

8.4 Zeit

"Es gibt ein großes und doch ganz alltägliches Geheimnis. Alle Menschen haben daran teil, jeder kennt es, aber die wenigsten denken je darüber nach. Die meisten Leute nehmen es einfach so hin und wundern sich kein bißchen darüber. Dieses Geheimnis ist die Zeit." (Michael Ende; Momo; 1973)



[43] Eisenuhr

Die Zeit ist ein Begriff, der den Menschen seit je her beschäftigt. Naturwissenschaftler und Philosophen versuchen bereits seit der Antike das Geheimnis der Zeit zu ergründen. Die Frage, was Zeit eigentlich ist, lässt sich jedoch auch heute nur schwierig präzise beantworten. Die Zeit beschreibt die kontinuierliche Veränderung und den Wandel des Universums von Vergangenheit kommend über die Gegenwart in die Zukunft. Da sich die Gegenwart kontinuierlich ändert, spricht man auch vom sog. Fluss der Zeit. Für den Menschen ist die Zeit eine subjektive Größe, das heißt der Fluss der Zeit wird nicht gleichmäßig wahrgenommen. So spricht man davon, dass die Zeit schnell vergeht, wenn man beispielsweise ein schönes Erlebnis hat oder einer interessanten Tätigkeit nachgeht. Im Gegensatz dazu vergeht die Zeit bei langweiligen Tätigkeiten, wie zum Beispiel dem Anstehen an einer Schlange, dem Warten auf einen Bus oder einer sehr langen Autofahrt subjektiv sehr langsam. Dieses subjektive Zeitempfinden hängt eng mit der Gehirnaktivität des Menschen zusammen. Wird das Gehirn durch interessante, spannenden Aufgaben oder Wahrnehmungen gefordert, so vergeht die Zeit schnell. Bei langweiligen Aktivitäten oder dem reinen Nichtstun mit geringer Hirnaktivität verläuft die Zeit subjektiv sehr langsam.

In der Physik ist die Zeit t eine messbare Größe, die in der Einheit Sekunde s angegeben wird. Auch die Physik kann keine wirkliche Antwort auf die Frage geben, was Zeit eigentlich ist. Die Zeit wird deshalb auf eine reine Messgröße reduziert, die durch physikalische Experimente sehr genau bis zu einer Größenordnung von ca. $10^{-16}s$ bestimmt werden kann. In seiner speziellen Relativitätstheorie beschrieb Albert Einstein zudem die physikalischen Eigenschaften der Zeit, die frei von der subjektiven menschlichen Wahrnehmung sind. Im folgenden Kapitel werden diese Eigenschaften näher erläutert.

8.4.1 Zeitmessung

Die Zeit ist eine in der Physik messbare Größe. Sie wird zum Beispiel durch periodische Vorgänge wie der Bewegung eines Pendels im Schwerfeld der Erde definiert. Dabei entspricht einer bestimmten Zeiteinheit eine gewisse Anzahl Schwingungen des Pendels.

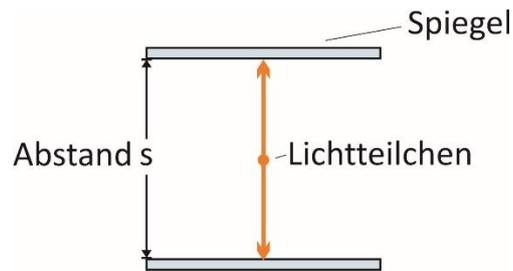
Eine andere Möglichkeit ein geeignetes Maß für die Zeit anzugeben ist die Bewegung der Himmelskörper. So definiert die Drehung der Erde um ihre eigene Achse die Zeitspanne eines Tages. Die Bewegung der Erde um die Sonne definiert wiederum die Zeitspanne eines Jahres.



[44] Pulsar

Eine sehr genaue Bestimmung der Zeit erfolgt durch Messung mit Atomuhren oder mit sog. Pulsaren. Pulsare sind schnell rotierende Neutronensterne, die als sterbliche Überreste von Sternen nach einer Supernovaexplosion übrigbleiben. Pulsare rotieren mit einer Geschwindigkeit von 0,01s bis zu 8s und geben dabei vereinfacht dargestellt wie ein Leuchtturm periodisch Strahlung ab. Da diese Periode zeitlich sehr konstant ist, sind Pulsare besonders gut zur Zeitmessung geeignet.

Anmerkung: In seinen Gedankenexperimenten arbeitete Albert Einstein häufig mit sog. Lichtuhren. Eine Lichtuhr besteht aus zwei parallel zueinander ausgerichteten Spiegeln zwischen denen sich gedanklich ein Lichtteilchen hin und herbewegt.



Ein Zeitintervall in Einsteins Gedankenexperimenten besteht dann aus der hin- und her Bewegung des Lichtteilchens in der Lichtuhr. Da die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, ergibt sich dieses Zeitintervall als Quotient aus doppeltem Abstand der Spiegel und der Lichtgeschwindigkeit:

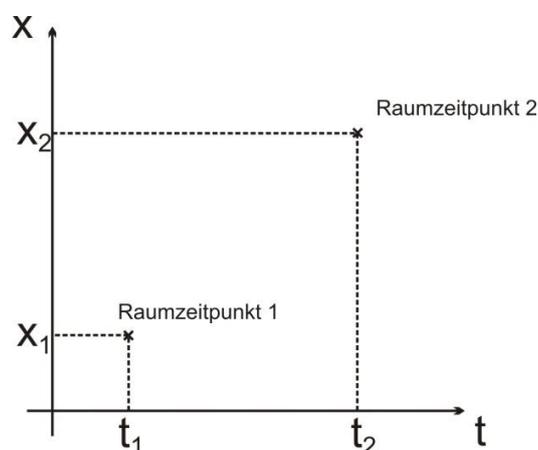
$$c = \frac{2 \cdot s}{t} \Leftrightarrow t = \frac{2 \cdot s}{c}$$

Es ist natürlich aufgrund der hohen Lichtgeschwindigkeit nicht wirklich möglich eine derartige Lichtuhr zu realisieren, jedoch lassen sich mit Hilfe einer Lichtuhr in der Relativitätstheorie wesentliche Eigenschaften von Zeit und Raum verdeutlichen.

8.4.2 Raumzeit

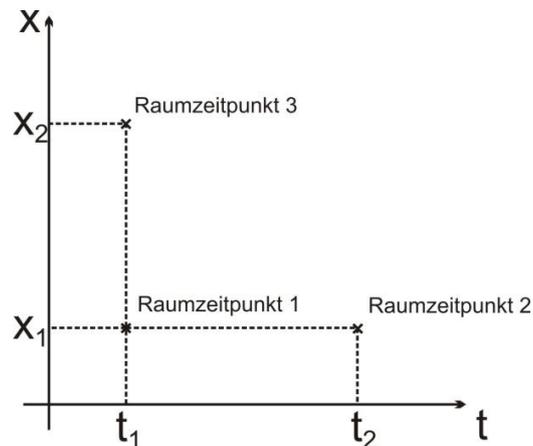
In der speziellen Relativitätstheorie entwickelte Albert Einstein den Begriff der sog. Raumzeit, auch Raum-Zeit-Kontinuum genannt. Die Raumzeit ist eine Vereinigung des dreidimensionalen Raums mit der Zeit zu einer vierdimensionalen Struktur. Jedem Ereignis in der Physik wird in der Raumzeit ein sog. Raumzeitpunkt zugeordnet. Anhand eines einfachen Beispiels soll nun im Folgenden verschiedene Raumzeitpunkte erläutert werden:

Ein Auto fährt auf der Autobahn A40 von Castrop-Rauxel nach Dortmund. Die A40 soll in diesem Beispiel näherungsweise geradlinig sein. Zum Zeitpunkt t_1 startet das Auto in Castrop-Rauxel bei der Raumkoordinate x_1 und erreicht zum Zeitpunkt t_2 Dortmund bei x_2 . Beide Ereignisse können in einem Raum-Zeit-Diagramm dargestellt werden:



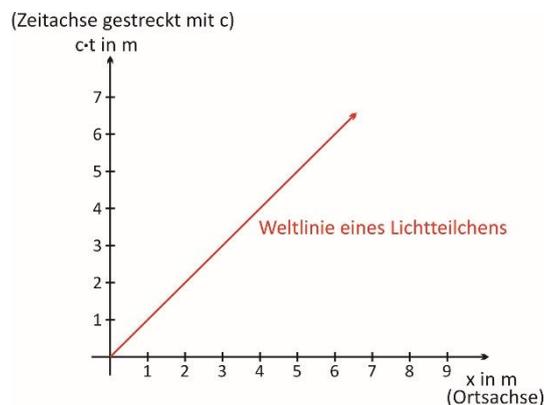
Da das Zeichnen eines vierdimensionalen Raum-Zeit-Diagramms nicht möglich ist, werden hier zwei Raumkoordinaten (y und z) vernachlässigt. Dies ist legitim, da sich das Auto in unserer Überlegung näherungsweise auf einer geraden Linie bewegen soll. Die beiden Raumzeitpunkte geben die genaue

Position des Autos in der Raumzeit an, d.h. sowohl dessen Raumkoordinaten, als auch dessen Zeitkoordinaten.



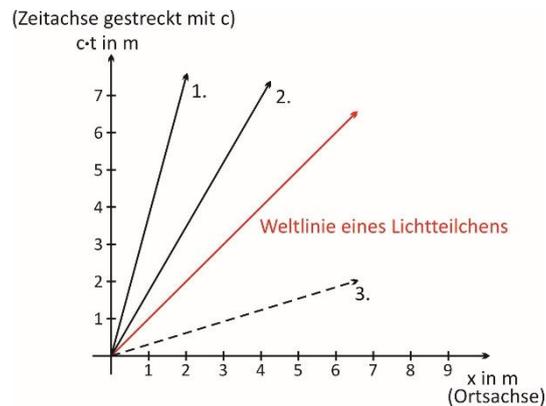
Liegen diese Raumzeitpunkte aufeinander, so handelt es sich um dasselbe Ereignis. Liegen die Raumzeitpunkte im Raum-Zeit-Diagramm übereinander, so besitzen beide Ereignisse die gleiche Zeitkoordinate aber eine andere Raumkoordinate. Raumzeitpunkte die im Diagramm nebeneinander liegen, beschreiben Ereignisse mit gleich bleibender Raumkoordinate. Anschaulich handelt es sich hierbei um Ereignisse, bei denen ein Körper stillsteht, wie zum Beispiel ein parkendes Auto.

In der Literatur zur speziellen Relativitätstheorie, werden in den Raum-Zeit-Diagrammen häufig die Achsen vertauscht, sodass die Zeit auf der y-Achse und der Ort auf der x-Achse aufgetragen wird. Man spricht in diesem Fall von einem sog. Minkowski-Diagramm, benannt nach dem russischen Mathematiker Hermann Minkowski (1864-1909). In der Regel wird die Zeit-Achse mit der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert also mit c gestreckt. Dies hat den Vorteil, dass man die x - und die y -Achse gleich skalieren kann, da nun beide Achsen die Einheit Meter besitzen. Die y -Achse sollte aber inhaltlich trotzdem immer noch als Zeitachse verstanden werden, die lediglich um den Faktor c gestreckt wurde. Die Verbindung der einzelnen Raumzeitpunkte im Minkowski-Diagramm zu einem Graphen bezeichnet man als Weltlinie. In der Abbildung ist die Weltlinie eines Lichtteilchens dargestellt, dass sich zum Zeitpunkt $t=0$ im Koordinatenursprung befindet.



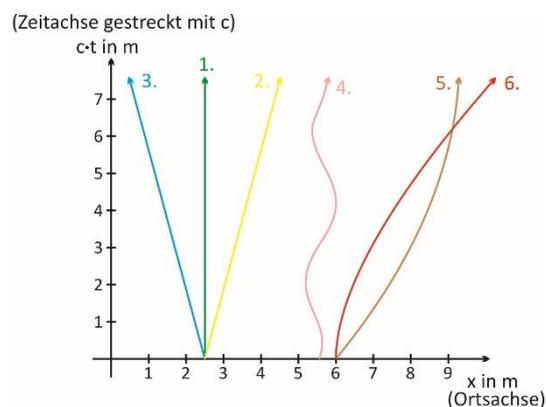
Es ist zu erkennen, dass die Weltlinie des Lichtteilchens auf der Winkelhalbierenden der Orts- und Zeitachse liegt, also einen Steigungswinkel von 45° besitzt. Diese Eigenschaft ergibt sich direkt aus der Skalierung der Zeitachse mit dem Faktor c .

Um die Bewegung von Körpern im Minkowski-Diagramm zu verstehen, kann man deren Weltlinien nun mit der Weltlinie des Lichtteilchens vergleichen.



So hat die Weltlinie des ersten Körpers (1.) eine größere Steigung als die Weltlinie des Lichtteilchens. In der gleichen Zeit legt der erste Körper deshalb eine kürzere Strecke zurück als das Lichtteilchen. Die Weltlinie von Körper (2.) nähert sich schon mehr der Weltlinie des Lichtteilchens an. Er ist deshalb schneller unterwegs als Körper (1.). Die Weltlinie des dritten Körpers (3.) liegt unterhalb der Weltlinie des Lichtteilchens. Der Körper würde sich deshalb mit „Überlichtgeschwindigkeit“ bewegen, was gemäß der speziellen Relativitätstheorie nicht möglich ist.

Im Folgenden sollen nun einige Beispiele für Weltlinien im Minkowski Diagramm diskutiert werden:



1. Der Körper bewegt sich nicht.
2. Der Körper bewegt sich mit Unterlichtgeschwindigkeit nach recht.
3. Der Körper bewegt sich mit Unterlichtgeschwindigkeit nach links.
4. Der Körper pendelt hin und her.
5. Der Körper bremst ab und bleibt schließlich stehen.
6. Der Körper beschleunigt auf annähernd Lichtgeschwindigkeit.

Abschließend ist anzumerken, dass ein Körper im Minkowski-Diagramm keine vertikale Weltlinie besitzen kann, da sich der Körper in diesem Fall zu einem bestimmten Zeitpunkt gleichzeitig an unendlich vielen Orten befindet.

8.4.3 Gleichzeitigkeit

In der Leichtathletik starten 100m Läufer entlang einer geraden Linie. Damit es nicht zu Fehlstarts kommt und alle Läufer gleichzeitig starten können, befindet sich in jedem Startblock ein kleiner Lautsprecher für Startschuss.

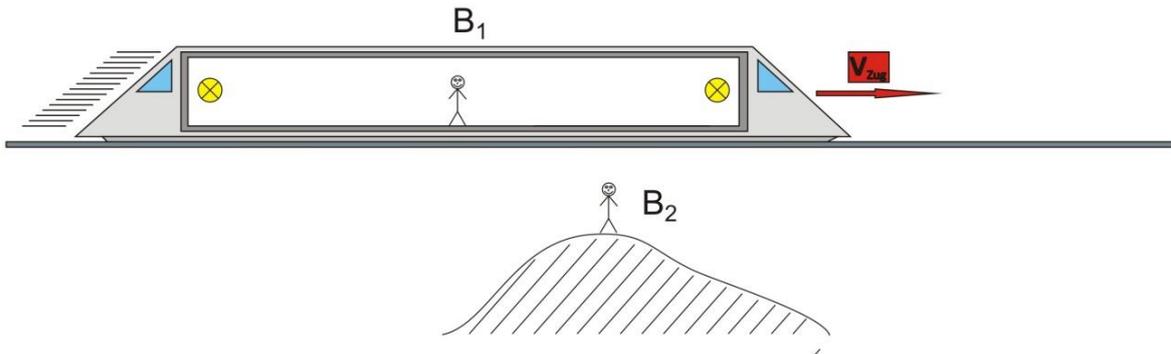


[45] 100m Sprint Finale - London 2012

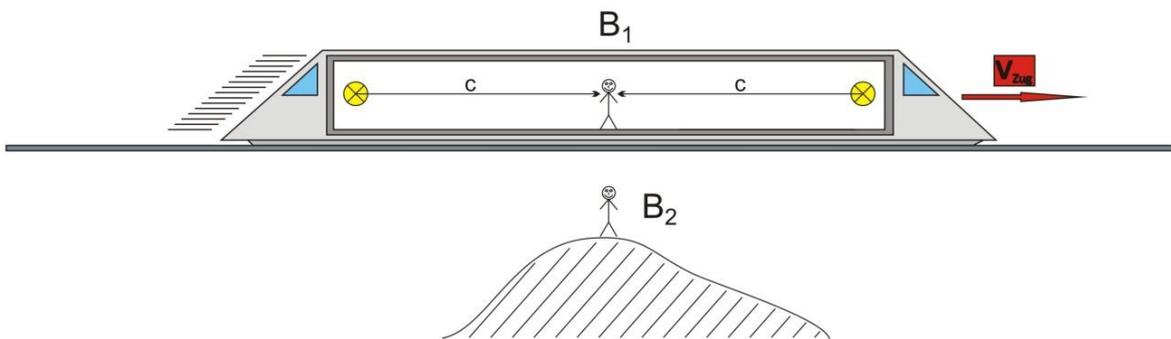
Jeder Wettkämpfer besitzt somit beim Start gleiche Chancen und keiner wird benachteiligt. Der Begriff der „Gleichzeitigkeit“ erscheint in diesem Zusammenhang trivial und eindeutig.

Albert Einstein entdeckte jedoch während seiner Überlegungen zur speziellen Relativitätstheorie, dass es so etwas wie eine „absolute Gleichzeitigkeit“ nicht geben kann. Auch hierzu entwickelte Einstein ein Gedankenexperiment:

Schritt 1: „Lampen blitzen auf“



Schritt 2: „Beide Beobachter sehen das Aufblitzen“



Am Bug und Heck eines mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Zuges sind je eine Lampe angebracht. Ein mitbewegter Beobachter B_1 in der Mitte des Zuges sieht beide Lampen gleichzeitig aufleuchten. Er sagt: „Ich bin von beiden Lampen gleich weit entfernt und die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist konstant, also haben beide Lampen in der Vergangenheit gleichzeitig aufgeleuchtet.“ Ein Beobachter B_2 am Bahndamm sieht, in dem Augenblick in dem er mit B_1 auf gleicher Höhe ist ebenfalls gleichzeitig beide Lampen aufleuchten. Er sagt: „Die Hecklampe hat vor der Buglampe aufgeleuchtet, denn die Hecklampe war zum Zeitpunkt des Aufblitzens von mir weiter entfernt als die Buglampe“

Das Beispiel zeigt, dass je nach Bewegungszustand eines Beobachters, nicht eindeutig entschieden werden kann ob zwei räumlich voneinander getrennte Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht.

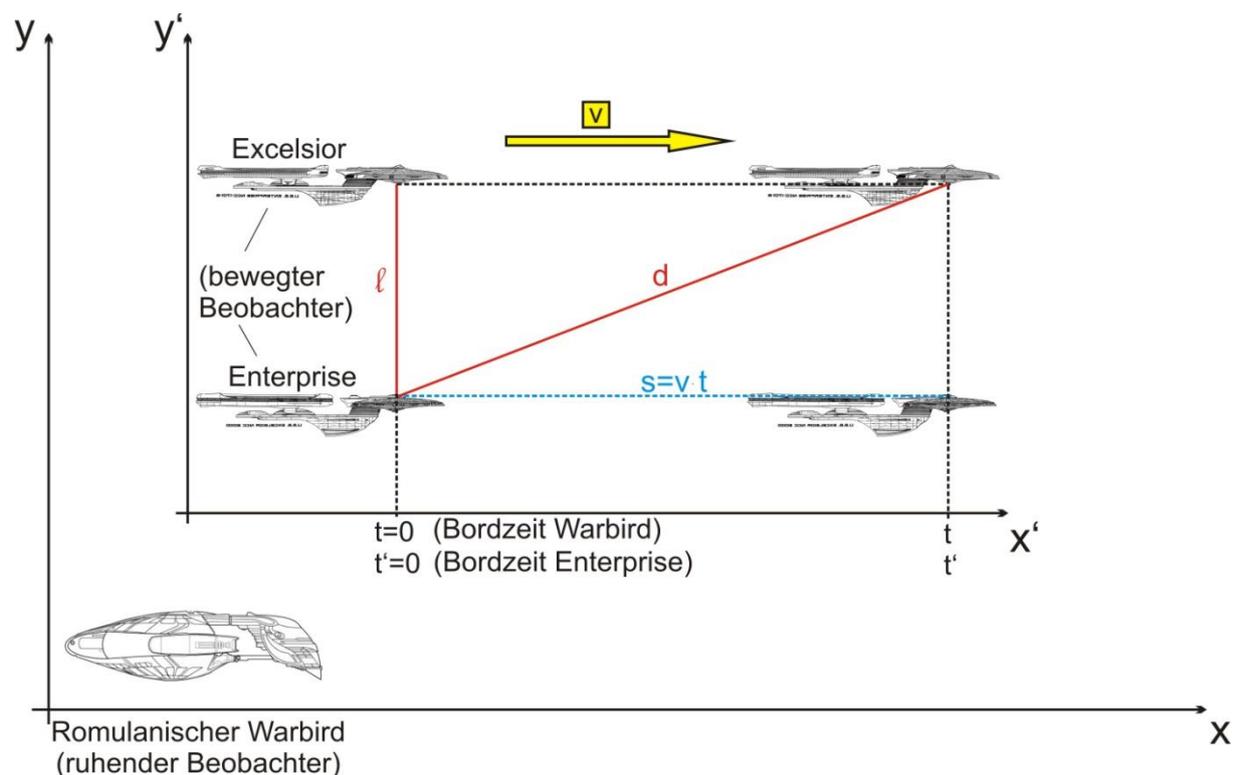
Merksatz: „Es gibt keine absolute Gleichzeitigkeit“

Anmerkung: Das oben beschriebene Gedankenexperiment zur Gleichzeitigkeit ist eines von vielen sehr ähnlichen Gedankenexperimenten, die sich durch kleine Unterschiede in der Ausgangssituation unterscheiden und deshalb zu komplett anderen Schlussfolgerungen und Ergebnissen führen. Im obigen Beispiel befinden sich beide Beobachter zu dem Zeitpunkt am selben Ort, an dem sich die Wellenfronten der beiden Lampen treffen. In einer anderen Variante des Gedankenexperiments befinden sich die Beobachter zu dem Zeitpunkt am selben Ort, an dem die Lampen aufleuchten, also die Wellenfronten von den Lampen ausgesendet werden. In diesem Fall treffen die Wellenfronten für den Beobachter im Zug gleichzeitig bei ihm ein, wohingegen die Wellenfronten mit einem zeitlichen Versatz beim Beobachter auf dem Bahndamm eintreffen.

Um Unklarheiten zu vermeiden empfehle ich dem interessierten Leser an dieser Stelle bei Unklarheiten bezüglich der Gleichzeitigkeit von Ereignissen das zugehörige Minkowski-Diagramm zu zeichnen. Aufgrund der Komplexität der Thematik wird an dieser Stelle jedoch darauf verzichtet.

8.4.4 Zeitdilatation

Die beiden Raumschiffe USS-Enterprise und USS-Excelsior führen ein Experiment zum Nachweis der speziellen Relativitätstheorie durch. Beide Raumschiffe bewegen sich im konstanten Abstand l zueinander mit der Geschwindigkeit v durch den Weltraum. Die Bewegungsrichtung steht dabei senkrecht auf der Strecke l .



Von der Enterprise wird ein Lichtblitz gesendet der nach der Zeit t' (Bordzeit) auf der Excelsior beobachtet wird. Mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c und dem Weg-Zeit-Gesetz der geradlinig gleichförmigen Bewegung können die Wissenschaftsoffiziere an Bord die Zeit die der Lichtblitz für die Strecke benötigt berechnen:

$$c = \frac{l}{t'}$$

$$\Leftrightarrow t' = \frac{l}{c}$$

Ein relativ zu den beiden Föderationsschiffen im Raum ruhender romulanischer Warbird beobachtet das Experiment der beiden Schiffe. Für die Romulaner legt der Lichtblitz eine längere Strecke d als der Abstand l zwischen den Föderationsschiffen zurück. Diese entspricht gerade der Diagonalen im

Raum-Zeit-Diagramm (siehe Abbildung). Da die Lichtgeschwindigkeit im gesamten Universum konstant ist, benötigt das Licht aus Sicht der Romulaner im nicht bewegten System für die längere Strecke auch eine längere Zeit:

$$t = \frac{d}{c}$$

mit

$$t > t'$$

Auf den mit der Geschwindigkeit v bewegten Föderationsraumschiffen verläuft aus Sicht der Romulaner die Zeit also langsamer als auf dem sich relativ betrachtet in Ruhe befindlichen Schiff der Romulaner selbst. Diese Verlangsamung bzw. Dehnung der Zeit für bewegte Körper wird mit Zeitdilatation bezeichnet.

Merksatz: „Bewegte Uhren gehen langsamer“

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Zeit für die Besatzung der Föderationsraumschiffe völlig normal verläuft. Die Besatzung bewegt oder spricht nicht etwa in Zeitlupe, sondern agiert ganz normal und kann an sich selbst keine Zeitdilatation beobachten. Die Verlangsamung der Zeit kann nur vom Raumschiff der Romulaner aus beobachtet werden, da es sich relativ zu den Föderationsraumschiffen in Ruhe befindet. Könnten die Romulaner von ihrem Raumschiff aus durch die Fenster der Föderationsraumschiffe schauen, so würden sie tatsächlich beobachten, dass sich die Besatzung der Föderationsraumschiffe in Zeitlupe bewegt.

Ziel der nachfolgenden Überlegungen ist es nun eine Formel zur Berechnung der Zeitdilatation herzuleiten:

Hierzu wird zunächst die Strecke s betrachtet die die beiden Föderationsraumschiffe in der Zeit zurücklegen, die das Licht benötigt, um von einem Raumschiff zum anderen zu gelangen. Diese beträgt:

$$s = v \cdot t$$

Für die von den Romulanern gemessene Strecke des Lichts ergibt sich dann mit dem Satz des Pythagoras:

$$d = \sqrt{s^2 + l^2} = \sqrt{(v \cdot t)^2 + l^2}$$

Die Strecken l und d können nun aus den beiden obigen Formeln berechnet werden:

$$l = c \cdot t' \quad \text{und} \quad d = c \cdot t$$

Durch Einsetzen ergibt sich:

$$c \cdot t = \sqrt{(v \cdot t)^2 + (c \cdot t')^2}$$

Diese Formel wird nun abschließend algebraisch nach der verlangsamten Zeit t' umgeformt:

$$(c \cdot t)^2 = (v \cdot t)^2 + (c \cdot t')^2$$

$$\Leftrightarrow (c \cdot t')^2 = (c \cdot t)^2 - (v \cdot t)^2$$

$$\Leftrightarrow (c \cdot t')^2 = (c^2 - v^2) \cdot t^2$$

$$\Leftrightarrow t'^2 = \frac{(c^2 - v^2)}{c^2} \cdot t^2$$

$$\Leftrightarrow t'^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot t^2$$

$$\Leftrightarrow t' = t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Leftrightarrow t' = t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Für die Zeitdilatation ergibt sich somit die Formel:

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Betrachtung der Grenzfälle

Ist die Geschwindigkeit der beiden Raumschiffe sehr klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit ($v \ll c$), so geht der Quotient in der Klammer v/c gegen Null und t' ist ungefähr gleich t . Die Zeit wird also nur unmerklich an Bord verlangsamt.

Fliegen die beiden Raumschiffe hingegen fast mit Lichtgeschwindigkeit ($v \rightarrow c$) so geht der Quotient v/c gegen 1 und die Wurzel geht gegen Null. In diesem Fall würde die Bordzeit t' sehr viel langsamer verlaufen als die Zeit in der Umgebung. Für ein mit Lichtgeschwindigkeit fliegendes Raumschiff würde die Zeit stillstehen.