

## 5. Die Relativitätstheorie – Grenzen der Newtonschen Mechanik

### 5.1 Grundaussagen der speziellen Relativitätstheorie (SRT)

#### a) Klassische Vorstellungen von Raum und Zeit

Die Newtonsche Physik geht von

- einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit aus, d.h.
  - Raum und Zeit existieren objektiv und unabhängig vom Bewegungszustand eines Körpers.
  - Raum und Zeit beeinflussen sich gegenseitig nicht!
  - Raum und Zeit sind universell, d.h. die räumlichen Abmessungen und die Zeitdauer eines Vorganges sind in allen Bezugssystemen gleich!
- einer absoluten Masse aus, d.h. sie ist in allen Bezugssystemen gleich!
- einer relativen Geschwindigkeit aus, d.h. Beobachter in verschiedenen Bezugssystemen messen unterschiedliche Geschwindigkeiten.

#### Bezugssysteme:

Im Mittelpunkt der speziellen Relativitätstheorie stehen Beobachter in ihren eigenen Bezugssystemen. Diese bewegen sich mit konstanten Geschwindigkeiten relativ zueinander.

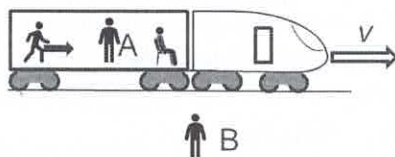
Dabei wird aus Sicht eines bewegten Beobachter A (im Zug) und einem ruhenden Beobachter B (in unserem Fall häufig Einstein) unterschieden.

Weitere Informationen zum Thema Bezugssysteme findet man im Buch auf S. 26.

#### 5.1 Die spezielle Relativitätstheorie

#### Beispiel:

Ein ICE fährt geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit  $v$ . Im Zug sitzt vor Beobachter A eine Person. Beobachter B ist außerhalb des Zugs. Ergänze die Lücken.



Ein Beobachter A im Bezugssystem ICE sagt: „Die Person ist in Ruhe.“

Ein Beobachter B außerhalb, der durch das Fenster in den Zug sieht, sagt: „Die Person bewegt sich geradlinig mit konst. Geschwindigkeit.“

Bewegt sich eine Person im Zug, so nehmen die beiden Beobachter auch diese Bewegung unterschiedlich wahr. Wahr

Bei höherer Geschwindigkeit (ab 10% der Lichtgeschwindigkeit) liefert die Newtonsche Physik **falsche** Ergebnisse.

## b) Einstein'sche Postulate und Bezugssysteme

Zunächst klären wir Begriffe, die im weiteren Verlauf wichtig sind.  
Ergänze die Lücken.

(Unbeschleunigte) Bezugssysteme, die sich relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, nennt man Inertialsysteme. In diesen gilt der Trägheitssatz.  
Beispiel: gleichförmig fahrender Zug

Bei einem **Postulat** handelt es sich um eine Forderung.

Die von Einstein entwickelte SRT geht von zwei grundlegenden Postulaten aus. Übernimm den Hefteintrag aus dem mebis-Kurs

### 1. Postulat: (Relativitätsprinzip):

Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt und physikalische Vorgänge laufen in ihnen identisch ab.

### 2. Postulat: (Konstanz der Lichtgeschwindigkeit):

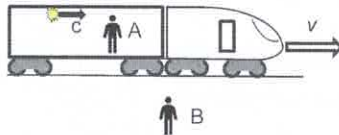
In allen Inertialsystemen beträgt die Vakuumlichtgeschwindigkeit:

$$c = \frac{299\,792\,458 \text{ km}}{\text{s}} = \frac{299\,792\,458 \text{ m}}{\text{s}} \approx 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dies gilt unabhängig von der Momentangeschwindigkeit der Lichtquelle

#### Beispiel:

Ein ICE fährt geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit  $v$ . Beobachter A ist innerhalb und Beobachter B ist außerhalb des Zugs. Ergänze die Lücken.



Würde aber die Person im Zug eine Lampe anschalten, so wäre die Geschwindigkeit des Lichts innerhalb und außerhalb des Zugs gemessen gleich groß.

5.1 Die spezielle Relativitätstheorie

Aus den Postulaten von Einstein lassen sich mehrere Folgerungen ableiten. Im nächsten Kapitel werden weitere Folgerungen behandelt. Übernimm den Hefteintrag aus dem mebis-Kurs.

### Folgerung aus den Postulaten

#### Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeit ist keine absolute Größe mehr)

- Zwei Uhren an unterschiedlichen Orten in einem gemeinsamen Inertialsystem werden durch ein Lichtsignal synchronisiert, das vom Mittelpunkt ihres Abstandes ausgeht.
- Sind zwei Uhren in einem Inertialsystem synchronisiert, so sind sie nicht in allen anderen Inertialsystemen synchronisiert.
- Anstelle von Uhren kann man auch Ereignisse betrachten. Finden zwei Ereignisse innerhalb eines Inertialsystem gleichzeitig statt, so finden sie nicht in allen anderen Inertialsystemen gleichzeitig statt.

So wie im Sport manchmal eine Stoppuhr wichtig ist, benötigt man auch für die Spezielle Relativitätstheorie ein Messinstrument für die Zeit.

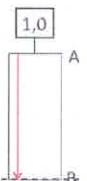
Aber dieses universelle Instrument, ist ein Gedankenkonstrukt – sie existiert nicht wirklich.

#### Die Lichtuhr:

Die Lichtuhr besteht aus zwei Spiegeln A und B und einem Photon, das sich periodisch zwischen den beiden Spiegeln mit der konstanten Lichtgeschwindigkeit  $c$  bewegt.

Sie tickt in jedem Inertialsystem gleich schnell, da die Lichtgeschwindigkeit  $c$  invariant ist.

Die Lichtuhr registriert einen Klick immer dann, wenn das Photon an dem oberen Spiegel A reflektiert wird.



#### Selbst-Check:

- Bezugssysteme
- Einstein'sche Postulate
- Relativität der Gleichzeitigkeit
- Die Lichtuhr

#### Übungsmöglichkeiten:

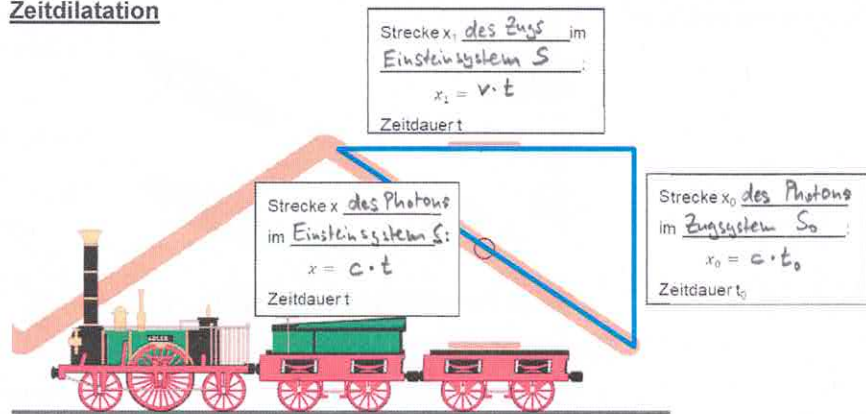
Passende Erklärungen und Aufgaben zum Thema findest Du auf Leifiphysik.

## 5.2 Folgerungen aus den Postulaten

Die **Zeitdilatation** (von lat.: dilatare, „dehnen“, „aufschieben“) ist ein Effekt, der durch die Relativitätstheorie beschrieben wird. Die **Zeitdilatation** bewirkt, dass alle inneren Prozesse eines physikalischen Systems relativ zum Beobachter langsamer ablaufen, wenn sich dieses System relativ zum Beobachter bewegt.

Ergänze mit Hilfe der „Herleitung der mathematischen Beschreibung der Zeitdilatation“ folgende Abbildung und leite den Lorentzfaktor  $\gamma$  her.

### Zeitdilatation



Beachte: Einstein im Inertialsystem  $S$  betrachtet als außenstehender Beobachter die Lichtuhr im bewegten Inertialsystem  $S_0$  der fahrenden Lokomotive Adler.

Da die Lichtgeschwindigkeit konstant ist und die zurückgelegten Strecken der beiden Photonen unterschiedlich lang sind, muss auch die Zeit  $t \geq t_0$ , bzw.  $t_0 \leq t$  sein.

### Herleitung des Lorentzfaktors:

Ansatz mit Hilfe des Satzes von Pythagoras:

$$x^2 = x_0^2 + x_1^2$$

Einsetzen der Beziehungen für die einzelnen Strecken:  $(c \cdot t)^2 = (c \cdot t_0)^2 + (v \cdot t)^2$

Auflösen der entstandenen Gleichung nach  $t$

$$\begin{aligned} c^2 t^2 &= c^2 t_0^2 + v^2 t^2 \quad | -v^2 t^2 \\ c^2 t^2 - v^2 t^2 &= c^2 t_0^2 \quad | : c^2 \\ t^2 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) &= t_0^2 \quad | : \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \\ t^2 &= \frac{t_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \Rightarrow \quad t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot t_0 \end{aligned}$$

5.2 Folgerungen aus den Postulaten

Bearbeite hier die Aufgabe und kontrolliere anschließend selbst im mebis-Kurs.

### Aufgabe: Eine physikalische Love-Story

①  $t = \gamma \cdot t_0 \Rightarrow \gamma = 2$

② Geschwindigkeit

③  $v = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot c = 0,87 \cdot c$

④ doppelt | 40

⑤ Strecke und Geschwindigkeit

⑥ 8660 | c

Lösung  
mebis Quiz

Übernehme die Zusammenfassung aus dem mebis-Kurs.

### Zusammenfassung:

Es gilt der Zusammenhang

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$$

mit dem Lorentzfaktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

### Zeitdilatation:

Die Zeitdauer gemessen in  $\Delta t_0$  für ein Ereignis in einem relativ zum Ruhsystem bewegten Inertialsystem  $S_0$  ist kleiner als die Zeitdauer  $\Delta t$ , die ein Beobachter in seinem Ruhsystem  $S$  für das gleiche Ereignis misst.

Kurz zusammengefasst: Bewegte Uhren gehen langsamer

$\Delta t_0$  bezeichnet die Eigenzeit; das ist die Zeit, die ein mitbewegter Beobachter im System  $S_0$  für ein Ereignis misst. Da für den Lorentzfaktor stets gilt:

$$\gamma \geq 1$$

kann man sich mit Bewegte Uhren gehen langsamer auch die Beziehung

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$$

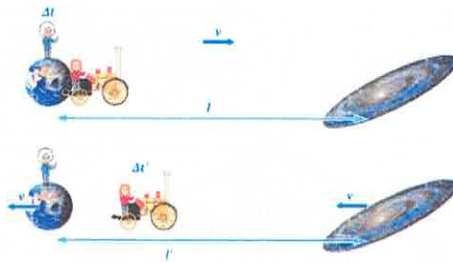
gut merken.

5.2 Folgerungen aus den Postulaten



Die Längenkontraktion ist eine Folgerung aus den Postulaten und findet nur in Bewegungsrichtung statt.

## Längenkontraktion



Einstein schreibt:  $v = 0,99 \dots c = \frac{1}{\gamma}$

Newton schreibt:  $v = 0,99 \dots c = \frac{v'}{\Delta t'}$

Gleichsetzen und Auflösen nach  $l'$ :  $l' = l \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t'}$   
 $= \frac{l}{\gamma}$

Erinnerung:  $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$

hier:  $\Delta t_0 = \Delta t'$

Also:  $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\gamma}$

$l'$ : kontrahierte Länge, wenn sich Objekt bewegt  
 $l$ : Ruhelänge (Länge, wenn Objekt ruht)

Mit der Formel der Zeitdilatation folgt:  $l' = l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

### Zusammenfassung:

Für ruhende Beobachter erscheint die Länge eines schnell bewegten Körpers verkürzt.

$$l' = l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = l \cdot \frac{1}{\gamma}$$

Mit dem Lorentzfaktor  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Bearbeite hier die Aufgabe und kontrolliere anschließend selbst im mebis-Kurs.

### Aufgabe: Kontrolle zur Längenkontraktion beim Sonnenwind

- |                 |           |
|-----------------|-----------|
| ① ruhend        | ⑧ 675     |
| ② Erde          | ⑨ 300 000 |
| ③ verkürzt      |           |
| ④ kontrahiert   |           |
| ⑤ Lorentzfaktor |           |
| ⑥ 1,0000045     |           |
| ⑦ 149,999325    |           |

5.2 Folgerungen aus den Postulaten

Ein Astronaut tritt mit 25 Jahren eine Weltraumreise an, die ihn mit 80% der Lichtgeschwindigkeit durch das All führt. Bei der Rückkehr auf die Erde ist sein Zwilling Bruder 50 Jahre.  
 Berechne das Alter des Astronauten.

### Training

$$t_{\text{Astronaut}} = \frac{t_{\text{Ruhe}}}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2}} = \frac{5}{3}$$

$$t_A = \frac{25a}{\frac{5}{3}} = 15a$$

Alter Astronaut: 40a

### Training

Ein 100m langer ICE fährt mit 90% der Lichtgeschwindigkeit. Sitzt man im Zug (Im Bezugssystem des Zuges) erscheint er 100m lang. Fährt er an einer Person auf dem Bahnsteig vorbei, so erscheint er kürzer.  
 Berechne die Länge eines Objekts, dass sich mit 90% der Lichtgeschwindigkeit bewegt und in Ruhe 100m lang ist.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,9c}{c}\right)^2}} = 2,3$$

$$l' = l \cdot \frac{1}{\gamma} = 100m \cdot \frac{1}{2,3} = 44m$$

### Selbst-Check:

- Zeitdilatation
- Längenkontraktion