



# **Bewegte Uhren gehen langsamer**

## **Über die Zeit in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie**

Schriftliche Hausarbeit im Fach Physik

von

Martin Lenz

Weiltalschule / Weilmünster, Klasse R10b

Betreuer: Herr F. Feiling

29. Okt. 2021

## Inhalt

1	Wie viel Uhr ist es?.....	3
2	Die Zeit als physikalische Größe.....	3
3	Einsteins Überlegungen zur Zeit .....	4
3.1	Inertialsysteme .....	4
3.2	Bewegung der Inertialsysteme relativ zueinander .....	5
4	Zeitdilatation – Die Streckung der Zeit .....	5
4.1	Die Idee mit den Lichtuhren .....	5
4.2	Bewegte Lichtuhren .....	6
5	Die mathematische Beschreibung der Zeitdilatation .....	6
5.1	Die Formel für die Zeitdilatation.....	6
5.2	Der Lorentz-Faktor .....	7
5.3	Berechnungen an Beispielen .....	8
5.4	Sterbende Myonen .....	8
6	Einstein – ein genialer Geist.....	9
A	Einsteins Lebensdaten .....	10
B	Gleichzeitigkeit von Ereignissen.....	11
C	Das Zwillingsparadoxon .....	12
D	Quellen.....	13
	Literaturverzeichnis und Quellen im Internet.....	13
	Bildnachweise .....	13
E	Erklärung des Verfassers/Selbständigkeitserklärung.....	14

## 1 Wie viel Uhr ist es?

Die Frage nach der Uhrzeit ist eigentlich ganz einfach zu beantworten: Ich muss nur auf eine Uhr oder mein Handy schauen. Wenn ich meine Freunde frage, können sie mir ebenfalls mit einem Blick auf ihre Uhr sagen, wie spät es ist, selbst wenn sie an einem ganz anderen Ort sind. Die Uhrzeit ist für uns jederzeit eindeutig bestimmbar. Die Zeit läuft für alle gleich ab.

Anfang des Zwanzigsten Jahrhunderts zerstörte der Physiker Albert Einstein diese Vorstellung, dass die Zeit für alle gleich ist. Er stellte dabei eine Theorie auf, die uns ganz neu auf die Zeit blicken lässt.

Als ich zum ersten Mal davon gehört habe, dass Uhren unterschiedlich schnell laufen können, war ich sofort interessiert. Das widerspricht nämlich unserer normalen Erfahrung. Was hat Einstein eigentlich genau gesagt? Warum wurde das nicht schon vorher festgestellt? Warum merken wir eigentlich nichts davon in unserem täglichen Leben?

Die Zeit ist eine der zentralen Größen in der Physik.

Ende des 19. Jahrhunderts entdeckte man, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist und sich nichts schneller als Licht bewegen kann. Albert Einstein erkannte, dass das Auswirkungen auf unser physikalisches Verständnis von der Zeit hat.

Bei seinen Überlegungen hat er den Begriff der Inertialsysteme eingeführt. Er beschrieb, was passiert, wenn sich diese Systeme bewegen. Wegen der Begrenzung der Lichtgeschwindigkeit kann eine Dehnung der Zeit beobachtet werden - es kommt zu einer „Zeitdilatation“. Das kann mit Hilfe eines Gedankenexperimentes erklärt werden.

Natürlich lässt sich die Dilatation auch mathematisch beschreiben.<sup>1</sup> Mitte des 20. Jahrhunderts – lange nach der Entwicklung der Relativitätstheorie - wurde die Zeitdilatation durch ein Experiment bestätigt.

Wie sind nun die Theorien Einsteins aus heutiger Sicht zu bewerten? Hat sich durch sie etwas in unserem täglichen Leben geändert und welche Bedeutung haben sie für die moderne Technik? Auf diese Fragen werde ich abschließend noch einmal genauer eingehen.

In einem Anhang habe ich Informationen zusammengestellt, die im Zusammenhang mit der Zeit in der Speziellen Relativitätstheorie interessant sind: Es wird kurz auf das Problem der Gleichzeitigkeit von Ereignissen eingegangen und das Zwillings-Paradoxon erklärt. Der Anhang enthält auch einen Lebenslauf Einsteins in tabellarischer Form.

## 2 Die Zeit als physikalische Größe

In dieser Arbeit geht es um die Zeit. Wir betrachten dabei den Begriff „Zeit“ so, wie er in der Physik und anderen Naturwissenschaften verwendet wird.

Was ist Zeit? Wir leben in der Zeit. Alles, was uns umgibt, wird durch zeitliche Abläufe bestimmt. Unser Tagesablauf wird durch den Wechsel von Tag und Nacht bestimmt. Sogar der Jahresablauf hat einen zeitlichen Rhythmus, nach dem Mensch und Natur leben.

---

<sup>1</sup> Das Thema wird in dieser Arbeit so aufbereitet, dass es mit meinen Kenntnissen der Fächer Mathematik und Physik bis zur 9. Klasse erklärt werden kann.  
Eine sehr anschauliche Beschreibung gibt das Video [3], das mich auch zu der Wahl des Themas angeregt hat.

Die alten Völker, z.B. die Babylonier oder die Ägypter, haben das Jahr in 365 Tage eingeteilt, die Tage in 24 Stunden, die Stunden in 60 Minuten. Man hat sich also schon sehr früh für eine Messung der Zeit interessiert. Man brauchte dies für die Landwirtschaft und die Astronomie.



Wir können Zeit messen, weil sich bestimmte Vorgänge immer wieder in regelmäßigen Abständen wiederholen. Die Einteilung in Tage und Stunden ist dabei sehr grob. Man hat später Hilfsmittel für eine feinere Einteilung erfunden: Sanduhren, Pendel, Uhren mit Pendel. Man brauchte Uhren bei der Schifffahrt, um sich auf dem Meer zu orientieren. Die Uhren wurden immer genauer. Heute nutzen wir moderne Uhren, bis hin zu Atomuhren, bei denen die Schwingungen von Atomen gezählt werden.

Zeit läuft einfach so ab. Wir denken in Vergangenheit und Zukunft. Die Gegenwart liegt dazwischen und verbindet beide. Zeit ist aber auch eine physikalische Größe.<sup>2</sup> Wir beschreiben viele Abläufe im Laufe einer Zeitspanne. Daher haben sich viele Physiker mit der Beschreibung der Zeit beschäftigt. Für Physiker war die Zeit lange eine absolute Größe. So schrieb Newton in seiner Principia Mathematica:

„Die absolute, wahre mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung zu einem Gegenstand.“<sup>3</sup>

Mit Hilfe des Zeitbegriffes konnte Newton verschiedene andere physikalischen Größen, wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung beschreiben. Er konnte dadurch auch die Ergebnisse von Experimenten vergleichen.

Zeit war für ihn eine absolute Größe. Sie verlief für ihn gleichmäßig und unabhängig von äußeren Einflüssen. Dieser Grundsatz wurde bis Anfang des 20. Jahrhunderts durch die Naturwissenschaftler allgemein akzeptiert.



Zeit war für ihn eine absolute Größe. Sie verlief für ihn gleichmäßig und unabhängig von äußeren Einflüssen. Dieser Grundsatz wurde bis Anfang des 20. Jahrhunderts durch die Naturwissenschaftler allgemein akzeptiert.

### 3 Einsteins Überlegungen zur Zeit

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wusste man, dass die Geschwindigkeit des Lichtes begrenzt ist. Nichts bewegt sich schneller als Licht. Einstein entdeckte, dass dies Auswirkungen auf unser Verständnis der Zeit hat.

#### 3.1 Inertialsysteme

Bei seinen Überlegungen führte er den Begriff der Inertialsysteme ein.

Ein Inertialsystem ist ein System von Objekten, das sich in einer gleichförmigen Bewegung befindet. Es wirken also keine äußeren Kräfte auf das System und es wird dadurch weder beschleunigt noch

---

<sup>2</sup> Zeit ist eine der physikalische Basiseinheiten, wie auch z.B. Länge und Masse. Zeit wird heute nach internationalem Standard in Sekunden (s) gemessen.

<sup>3</sup> Zitiert aus [2], S. 21

Isaak Newton (1635-1703) war englischer Gelehrter und Naturwissenschaftler. Er beschrieb in seiner „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ (Philosophische Prinzipien der Naturlehre) grundlegende Naturgesetze.

abgebremst. Beispiele hierfür sind ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrender Zug oder ein mit konstanter Geschwindigkeit durch den Weltraum fliegendes Raumschiff. <sup>4</sup>

Einstein formulierte für die Inertialsysteme zwei Grundsätze: <sup>5</sup>

- In jedem Inertialsystem gelten unverändert alle physikalischen Gesetze. Dies ist Einsteins „Prinzip der Relativität“. Es lässt sich daher nicht feststellen, ob ein Inertialsystem sich bewegt oder sich in Ruhe befindet.
- Die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Inertialsystemen gleich groß. Sie wird üblicherweise mit  $c$  abgekürzt. <sup>6</sup> Der Wert beträgt rund 300.000 km/s.

Diese beiden Grundsätze führen direkt zur Speziellen Relativitätstheorie.

### 3.2 Bewegung der Inertialsysteme relativ zueinander

Einstein dachte darüber nach, was passiert, wenn sich die Inertialsysteme bewegen. Bevor er seine Ideen formulierte, gab es noch ruhende und bewegte Systeme und die Zeit verlief in allen Systemen gleich. Der erste Grundsatz Einsteins macht es allerdings unmöglich, festzustellen, ob ein Inertialsystem ruht oder sich bewegt. Physikalische Experimente zur Überprüfung würden in allen Systemen gleich ablaufen. Selbst die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Systemen gleich.

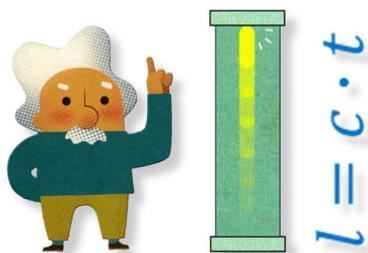
Wir können nur noch die relative Bewegung der Systeme zueinander feststellen. Die Vorstellung eines absolut ruhenden Systems oder eines zentralen Ruhepunktes ist damit nicht mehr gültig.

## 4 Zeitdilatation – Die Streckung der Zeit

Wegen der Begrenzung der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen kann eine Streckung der Zeit („Zeitdilatation“ <sup>7</sup>) beobachtet werden, wenn sich diese Systeme relativ zueinander bewegen.

### 4.1 Die Idee mit den Lichtuhren

In Gedanken kann man dazu das folgende Experiment durchführen:



Ein Lichtphoton, also ein Lichtteilchen, bewegt sich in einer Röhre mit jeweils einem Spiegel an beiden Enden. Durch die Spiegel wird das Photon so reflektiert, dass es die Röhre in umgekehrter Richtung durchläuft und auf den anderen Spiegel trifft. Das Photon bewegt sich also ständig mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  zwischen den Spiegeln hin und her. Es benötigt dabei die Zeit  $t$ , um einmal die sogenannte „Lichtuhr“ der Länge nach zu durchfliegen. Die Länge der Lichtuhr - also der Abstand zwischen den beiden

Spiegeln - ist dann  $l = c \cdot t$ .

Was passiert nun, wenn eine Lichtuhr bei einem ruhenden Beobachter bleibt und eine zweite gleichartige Lichtuhr in einer Rakete mit gleichbleibender Geschwindigkeit am Beobachter vorbeifliegt?

<sup>4</sup> Inertia, lat. Trägheit

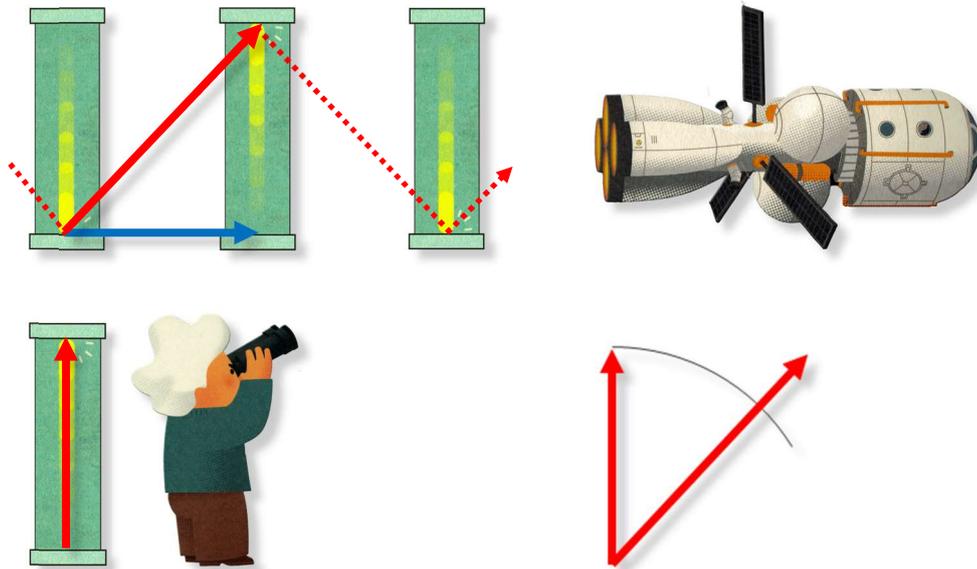
<sup>5</sup> Vergleiche zum Beispiel [3], ab Minute 1:30 oder [2], S. 28.

<sup>6</sup> Die heute gemessene Geschwindigkeit des Lichtes beträgt 299.792.358 m/s, siehe z.B. [1], S. 47. Ich verwende für die Berechnungen in dieser Arbeit 300.000 km/s.

<sup>7</sup> Dilatare, lat = verlängern, ausdehnen, vergrößern, erweitern

## 4.2 Bewegte Lichtuhren

Ein „ruhender“<sup>8</sup> Beobachter sieht, wie das Photon in der Lichtuhr der Rakete sich zusätzlich auch noch seitwärts bewegt.



Der Vergleich der beiden Lichtwege des Photons zeigt, dass für den ruhenden Beobachter der Weg des Lichtes auf dem Raumschiff länger ist. Die Geschwindigkeit des Lichtes ist allerdings in beiden Fällen gleich – nämlich  $c$ . Es bleibt als Erklärung daher nur, dass das Photon im Raumschiff eine längere Zeit benötigt, um sich zwischen den beiden Spiegeln zu bewegen.<sup>9</sup> Für den Beobachter wird die Zeit auf dem Raumschiff gestreckt.

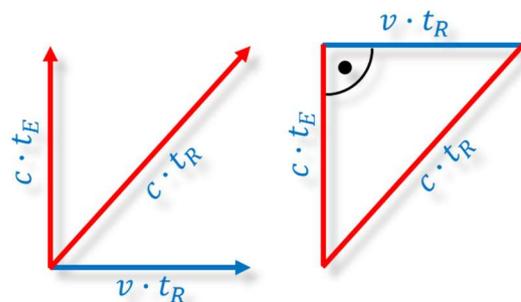
## 5 Die mathematische Beschreibung der Zeitdilatation

Kann man die Streckung der Zeit auch mit Hilfe einer mathematischen Formel berechnen?  
Ja, man kann!

### 5.1 Die Formel für die Zeitdilatation

Für die Herleitung der Formel müssen wir einige Vereinbarungen treffen:

- Wir bezeichnen den Beobachter (auf der Erde) mit „ $E$ “ und das Raumschiff mit „ $R$ “.
- Die Zeit, die der Lichtstrahl in der Lichtuhr auf der Erde benötigt, bezeichnen wir mit  $t_E$ , die beobachtete Zeit auf dem Raumschiff mit  $t_R$ .
- Neben den beiden Lichtwegen  $c \cdot t_E$  und  $c \cdot t_R$  haben wir auch noch den Weg  $v \cdot t_R$ . Diesen hat das Raumschiff in der Zeit  $t_R$  mit der Geschwindigkeit  $v$  zurückgelegt.



<sup>8</sup> Wir können eigentlich nur die relative Bewegung der Rakete zum Beobachter betrachten (Kap. 3.2). Zur Vereinfachung können wir allerdings annehmen, dass der „ruhende Beobachter“ ruht und die Rakete sich bewegt.

<sup>9</sup> Das gilt jedenfalls aus der Sicht des Beobachters auf der Erde. Für die Besatzung des Raumschiffs funktioniert ihre Lichtuhr ganz „normal“, da diese sich für sie nicht bewegt.

Legt man die Wege aneinander erhält man ein rechtwinkliges Dreieck. Wir können hier nun den Satz des Pythagoras auf die Längen der Seiten anwenden.<sup>10</sup>

$$(1) \quad (c \cdot t_R)^2 = (c \cdot t_E)^2 + (v \cdot t_R)^2$$

Diese Gleichung enthält die beiden Variablen  $t_E$  und  $t_R$ . Wir müssen diese jetzt nur noch nach  $t_R$  auflösen.

$$\begin{aligned}
 (c \cdot t_R)^2 &= (c \cdot t_E)^2 + (v \cdot t_R)^2 && | \text{Potenzen auflösen} \\
 c^2 \cdot t_R^2 &= c^2 \cdot t_E^2 + v^2 \cdot t_R^2 && | - v^2 \cdot t_R^2 \\
 c^2 \cdot t_R^2 - v^2 \cdot t_R^2 &= c^2 \cdot t_E^2 && | t_R^2 \text{ ausklammern} \\
 (c^2 - v^2) \cdot t_R^2 &= c^2 \cdot t_E^2 && | : (c^2 - v^2), \text{ mit } v \neq c \\
 t_R^2 &= \frac{c^2 \cdot t_E^2}{c^2 - v^2} = t_E^2 \cdot \frac{c^2}{c^2 - v^2} && | c^2 \text{ kürzen,} \\
 t_R^2 &= t_E^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = t_E^2 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} && | \sqrt{\phantom{x}} \\
 t_R &= \sqrt{t_E^2 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} && | t_E^2 \text{ aus der Wurzel ziehen} \\
 (2) \quad t_R &= t_E \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = t_E \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}
 \end{aligned}$$

## 5.2 Der Lorentz-Faktor

Den Bruch auf der rechten Seite in Formel (2) nennt man Lorentzfaktor. Er wird mit  $\gamma$  abgekürzt.<sup>11</sup>

$$(3) \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Verkürzt geschrieben lautet die Formel für die Zeitdilatation also:

$$(4) \quad t_R = t_E \cdot \gamma$$

Weil  $0 \leq v < c$  ist, sind  $0 \leq \left(\frac{v}{c}\right)^2 \leq \frac{v}{c} < 1$  und  $0 < \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \leq 1$ .

Daher ist immer  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \geq 1$ .

Mehr noch: Je größer  $v$  wird (also sich der Lichtgeschwindigkeit annähert), desto kleiner wird die Wurzel unter dem Bruch und desto größer wird  $\gamma$ . Und je größer  $\gamma$  wird, desto größer wird  $t_R$  im Verhältnis zu  $t_E$ .

<sup>10</sup> Vergleiche auch [2], S. 40+41 Hier wird auch noch einmal das Seitenverhältnis nach Pythagoras hergeleitet, allerdings ohne die Rechenschritte im Folgenden.

<sup>11</sup> Benannt nach dem niederländischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Der Lorentz-Faktor ist keine Konstante, er ist abhängig von der Geschwindigkeit des bewegten Objektes. Eigentlich müsste man  $\gamma(v)$  schreiben.

### 5.3 Berechnungen an Beispielen

Wir wollen nun an zwei Beispielen berechnen, wie sich die Geschwindigkeit auf die beobachtete Streckung der Zeit auswirkt:

a) Wir beobachten eine Rakete mit der Geschwindigkeit von  $v = 0,6 c = 180.000 \frac{km}{s}$ .

Wir setzen diesen Wert in (3) ein:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6 \cdot c}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,6^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,36}} = \frac{1}{\sqrt{0,64}} = \frac{1}{0,8} = 1,25$$

Was bedeutet dies? Während auf der Erde eine Sekunde vergeht ( $t_E = 1s$ ), beobachtet man von der Erde aus im Raumschiff eine Zeitspanne von  $t_R = t_E \cdot \gamma = 1s \cdot 1,25 = 1,25s$ .

b) Wir beobachten ein Auto mit der Geschwindigkeit von  $v = 100 \frac{km}{h}$ .

Dann sind  $v = 100 \frac{km}{h} = 100 \frac{km}{3600 s} = \frac{100 km}{3600 s} = \frac{1 km}{36 s} \approx 0,028 \frac{km}{s}$

$$\frac{v}{c} = \frac{0,028}{300000} = 0,000000093 \approx 0 \quad \text{und} \quad \gamma \approx \frac{1}{\sqrt{1-0^2}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1.$$

Damit ist dann  $\gamma \approx 1$ . Dies ist der Grund, warum in unserer Alltagswelt die Zeitdilatation keine Rolle spielt.

### 5.4 Sterbende Myonen

Die Zeitdilatation wurde mittlerweile durch den Zerfall von Myonen nachgewiesen. Myonen sind instabile Teilchen, die beim Auftreffen kosmischer Strahlung auf den Rand der Atmosphäre entstehen. Dadurch bildet sich ein ständiger Teilchenstrom, der mit beinahe Lichtgeschwindigkeit auf die Erde zurast. Myonen sind sehr instabil und zerfallen in Mikrosekunden. Trotzdem erreichen sie die Erdoberfläche.

Jedenfalls erreichen mehr Myonen die Erdoberfläche als man nach der Zerfallsrate erwarten würde. Der Grund liegt darin, dass von der Erde aus betrachtet die Zeit in dem Bezugssystem der Myonen langsamer abläuft. <sup>12</sup>

Vom Myon aus betrachtet beträgt seine Lebensdauer  $0,0000022s$ , von der Erde aus betrachtet sind es  $0,000044s$ . Das Myon lebt aus Sicht der Erde also 20mal länger und hat daher mehr Zeit, um eine längere Strecke zurückzulegen. <sup>13</sup>

<sup>12</sup> Dies wurde 1941 in einem Experiment durch Bruno Rossi und David Hall von der Universität Chicago gemessen. Es dauerte also noch mehrere Jahrzehnte, bis Einsteins Theorie bestätigt wurde. Siehe [2] ab S. 45

<sup>13</sup> Siehe [2], S. 45-46, auch [1], S. 40+41

## 6 Einstein – ein genialer Geist

"Woher kommt es, dass mich niemand versteht und jeder mag?" (Albert Einstein) <sup>14</sup>

Einstein war einer der bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts. Was hob Einstein aus der Menge der vielen Naturwissenschaftler hervor?

Einstein war derjenige, der die bis dahin gültigen Gesetze der Mechanik mit den neuen Erkenntnissen des ausgehenden 19. Jahrhunderts vereinte. Für ihn war es einfach nicht zufriedenstellend, dass die alten und die neuen Erkenntnisse nicht zusammenpassten. Die Fakten haben alle auf dem Tisch gelegen. Aber erst Einstein war es möglich, alles miteinander zu verbinden und auch die Konsequenzen seiner Ideen zu akzeptieren. Durch die Relativitätstheorie konnte er alles in einer einheitlichen Theorie zusammenführen.

Das Beeindruckende an Einsteins Ideen ist, dass er so scheinbar harmlose physikalische Grundgrößen wie Zeit, Länge oder Geschwindigkeit ganz neu betrachtete. Diese neue Sicht widersprach so ganz den Erfahrungen, die man im Alltagsleben machte. Und gleichzeitig hatte die Neuformulierung der Gesetze so wenig Auswirkungen auf das normale Leben. Die meisten Menschen können auch nach Einstein immer noch sagen, wieviel Uhr es ist.

Vor Einstein ist die Zeit noch eine absolute Größe gewesen, unabhängig von äußeren Einflüssen. Jetzt gilt, dass Zeit sich verändern kann. Später hat er in der Allgemeine Relativitätstheorie gezeigt, dass Raum und Zeit zusammenhängen und sich verändern können. Zeit verläuft nicht mehr gleichförmig und es gibt keinen absoluten und festen Raum mehr.

Hatten Physiker vor Einstein also unrecht? Einstein hat die klassischen Vorstellungen nicht widerlegt. Diese müssen aber als Spezialfall angesehen werden.

Als Einstein seine Theorien formulierte, konnte man sie nicht beweisen. Das Einzige, das für sie sprach, war ihre Einfachheit. Es hat noch mehrere Jahrzehnte gedauert, bis man die ersten Nachweise fand. <sup>15</sup> Einstein ist später in der Allgemeinen Relativitätstheorie noch weiter gegangen und hat Gesetze formuliert, die den Einfluss von Kräften und Beschleunigungen auf Zeit und Raum beschreiben. Seit der Erfindung der Atomuhren können wir heutzutage die Zeit sehr genau messen. So müssen wir z.B. die Uhren von GPS-Satelliten, die sich sehr schnell um die Erde bewegen, immer wieder neu justieren, damit sie korrekte Daten liefern. <sup>16</sup>

In dieser Arbeit habe ich die Dehnung der Zeit in der Relativitätstheorie behandelt. Nicht eingegangen bin ich auf die anderen Aussagen Einsteins – z.B. die Längenkontraktion oder die Zunahme der Masse bei bewegten Systemen. Dies hätte zu weit geführt. Im Anhang zu dieser Arbeit werden noch das Problem der Gleichzeitigkeit von Ereignissen und das Zwillingsparadoxon beschrieben.

---

<sup>14</sup> <https://gutezitate.com/zitat/179801>; (Die Quelle wird nicht in der Literaturliste aufgeführt.)

<sup>15</sup> Siehe Kap. 5.1, „Sterbende Myonen“, S. 6 in dieser Arbeit.

<sup>16</sup> GPS-Satelliten bewegen sich sehr schnell um die Erde. Die hohe Geschwindigkeit führt nach der Relativitätstheorie dazu, dass die Uhren der Satelliten im Laufe der Zeit im Vergleich zu irdischen Uhren nachgehen (vgl. [3] ab Minute 10:15)

Die Satelliten werden allerdings durch Gravitations- und Fliehkräfte auf ihrer Bahn gehalten. Dadurch sind sie kein Inertialsystem im eigentlichen Sinn. Hier kommt daher auch noch der Einfluss der später entwickelten Allgemeinen Relativitätstheorie hinzu.

## A Einsteins Lebensdaten

Im Folgenden ist Einsteins Lebenslauf in Form einer Tabelle kurz zusammengefasst: <sup>17</sup>

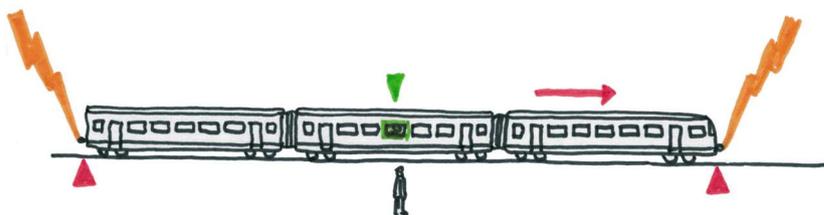
14. März 1879	Albert Einstein wird in Ulm als Sohn des Kaufmanns Hermann Einstein und dessen Frau Pauline (geb. Koch) geboren.
1896	Er beginnt ein mathematisch-physikalisches Fachlehrerstudium an der Technischen Hochschule Zürich, nachdem er dort im Vorjahr abgewiesen worden war.
1900	Diplom als Fachlehrer für Mathematik und Physik.
1902-1909	Technischer Vorprüfer am Eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum (Patentamt) in Bern.
1905	Veröffentlichungen in den "Annalen der Physik" zur Quantentheorie und zur Relativitätstheorie: Er erweitert die Quantentheorie von Max Planck um die Hypothese der Lichtquanten. Mit der Begründung der "Speziellen Relativitätstheorie" leitet er den Übergang zur Wissenschaft des 20. Jahrhunderts ein. Kurz darauf liefert er mit der Formel $E=mc^2$ einen Nachtrag zur Relativitätstheorie. Die Energie eines Körpers ist demnach das Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Seine Theorien setzen sich in der Wissenschaft schnell durch.
1907	Habilitation an der Berner Universität, nachdem sie diese im Vorjahr abgelehnt hatte.
1909	Einstein erhält eine außerordentliche Professur für theoretische Physik an der Universität Zürich.
1911	Als Ordinarius an der Prager Universität.
1912	Er arbeitet an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich, wo er allerdings neben seiner Forschung zu Lehrveranstaltungen zur theoretischen Physik verpflichtet ist.
1. April 1914	Einstein erhält den Ruf an die Preußische Akademie der Wissenschaften in Berlin. Er kann sich nun ausschließlich seiner Forschung widmen, da er keinerlei Lehrverpflichtungen hat.
Okt. 1915	Einstein formuliert die "Allgemeine Relativitätstheorie", die bis dahin geltende physikalische Erklärungsansätze ersetzt.
ab 1920	Aufgrund seiner Forschung und seiner jüdischen Herkunft wird Einstein in Deutschland angefeindet. Nach dem Mord an Walther Rathenau (1922), dem Hitler-Putsch (1923) und dem großen Wahlerfolg der Nationalsozialistischen Deutschen Arbeiterpartei (NSDAP) bei den Reichstagswahlen (1932), befürchtet er antisemitische Übergriffe auf seine Person und verlässt jeweils für einige Zeit Berlin.
1921	24. August: Der sogenannte Einsteinturm von Erich Mendelsohn wird in Potsdam eingeweiht. Mit Hilfe dieses Turmteleskops soll die Relativitätstheorie empirisch überprüft werden. Einstein erhält den Nobelpreis für Physik für die Einführung des Begriffs der Lichtquanten und seine Arbeiten auf dem Gebiet der theoretischen Physik.

<sup>17</sup> Die Daten wurden weitgehend wörtlich aus [4] entnommen und für die Arbeit aufbereitet.

	Seine Forschungen revolutionieren die Grundlagen der Physik: Es entsteht eine neue Auffassung über das Wesen von Raum und Zeit sowie eine neue Sicht der Schwerkraft.
1925-1927	Er arbeitet weiter an der Quantentheorie.
30. Jan. 1933	Am Tag der Machtübernahme durch die NSDAP befindet sich Einstein in Pasadena. Er protestiert gegen die Menschenrechtsverletzungen in Deutschland und legt sein Amt an der Preußischen Akademie der Wissenschaften nieder, noch bevor die Nationalsozialisten ihn ausschließen können. Einstein siedelt in die USA über, wo er in Princeton (New Jersey) eine neue Anstellung am Institute for Advanced Studies erhält.
2. Aug. 1939	Trotz seines grundsätzlichen Pazifismus unterzeichnet auch er eine Aufforderung an den amerikanischen Präsidenten, den Bau der Atombombe voranzutreiben. Er befürchtet das Voranschreiten der deutschen Atomforschung und deren militärische Nutzung.
6./9. Aug. 1945	Nach dem Abwurf der Atombomben über Hiroshima und Nagasaki durch die US-Luftwaffe gründet Einstein das "Emergency Committee of Atomic Scientists". Als Präsident des Komitees engagiert er sich für die friedliche Nutzung der Atomenergie.
18. April 1955	Albert Einstein stirbt in Princeton (New Jersey).

## B Gleichzeitigkeit von Ereignissen

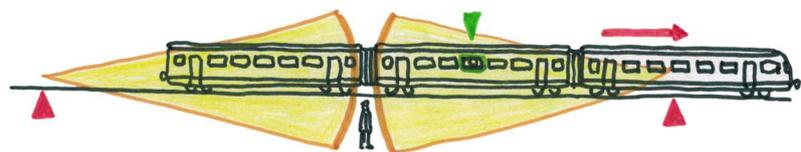
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hat auch Folgen für die Beobachtung von Ereignissen. Dazu führen wir folgendes Gedankenexperiment durch:<sup>18</sup>



In einen schnell fahrenden Zug schlagen zwei Blitze ein, einer an der Zugspitze, einer am Zugende. Dies wird von zwei Personen beobachtet, einem Spaziergänger am Bahndamm, der in der Mitte zwischen den Einschlagstellen steht, und einem Schaffner, der in der Mitte des Zuges steht (grün markiertes Fenster).

Was werden nun beide beobachten?

Das Licht beider Blitze erreicht den Spaziergänger am Bahndamm gleichzeitig. Für ihn finden die Ereignisse daher gleichzeitig statt.



Der Schaffner fährt zusammen mit dem Zug in die Richtung der Zugspitze. Wegen der Begrenzung der Lichtgeschwindigkeit erreicht das Licht des Blitzes von der Zugspitze den Schaffner früher als das Licht des Blitzes vom Zugende. Für den Schaffner finden damit die Einschläge zu unterschiedlichen Zeiten statt.

<sup>18</sup> Vgl. [2], S. 31

Wer hat nun Recht? Beide! Da sich beide Beobachter in unterschiedlichen Inertialsystemen befinden, nehmen sie die Blitzeinschläge tatsächlich unterschiedlich wahr.

## C Das Zwillingsparadoxon

Das Zwillingsparadoxon beschreibt eine paradoxe Folge der Zeitdilatation.

In diesem Gedankenexperiment ist einer von zwei Zwillingen Astronaut und reist mit hoher Geschwindigkeit von der Erde weg durch das All. Bei seiner Rückkehr sollte er viel jünger als sein Bruder sein, da die Uhren des Raumschiffs wegen der hohen Geschwindigkeit langsamer gehen.<sup>19</sup>

Tatsächlich paradox ist, dass aus Sicht des Astronautenzwillings die Erde mit dem anderen Zwillings mit rasender Geschwindigkeit sich von ihm entfernt und dann wieder angenähert hat – also sollte die Zeit auf der Erde langsamer als im Raumschiff des Astronauten vergangen sein und daher der Astronaut viel älter als sein Bruder auf der Erde sein.

Dieses Paradoxon wurde von den Gegnern der Relativitätstheorie ausgedacht, um zu zeigen, dass sie nicht stimmen kann.<sup>20</sup>

Die Reise endet wieder am Ausgangspunkt. Es ist also eine Rundreise. Dazu gehören dann Richtungsänderungen, Beschleunigungen und Bremsungen. Also wechselt oder verlässt mindestens einer der Zwillingsbrüder sein Inertialsystem.<sup>21</sup> Das verstößt aber gegen die Grundlagen in der Speziellen Relativitätstheorie. Dadurch lässt sich das Paradoxon auflösen.

---

<sup>19</sup> Bis hierher wird meistens das Zwillingsparadoxon beschrieben, aber es geht noch weiter ...

Ein Paradoxon beschreibt einen unerwarteten Widerspruch. Paradoxos, griech. = unerwartet, unglaublich

<sup>20</sup> Siehe [2], S. 50-52.

<sup>21</sup> Inertialsysteme sind gleichförmig bewegte Bezugssysteme. Wegen der Beschleunigungen und Abbremsungen während des Fluges gibt es kein durchgehend vorhandenes Inertialsystem. Es ist aber tatsächlich so, dass nach der später entwickelten und auch komplizierteren Allgemeinen Relativitätstheorie, der Astronauten-Zwilling weniger schnell altert.

## D Quellen

### Literaturverzeichnis und Quellen im Internet

- [1] Sheddad Kaid-Salah Ferrón and Eduard Altarriba (Illustrationen):  
**Professor Albert und das Abenteuer der Relativitätstheorie**  
München: Knesebeck, GmbH&Co. Verlag KG, Dt. Erstausgabe, 2020.
- [2] Thomas Bürke:  
**E=mc<sup>2</sup>**  
München: Anaconda Verlag, 2. Auflage, 2021.
- [3] Vlog der Zukunft and Ronny  
**“Spezielle Relativitätstheorie I - Warum Zeit nicht gleich Zeit ist (2018) - youtube”**  
Raumzeit - Vlog der Zukunft, 22 Juli 2018. [Online].  
<https://www.youtube.com/watch?v=RBpm-65JKV0> [Zugriff: 16. Juli 2021].
- [4] Kai-Britt Albrecht, Antonia Meiners and Lutz Walther:  
**“Lemo - Lebendiges Museum Online”**  
Deutsches Historisches Museum, Berlin, 24.03.2021. [Online].  
<https://www.dhm.de/lemo/biografie/albert-einstein> [Zugriff: 02. Sept. 2021].

### Bildnachweise

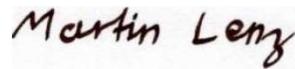
- |           |   |
|-----------|---|
| Titelbild | Umschlagbild von [1]  |
| Kap. 2    | entnommen aus [1], S. 11  |
| Kap. 4.1  | entnommen aus [1], S. 24 (Einstein Figur) und S. 37 (Raumschiff).<br>Die Lichtuhr wurde in PowerPoint gezeichnet. |
| Kap. 4.2  | ebenfalls entnommen aus [1].<br>Die Pfeile wurden als Form in Word eingefügt. (Menü: Einfügen – Formen)           |
| Kap. B    | Eigene Zeichnung nach einer Idee/Vorlage aus [2], S. 31   |
| Formeln   | Für die Formeln wurde der Formeleditor in Word verwendet<br>(Menü: Einfügen – Formel).                            |

## E Erklärung des Verfassers/Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte schriftliche Hausarbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet und die den benutzten Quellen entnommenen Passagen als solche kenntlich gemacht habe.

Diese schriftliche Hausarbeit ist weder in dieser noch in einer ähnlichen Form im Rahmen einer Präsentationsprüfung vorgelegt worden.

Grävenwiesbach, den 29. Okt. 2021

  
\_\_\_\_\_

(Ort, Datum, Unterschrift)