

VOLKER THOMAS

Das
Ives-Stilwell-
Experiment
zum Dopplereffekt

1. Die Logik des Experiments

Nach dem Klassischen Dopplereffekt sollten auch bei Lichtwellen unterschiedliche Frequenzen gemessen werden, je nachdem, ob sie von ruhenden, sich nähernden oder sich entfernenden Objekten emittiert werden. Die Frequenzen sollten - wie beim akustischen Dopplereffekt - je nach Bewegungsrichtung um den Faktor $1 / (c \pm v)$ verschoben sein.

Vor diesem Hintergrund beschleunigte der deutsche Physiker Johannes Stark im Jahr 1907 Wasserstoff-Ionen (H^+) in einer Kathodenröhre und prüfte mit Hilfe der Spektralanalyse die Frequenzunterschiede zwischen den Lichtemissionen bei der Ionisierung ruhender Wasserstoffatome und der Rekombination bewegter Wasserstoff-Ionen. Die geschwindigkeitsabhängigen Spreizungen des Spektrums, die er dabei fand, wichen jedoch von dem linearen Faktor $1 / (1 \pm v/c)$ ab, passten also nicht zum Klassischen Dopplereffekt.

Einstein griff das Ergebnis sogleich auf und verwies darauf, dass die klassischen Gleichungen um den Lorentz-Faktor für die Zeitdilatation ergänzt werden müssten.

Ab 1938 führten Herbert E. Ives und G. R. Stilwell verfeinerte Messungen durch und kamen dabei zu Ergebnissen, die recht gut zu einem um den Lorentz-Faktor ergänzten Faktor und damit zu Einsteins Vorhersage passten.

Nach herrschender Meinung haben das Ives-Still-Experiment und immer genauer werdende Nachfolgeexperimente die Richtigkeit der Speziellen Relativitätstheorie und die reale Existenz der Zeitdilatation bewiesen.

Wir werden noch sehen, dass die experimentellen Ergebnisse zwar sehr gut mit einer relativistischen Interpretation harmonieren, dass aber auch eine Deutung im Rahmen der Klassischen Physik möglich ist.

Dazu müssen wir die realen physikalischen Ursachen des Dopplereffekts verstehen.

2. Der akustische Dopplereffekt

Wenn z.B. eine Auto mit heulender Sirene an uns vorbeifährt, dann ist die Tonfrequenz höher, solange sich das Auto nähert, und tiefer, sobald sich das Auto von uns entfernt. Dieser Effekt, den der österreichische Physiker Christian Doppler 1842 postulierte und am Beispiel vorbeifahrender Dampflokomotiven nachwies, wird ihm zu Ehren Dopplereffekt genannt.

Beim akustischen Dopplereffekt wird unterschieden, ob sich nur die Quelle bewegt (in diesem Fall ändern sich nach herrschender Meinung Wellenlänge und Frequenz physikalisch als Folge der Quellenbewegung) oder ob sich nur der Beobachter bewegt (in diesem Fall bleiben nach herrschender Meinung Wellenlänge und Frequenz ex Quelle physikalisch unverändert und es wirkt nur die veränderte Ankunfts Häufigkeit von Wellen beim Beobachter).

In allen nachfolgenden Gleichungen sind

- f_0 die an der Quelle ausgestrahlte Frequenz,
- v die Geschwindigkeit der Quelle bzw. des Beobachters,
- s die Schallgeschwindigkeit,
- f_a die empfangene Frequenz, wenn sich der Abstand zwischen Quelle und Beobachter verringert und
- f_p die empfangene Frequenz, wenn sich der Abstand zwischen Quelle und Beobachter vergrößert.

Die Gleichungen gelten, wenn sich Quelle und Beobachter auf einer gemeinsamen Geraden bewegen. Andernfalls sind die Gleichungen um einen Faktor zu ergänzen, der dem Cosinus des Winkels entspricht.

Für den Zusammenhang zwischen Frequenz f , Wellenlänge λ und Ausbreitungsgeschwindigkeit s (bei Licht c) gilt: $f \cdot \lambda = s$.

2.1 Die Quelle bewegt sich, der Beobachter ruht

Es gelten die Gleichungen

$$(1) \quad f_a = f_0 \cdot s / (s - v) = f_0 / (1 - v/s)$$

$$(2) \quad f_p = f_0 \cdot s / (s + v) = f_0 / (1 + v/s)$$

Die Abbildung 1 zeigt den Fall, dass sich die Quelle auf einen ruhenden Beobachter zubewegt, also den Fall der Gleichung (1).

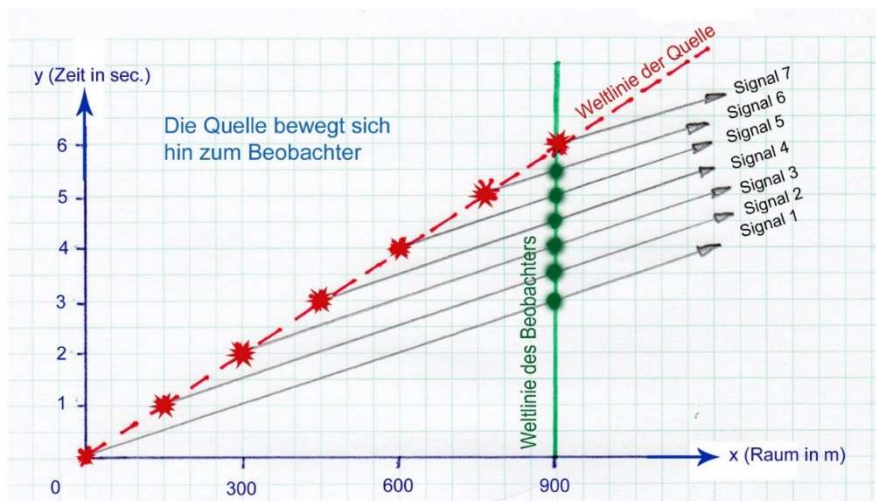


Abbildung 1

Der Beobachter steht über die betrachtete Zeitdauer hinweg (y -Achse) unverändert am Wegepunkt 900 m (x -Achse). Er verkörpert deshalb die grüne senkrechte Weltlinie. Die Quelle bewegt sich mit $v = 150$ m/sec. geradlinig auf den Beobachter zu. Im Raum-Zeit-Diagramm ist das die gestrichelte rote Linie. Jeweils nach Ablauf einer Sekunde sendet die Quelle ein Signal (rote Sterne), das sich mit $s = 300$ m/sec. ausbreitet (schwarze Signalpfeile). Das Signal hat ab Quelle die Wellenlänge $\lambda = 300$ m und die Frequenz 1. Stände die Quelle still, würde der Beobachter 1 Signal/Sekunde ($f_0 = 1$) empfangen. Weil sich die Quelle jedoch auf ihn zu bewegt, empfängt er zwei Signale/Sekunde ($f_a = 2$).

Das lässt sich aus dem Raum-Zeit-Diagramm leicht ablesen, indem auf der grünen Weltlinie des Beobachters die Schnittpunkte je Zeiteinheit gezählt werden. So ergeben sich für den Zeitabschnitt zwischen t_3 und $t_6 = 3$ Sekunden genau 6 Schnittpunkte (der erste oder der letzte Schnittpunkt darf nicht mitgezählt

werden), also zwei Signale/Sekunde ($f_a = 2$). Das entspricht auch genau der Gleichung (1) mit $f_a = 1 / (1 - 150/300) = 2$.

2.2 Die Quelle ruht, der Beobachter bewegt sich

Es gelten die Gleichungen

$$(3) \quad f_a = f_0 \cdot (s + v) / s = f_0 \cdot (1 + v/s)$$

$$(4) \quad f_p = f_0 \cdot (s - v) / s = f_0 \cdot (1 - v/s)$$

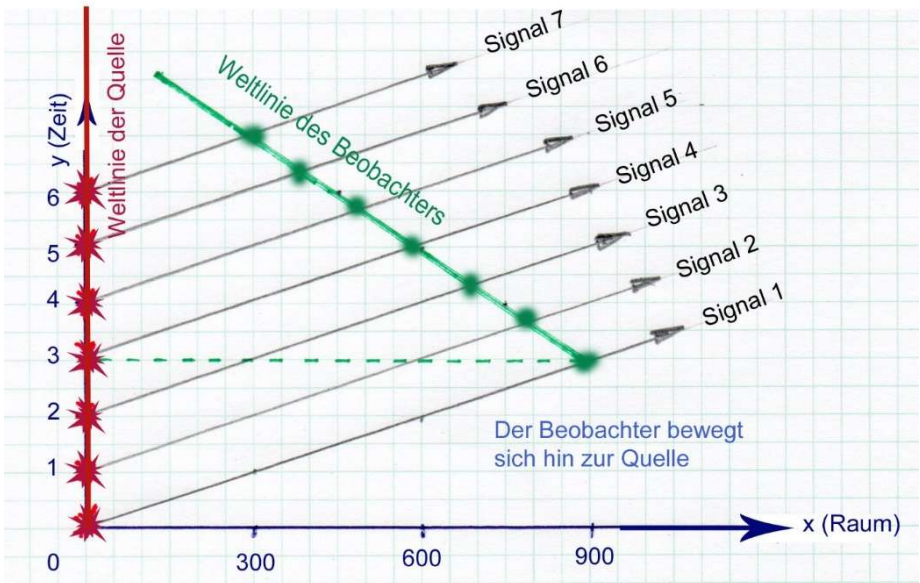


Abbildung 2

Die Abbildung 2 zeigt den Fall, dass sich der Beobachter auf die ruhende Quelle zubewegt, also den Fall der Gleichung (3).

Die Quelle ruht über die betrachtete Zeit hinweg (y-Achse) unverändert am Wegepunkt 0 m der x-Achse. Jeweils nach Ablauf von genau einer Zeiteinheit sendet die Quelle ein Signal (rote Sterne), das sich mit $s = 300$ m/Zeiteinheit ausbreitet (schwarze Signalpfeile). Das Signal hat ab Quelle die

Wellenlänge $\lambda = 300$ m und die Frequenz 1. Stände der Beobachter am Wegepunkt 900 m still, würde er 1 Signal/Sekunde ($f_0 = f_a = 1$) empfangen. Weil er sich jedoch der Quelle mit $v = 150$ m/sec. nähert, empfängt er zwei Signale/Sekunde ($f_a = 2$). Das lässt sich aus dem Raum-Zeit-Diagramm wiederum leicht ablesen, indem auf der grünen Weltlinie des Beobachters die Schnittpunkte je Zeiteinheit gezählt werden. So ergeben sich für den Zeitabschnitt zwischen t_3 und $t_7 = 4$ Sekunden genau 6 Schnittpunkte (der erste oder der letzte Schnittpunkt darf nicht mitgezählt werden), also anderthalb Signale/Sekunde ($f_a = 1,5$). Das entspricht auch genau der Gleichung (3) mit $f_a = 1 \cdot (1 + 150/300) = 1,5$.

2.3 Die Quelle und der Beobachter bewegen sich

Die herrschende Meinung geht nicht von der zwischen der Quelle und dem Beobachter herrschenden Relativgeschwindigkeit aus, sondern von den absoluten Geschwindigkeiten des Beobachters (v_1) und der Quelle (v_2).

Es gelten die Gleichungen

$$(5) \quad f_a = f_0 \cdot (s + v_1) / (s - v_2)$$

$$(6) \quad f_p = f_0 \cdot (s - v_1) / (s + v_2).$$

3. Der Dopplereffekt bei Licht

3.1 Grundlegende Annahmen

Der Schall ist physikalisch als eine Welle fortschreitender mechanischer Deformation eines Mediums zu verstehen. Das ist einhellige Überzeugung. Dagegen ist die physikalische Natur des Lichts in vieler Hinsicht noch nicht überzeugend geklärt.

Es ist deshalb fraglich, ob das, was üblicherweise als Dopplereffekt des Lichts bezeichnet wird, dem akustischen Dopplereffekt entspricht.

Zwar sind ähnliche Effekte beobachtbar. So sind z.B. die Spektrallinien des Lichts von Doppelsternen, während sie sich uns

nähern (steigende Radialgeschwindigkeit), ins Blaue verschoben und, während sie sich von uns entfernen (sinkende Radialgeschwindigkeit), ins Rote verschoben, wobei nach herrschender Meinung die Blauverschiebung höhere Frequenz und geringere Wellenlänge und die Rotverschiebung ¹ geringere Frequenz und größere Wellenlänge bedeutet.

Aber diese Effekte lassen sich, wie wir noch sehen werden, auch außerhalb des Wellenmodells, also ohne Wellenlängenänderungen, erklären.

3.2 Das Kathodenstrahl-Experiment von Stark

Bei den Kathodenstrahl-Experimenten im Jahr 1907 untersuchte Johannes Stark die Frequenzen des Lichts, das von beschleunigten Wasserstoff-Ionen (Kathodenstrahlen) emittiert wird. Die Experimente bestätigten zwar, dass sich das Spektrum des emittierten Lichts richtungs- und geschwindigkeitsabhängig ändert, zeigten aber auch, dass die Spreizung nicht mit dem linearen Faktor $(1 \pm v/c)$ übereinstimmt, der dem akustischen Dopplereffekt entsprechen würde.

Unter Bezug auf das unerwartete Ergebnis wies Einstein flugs darauf hin, dass die linearen Gleichungen um den Lorentz-Faktor für die Zeitdilatation ergänzt werden müssten und dass sie danach mit den experimentellen Ergebnissen in Einklang stehen sollten.

Demgemäß sollte aus der Gleichung (1) die Gleichung

$$(7) \quad f_a = f_0 \cdot \gamma / (1 - v/c) \text{ werden.}$$

¹ Nach herrschender Meinung soll die Rotverschiebung im Wesentlichen nicht durch den Dopplereffekt, sondern durch gravitative Wirkungen und durch die angenommene Expansion des Universums verursacht werden. Überzeugender ist die Annahme von Paul Marmet, dass ein beachtlicher Teil der Rotverschiebung aus der Wechselwirkung des Lichts mit interstellarem H₂ folgt.

Setzt man in der Gleichung (7) für den Lorentz-Faktor γ den Wert $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ ein, dann erhält man nach einigen Umformungen

$$(8) \quad f_a = f_0 \cdot (c + v / c - v)^{1/2}$$

Und aus der Gleichung (2) wird die Gleichung

$$(9) \quad f_p = f_0 \cdot \gamma / (1 + v/c) \text{ bzw.}$$

$$(10) \quad f_p = f_0 \cdot (c - v / c + v)^{1/2} .$$

Einsteins Vorschlag blieb unwidersprochen, obwohl die Gleichungen (7) bis (10) auch ohne Inanspruchnahme des Lorentz-Faktors für die Zeitdilatation hätten hergeleitet werden können.

Bei allem blieb nämlich unbeachtet, dass die Gleichungen für den akustischen Dopplereffekt die Existenz der absoluten Zustände „Ruhe“ und „Bewegung“ implizieren. Das mag für die Betrachtung langsamer stofflicher Wellen (z.B. Luftwellen) noch hinnehmbar sein, nicht jedoch für elektromagnetische Wellen.

Stattdessen hätte man bei der mathematischen Beschreibung des Licht-Dopplereffekts - ganz im Rahmen der klassischen Physik - in folgenden Schritten vorgehen können und sollen. Hier zunächst für den Fall, dass sich Lichtquelle und Beobachter einander nähern:

1.

Wenn die Geschwindigkeiten relativ zueinander betrachtet werden, müssen die Aussagen a) die Quelle bewegt sich zum Beobachter und b) der Beobachter bewegt sich zur Quelle gleichberechtigt sein.

2.

Dann müssen auch

- die Geschwindigkeit v der Quelle in der Gleichung (1) und
- die Geschwindigkeit v des Beobachters in der Gleichung (2) gleichberechtigt werden.

3.

Die Anpassung kann erfolgen, indem das geometrische Mittel der beiden Faktoren $(c / c - v)$ und $(c / c + v)$ aus den

Gleichungen (1) und (2) gebildet wird, also $((c / c - v) \cdot (c / c + v))^{1/2}$ bzw. nach Umwandlung $(c + v / c - v)^{1/2}$.

4.

Damit erhalten wir als Gleichung für den Licht-Dopplereffekt im Annäherungsfall

$$(11) \quad f_a = f_0 \cdot (c + v / c - v)^{1/2}.$$

Für den Fall, dass sich Quelle und Beobachter voneinander entfernen, erhalten wir in gleicher Weise für den Licht-Dopplereffekt die Gleichung

$$(12) \quad f_p = f_0 \cdot (c - v / c + v)^{1/2}$$

Die Gleichungen (11) und (12) beschreiben den (quadratischen) Dopplereffekt unter Beachtung des klassischen Relativitätsprinzips.

5.

Wir sehen, dass die Gleichungen (11) und (12) mit den Gleichungen (8) und (10) identisch sind, und dürfen deshalb feststellen, dass das Ziel auch ohne Inanspruchnahme der Speziellen Relativitätstheorie und ohne Inanspruchnahme einer Zeitdilatation erreicht wird.

3.3 Das Ives-Stilwell-Experiment

Auf Basis neuer technischer Möglichkeiten wiederholten die englischen Physiker Herbert E. Ives und G. R. Stilwell ab 1938 die Experimente zum Dopplereffekt des Lichts.

Die Ergebnisse entsprachen recht genau den Erwartungen nach den relativistisch hergeleiteten Gleichungen (8) und (10) und damit auch nach den klassisch hergeleiteten Gleichungen (11) und (12).

Die im Jahr 2007 von S. Reinhardt et al. veröffentlichten Ergebnisse neuer Experimente am Testspeicherring der Universität Heidelberg bestätigen die Ergebnisse von Ives und Stilwell und die Ergebnisse anderer zwischenzeitlich durchgeführter Experimente mit einer noch geringeren Abweichung von den Erwartungen.

Die experimentellen Ergebnisse sind kein Beweis für die Existenz der Zeitdilatation, weil sie gleichermaßen mit den klassisch hergeleiteten Gleichungen (11) und (12) harmonieren.

4. Physikalischer Hintergrund

Nach Überzeugung des Autors ist das, was gewöhnlich als Dopplereffekt bei Licht bezeichnet wird, physikalisch wie folgt zu interpretieren.

1.

Wechselt ein atomar gebundenes Elektron nach einer energetischen Anregung zurück in den nächst niedrigeren Anregungszustand, dann emittiert es ein elementspezifisch geprägtes Photon. Die elementspezifische Prägung des Photons zeigt sich im Spektralbild (z.B. Spektralbild des Wasserstoffatoms).

2.

Die Photonen breiten sich geradlinig aus, und zwar transversal schwingend, so dass jede Detektion als Amplitude einer Welle und der Abstand bis zur nächsten Detektion als Wellenlänge interpretiert werden kann.

3.

Wird z.B. das Wasserstoffatom so stark angeregt, dass das negativ geladene Elektron den Atomverbund verlässt, bleibt der positiv geladene Atomkern als sogenanntes H^+ -Ion übrig (Ionisierung).

4.

Eine solche Ionisierung des Wasserstoffs erfolgt im hier betrachteten Experiment. In der Kathodenstrahlröhre werden Wasserstoffatome durch Energiezufuhr ionisiert und die H^+ -Ionen werden sodann hin zu einer durchlöcherten Trennwand beschleunigt, indem an die Trennwand eine negative elektrische Spannung angelegt wird. Einige der beschleunigten H^+ -Ionen passieren die Löcher in der Trennwand, fliegen hinter der Trennwand weiter und bilden den sogenannten Kanalstrahl.

5.

Hervorzuheben ist, dass die Ionen, die den Kanalstrahl bilden, selbst keine Photonen emittieren.

6.

Die Ionen verlieren auf ihrem weiteren Weg durch die Kathodenröhre Energie, so dass das Ion wieder ein freies Elektron an sich binden kann. Bei dieser sogenannten Rekombination emittiert das Elektron seine nicht mehr benötigte Energie als Photon mit der elementspezifischen Signatur des Wasserstoffs. Eventuell verbleibende Restenergie wird in unspezifischen Photonen emittiert.

7.

Bei der Emission des Photons erfährt das Atom einen Rückstoß, der nicht nur auf das Atom, sondern auch auf das Photon wirkt. Der Rückstoß modifiziert die elementspezifische Signatur des Photons geringfügig.

8.

Wird das Photon bei der Rekombination emittiert, dann unterscheidet sich die Rückstoßwirkung je nach Art und Ausmaß der Bewegung des Ions.

Wird das Photon in Flugrichtung des Ions - also nach vorn - emittiert, verbleibt ein anderer Energiebetrag aus dem Rückstoß beim Photon als wenn es nach hinten emittiert wird. Der beim Photon verbleibende Energiebetrag aus dem Rückstoß verändert die elementspezifische Signatur des Photons gegenüber dem Norm-Spektrum des ruhenden Atoms. Diese Veränderung ist zudem unterschiedlich je Emissionsrichtung.

9.

Deshalb ist die Vorstellung abzulehnen, dass die veränderte Frequenz/Signatur daraus folge, dass a) die Wellenlängen der nach vorn emittierten Photonen von den in selber Richtung nachfolgenden Kanalstrahlen gestaucht bzw. dass b) die Wellenlängen der nach hinten emittierten Photonen entspannt/gedehnt würden und dass das die Ursache der Spektraländerung sei.

Stattdessen erscheint es stimmiger, von einer Modifizierung der elementspezifischen Prägung unmittelbar während des Emissionsereignisses auszugehen, die das einzelne Photon dann auf seinem weiteren Weg beibehält und bei seiner Detektion im Spektrometer zeigt.

10.

Aus dieser Sichtweise folgt weiter, dass sich am elementspezifischen Normspektrum eines Atoms, weil die emittierten Photonen bereits endgültig geprägt sind, nichts ändern wird, nur weil sich der Beobachter/Detektor auf das emittierende Atom zubewegt oder sich von ihm entfernt. Ob das endgültig geprägte Photon in einem bewegten Detektor ein Spektrum aufscheinen lassen kann, das von seiner tatsächlichen Prägung abweicht, mag dainstehen.

5. Bewertung der Experimente

1.

Die allein im Rahmen der Klassischen Physik hergeleiteten Gleichungen (11) und (12) sind mathematisch identisch mit den Gleichungen (8) und (10), die unter Zuhilfenahme der Zeitdilatation entwickelt sind.

2.

Mithin gilt, dass alle Experimente, die die relativistische Erklärung stützen, gleichermaßen auch die klassische Erklärung stützen. Die Ives-Stilwell-Experimente können keine der beiden Erklärungsmöglichkeiten falsifizieren und erst recht nicht die Existenz einer realen Zeitdilatation beweisen.

3.

Zudem folgt aus dem Hinzutreten des Faktors $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ nicht, dass es sich dabei um den Lorentz-Faktor der Zeitdilatation handeln muss. Der Faktor $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ erscheint auch bei physikalischen Zusammenhängen, die nichts mit Zeitdilatation oder Längenkontraktion zu tun haben. So wird er z.B. bei der rein klassischen Galilei-Transformationen verwendet, wenn eine beliebige Geschwindigkeit unverändert übergeleitet werden soll.

4.

Weil beide Ableitungswege ihren Ursprung in Gleichungen des akustischen Dopplereffekts haben und weil sich die Frequenzverschiebungen bei Licht physikalisch ganz wesentlich vom akustischen Dopplereffekt unterscheiden, mangelt es genau genommen beiden Ableitungswegen an der rechten physikalischen Begründetheit. Es ist deshalb in Betracht zu ziehen, dass beide

Ableitungswege, die zu den experimentell bestätigten Gleichungen (8) bis (12) geführt haben, zu verwerfen sind und dass eine physikalisch begründete Ableitung auf einem ganz anderen Weg noch gefunden werden muss.

Vom selben Autor

DIE ZEIT BEWIRKT NICHTS – REIN GAR NICHTS

Was steckt hinter dem schillernden Phänomen Zeit? Kann die Zeit unterschiedlich schnell verrinnen oder sind es nur die Uhren, die langsamer oder schneller laufen? Der Autor kommt zu dem Ergebnis, dass das, was wir Zeit nennen, „nur“ das Ergebnis eines geistig-schöpferischen Aktes ist.

Zeit entsteht als hypothetisches Konstrukt, indem der Mensch zum Beispiel bestimmte Frequenzen in Bezug auf das Cäsiumnuklid beobachtet, die Anzahl der Schwingungen zählt und dann willkürlich festlegt, dass nach so und so vielen Schwingungen eine Sekunde vergangen ist.

Das, was wir Zeit nennen, ist keine wirkfähige Entität, sondern nur ein geistiges Konstrukt. Deshalb kann die Zeit nichts bewirken, rein gar nichts.

Uhren, die veränderten Gravitationskräften oder Geschwindigkeiten ausgesetzt werden, können schneller bzw. langsamer laufen, nicht aber die Zeit selbst.