehen, auch wenn er unterwegs seine Richtung ändert (an gedachten Spiegeln reflektiert wird) und allenfalls sogar zum Ausgangspunkt zurückkehrt. An jedem beliebig wählbaren Abschluss dieses zusammengesetzten Lichtwegs kann eine der im ganzen Raum verteilten ruhenden Uhren eines Bezugssystems gedacht werden, die die Gesamtausbreitung des Lichtpulses vom Ereignis seiner Aussendung bis zum Ereignis seines Eintreffens (die gesamte zeitliche Entfernung der beiden Ereignisse voneinander) aus der Sicht dieses Systems anzeigt.

Mit dem senkrecht zur Bewegungsachse auf und ab pendelnden Photon an der Spitze des Lichtpulses der Lichtuhr des Beobachters 1 - es handelt sich um eine zusammengesetzte Ausbreitung eines Lichtpulses im oben beschriebenen Sinn - breitet sich ein im Zick-Zack laufendes Photon an der Spitze des Lichtpulses des Beobachters 2 gemeinsam aus.

Die Zeiger der Uhren des Systems 1 rücken im Ausmaß der Summe der von dem Photon an der Spitze des Lichtpulses des Beobachters 1 senkrecht zurückgelegten Lichtwege weiter vor.

Die Zeiger der Uhren des Systems 2 rücken im Ausmaß der Summe der von dem Photon an der Spitze des Lichtpulses des Beobachters 2 im Zick-Zack zurückgelegten Lichtwege weiter vor.

Die Länge der Ausbreitungen der senkrecht laufenden Lichtpulse des Beobachters 2 sind kürzer als die Länge der Ausbreitungen der schräg laufenden Lichtpulse des Beobachters 1. Daher ist auf der Uhr beim Beobachter 2 zunehmend weniger Zeit vergangen als auf der Uhr des Systems des Beobachters 1, an der der Beobachter 2 gerade vorbeikommt und bei der die Spitzen der beiden sich gemeinsam ausbreitenden Lichtpulse gerade eintreffen. Diesen Vorgang zeigt für eine Relativgeschwindigkeit v = 0,6 (c = "1") die folgende Skizze.

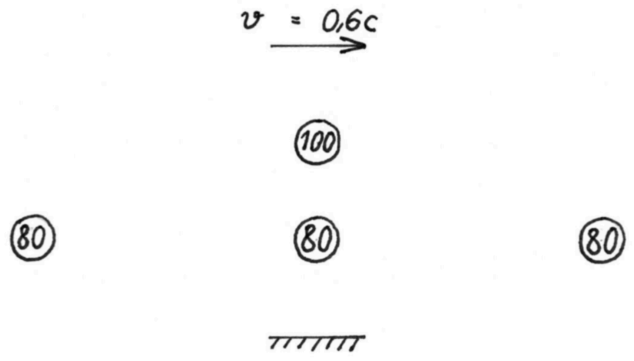


Der obere Teil der Skizze zeigt aus der Sicht des Beobachters 1 zwei aneinander anschließende schräge Ausbreitungen seiner Lichtpulse 1 (strichlierte Strecken mit einer Länge von insgesamt 100) sowie (in Anbetracht der Relativbewegung des Beobachters 2 mit v) einige vom Beobachter 1 hinzugedachte Momentaufnahmen der senkrecht zur Bewegungsachse laufenden komplementären Lichtpulse 2 (punktierte Strecken).

Der untere Teil der Skizze zeigt aus der Sicht des Beobachters 2 zwei aneinander anschließende senkrechte Ausbreitungen seiner Lichtpulse 2 (strichlierte Strecken mit einer Länge von insgesamt 80) sowie (in Anbetracht der Relativbewegung des Beobachters 1 mit v) einige vom Beobachter 2 hinzugedachte Momentaufnahmen der schräg laufenden komplementären Lichtpulse 1 (punktierte Strecken).

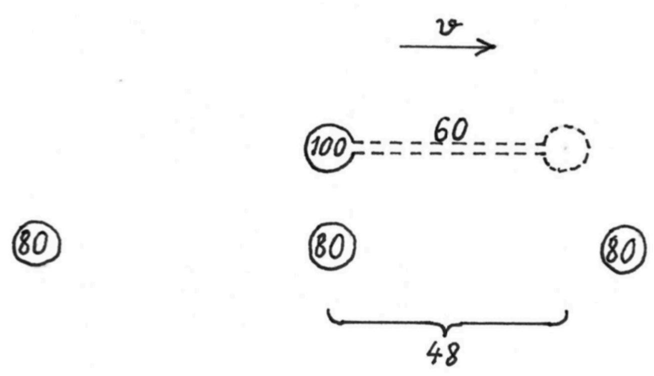
Aus der Sicht des Beobachters 1 (im oberen Teil der Skizze bei der Uhr rdchts) zeigt die von ihm 60 Lichtsekunden entfernte Uhr links seines Systems 1 beim Ereignis ihrer Begegnung mit dem Beobachter 2 die Zeit $t_1 = 100$ Lichtsekunden an ($t_1 = s/v = 60/0,6 = 100$). Die Länge der Ausbreitungen der Lichtpulse aus der Sicht des Beobachters 2 sind um den Faktor $sqr(1-v^2) = sqr(1-0,6^2) = 0,8$ kürzer als die Länge der Ausbreitungen der komplementären Lichtpulse aus der Sicht des Beobachters 1. Aus der Sicht des Beobachters 2 (unterer Teil der Skizze) zeigt somit seine bei ihm befindliche Uhr links bei Begegnung mit der genannten Uhr des Systems 1 die Zeit $t_2 = 0,8*100 = 80$ Lichtsekunden an.

Bei einem direkten Vergleich der Anzeige seiner Uhr mit der Anzeige der jeweils vorbeikommenden Uhr der Uhrenreihe 1 bemerkt also der Beobachter 2, dass die Zeitanzeige seiner Uhr zunehmend hinter den Zeitanzeigen der bei ihm jeweils vorbeikommenden Uhren zurückbleibt. Kommt die Uhr der Uhrenreihe 1, die oben mit dem Lichtsignal des Beobachters 1 auf 60 Sekunden gestellt worden war und aus der Sicht des Beobachters 1 von diesem 60 Lichtsekunden entfernt ist, beim Beobachter 2 vorbei, so zeigt diese Uhr der Uhrenreihe 1 eine seit der Nullstellung verstrichene Zeitspanne von 100 Sekunden an, während die Uhr des Beobachters 1 nur eine seit der Nullstellung verstrichene Zeitspanne von 80 Sekunden anzeigt.



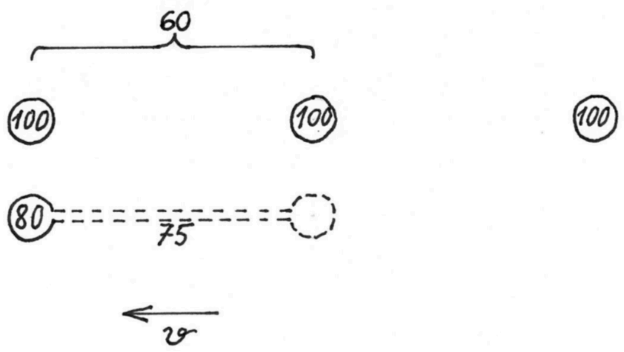
Aus der Sicht des Beobachters 2 hat sich der Beobachter 1, mit dem er sich vor 80 Sekunden getroffen hatte, um eine Strecke von 48 Lichtsekunden von ihm entfernt (Weg = Geschwindigkeit mal Zeit = 0,6*80 = 48). Die am Beobachter 2 "vorbeibewegte" Strecke zwischen derjenigen Uhr der Reihe 1, die jetzt 100 Sekunden zeigt, und dem Beobachter 1, die wie gesagt eine vom Beobachter 1 gemessenen "Ruhelänge" von 60 Lichtsekunden hat, ist somit aus der Sicht des Beobachters 2 um den Faktor sqr(1-v^2) auf eine Länge von 0,8*60 = 48 Lichtsekunden geschrumpft ("Raumkontraktion").

(Welche Zeit die Uhren der Reihe des Beobachters 1 anzeigen, wenn der Beobachter 1 einer 80 Sekunden anzeigenden Uhr der Uhrenreihe 2 begegnet, sei aus Vereinfachungsgründen offen gelassen. Nur soviel sei vorweg gesagt, dass bei diesem Ereignis auf seinen Uhren weniger als 80 Sekunden vergangen sind.)



Aus der Sicht des Beobachters 1 hat sich der Beobachter 2, mit dem er sich vor 100 Sekunden getroffen hatte, um eine Strecke von 60 Lichtsekunden von ihm entfernt (Weg = Geschwindigkeit mal Zeit = 0,6*100 = 60). Die am Beobachter 1 "vorbeibewegte" Strecke zwischen derjenigen Uhr der Reihe 2, die gerade beim Beobachter 1 vorbeikommt, und dem Beobachter 2, die eine vom Beobachter 2 gemessenen Länge von 75 Lichtsekunden hat, ist aus der Sicht des Beobachters 1 um den Faktor sqr(1-v^2) auf eine Länge von 0,8*75 = 60 Lichtsekunden geschrumpft ("Raumkontraktion").

(Welche Zeit die Uhr der Reihe 2 anzeigt, die dem Beobachter 1 begegnet, wenn seine Uhr 100 Sekunden anzeigt, sei aus Vereinfachungsgründen offen gelassen. Nur soviel sei vorweg gesagt, dass bei diesem Ereignis auf der Uhr der Reihe 2 mehr Zeit als 100 Sekunden vergangen sind.)



Der Grund für die abweichende Zeitanzeige der jeweiligen Begegnungsuhren liegt zusammengefasst darin, dass die Wirkungsausbreitung das Vergehen der Zeit repräsentiert und dass sich zwei Photonen gegenseitig nicht überholen können.

8. Ein Verstoß gegen das wissenschaftliche Sparsamkeitsprinzip ist die in ihren Konsequenzen komplizierte und unnötige These, die Zeit würde bei bewegten Beobachtern langsamer vergehen ("bewegte Uhren gehen langsamer"). Diese These nimmt nur den Umstand in den Blick, dass die Anzeige der Uhr, die sich bei einem "bewegten" Beobachter befindet, hinter der Anzeige einer Uhr der "ruhenden" Uhrenreihe zurückbleibt, an der er gerade vorbeikommt. Die Widersprüchlichkeit dieser These bzw. der ihr zu Grunde liegenden Auffassung, die Zeit sei eine Substanz, die langsamer oder schneller vergehen könnte, besteht darin, dass dieses Zurückbleiben gegenüber einer Uhr einer "bewegten" Uhrenreihe, die einer Uhr begegnet, die sich beim "ruhenden" Beobachter befindet, genauso auftreten würde. Sich dieser Symmetrie bewusst zu sein, ist zielführender, als sich mit den oft paradoxen Folgen der These einer bei bewegten Beobachtern langsamer vergehenden Zeit zu beschäftigen.

9. Bei einer beschleunigten Bewegung führt das Abweichen der Zeitanzeigen von Uhren, die sich begegnen, zu einem beeindruckenden Effekt, dem "Zwillingsparadoxon".

Mit jedem kleinsten Beschleunigungsschritt macht ein zuvor "ruhender" Beobachter einen gedachten infinitesimalen Sprung zu der gerade vorbeikommenden Uhr eines anderen, infinitesimal schneller "bewegten" Inertialsystems und bringt sich so auf dessen Geschwindigkeit. Die Uhr, der er begegnet (und zu der er "springt"), zeigt nach dem Gesagten immer eine bereits weiter fortgeschrittene Zeit an als seine eigene Uhr (deren Gang durch die einzelnen infinitesimalen Beschleunigungsschritte nicht beeinflusst wird). Die infinitesimalen Beschleunigungsschritte summieren sich beim gesamten Beschleunigungsprozess zu einem Gesamteffekt. Das Verhältnis der Zeitspanne der Eigenzeit des Beschleunigten t_B zur Zeit des Ausgangssystems t_A, aus dessen Sicht er ursprünglich in Ruhe war, bestimmt sich bei gleichförmiger Beschleunigung a und einer Zeitspanne des Beschleunigungsprozesses aus Sicht des

Ausgangssystems von t_A nach der folgenden, aus den obigen Überlegungen abgeleiteten Formel (siehe Aufsatz hyperbolische Bewegung):

$t_B=(\mathrm{asinh}(a*t_A))/a$

Die Zeitspanne t_B ist kleiner als die Zeitspanne t_A. Ein beschleunigter Beobachter bleibt dauerhaft jünger als ein inerter Beobachter, der ihm gegenüber in Ruhe bleibt. Bei einem beschleunigten Beobachter vergeht - unabhängig von der Richtung der Beschleunigung, also auch bei einem Bremsvorgang - im Vergleich zu nicht beschleunigten Beobachtern weniger Zeit. Ein im Zuge einer Reise mehrmals beschleunigter und abgebremster Zwilling ist bei seiner Rückkehr umso weniger gealtert als sein daheim wartender Bruder, je länger die Reise gedauert hat und je höhere Geschwindigkeiten erreicht wurden.

Wien, 7. Jänner 2022

***