

# Relativitätstheorie – Fragen

## **Experiment von Michelson–Morley**

Lichtäther

Aufbau und Durchführung

Folgerungen von Einstein

## **Grundlagen der Relativitätstheorie**

Inertialsystem + Relativitätsprinzip

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Universalität der Grundprinzipien für alle Teile der Physik

## **Zeitdilatation**

Gedankenexperiment mit bewegten Lichtuhren

Experimentelle Beobachtungen

## **Relativitätstheorie: Problem der Gleichzeitigkeit**

Bedeutung der Zeit aus relativistischer Sicht

Signallaufzeit und Information

Atomuhr

Weltzeit

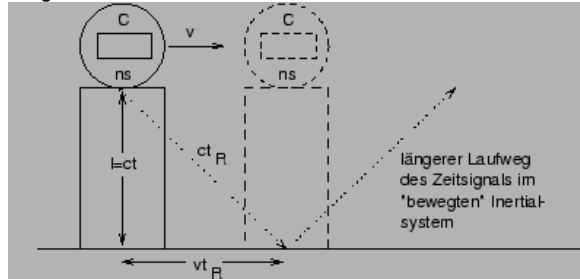
Relativität von Gleichzeitigkeit

# Relativitätstheorie – Antworten

## Die Zeit dehnt sich

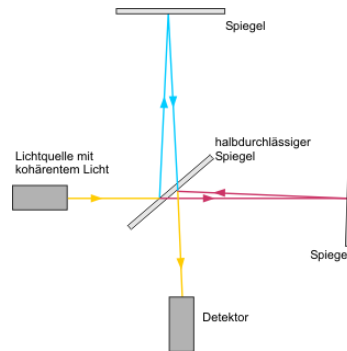
Für einen bewegten Beobachter verstreicht die Zeit langsamer: Das ergibt sich zwangsläufig, wenn die Lichtgeschwindigkeit immer gleich bleibt. Wieso das so ist, versteht man, wenn der bewegte Beobachter die Zeit mit einer Lichtuhr misst: Zwischen zwei Spiegeln läuft ein Lichtstrahl hin und her. und mit jeder Ankunft des Lichtstrahls am Spiegel zählt die Uhr einen Takt weiter. Im fliegenden Raumschiff tickt diese Uhr mit normaler Geschwindigkeit (Bild ). Betrachten wir

Raumschiff und Uhr aber von der stehenden Erde aus, so sehen wir, wie die Lichtstrahlen einen Zickzackweg zurücklegen (Bild ). Da dieser Weg länger ist, laufen von uns aus gesehen die Uhren im Raumschiff langsamer. Diese Zeitdehnung ist bei Alltagsgeschwindigkeiten extrem klein. Wer allerdings mit fast lichtschnellen Teilchen arbeitet, muss sie unbedingt berücksichtigen.



Huygens interpretierte 1690 das Licht als [Wellenphänomen](#) und führte den Äther als Trägermedium ein, in Analogie zur Luft für den [Schall](#). Dieser [Lichtäther](#) durchdrang nach seiner Vorstellung die feste Materie ebenso wie den leeren Raum des [Weltalls](#). Das Konzept in sich wies schon die Schwäche auf, dass der Äther einerseits Eigenschaften eines [starrten Körpers](#) haben musste, um die Querschwingungen des Lichts aufnehmen zu können, andererseits aber Eigenschaften einer [Flüssigkeit](#) zeigen musste. Untersuchungen zur Äthertheorie hatten zwischenzeitlich zu der Annahme geführt, dass der Ätherstoff etwa  $1,5 \cdot 10^{-11}$  mal leichter sein musste als [atmosphärische Luft](#). Beim [Interferenzversuch von Michelson/Morley 1887](#) (siehe auch [Interferometer](#)) wurde festgestellt, dass die [Geschwindigkeit](#) der Erde (an der Erdoberfläche) relativ zum vermuteten Lichtäther gleich null ist. Daraus erwachsen erste [Zweifel](#) an der Existenz eines Lichtäthers.

Der Aufbau des [Michelson-Morley-Experiments](#) (siehe Abb.) war somit klar. Ein Lichtstrahl wurde an einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Lichtstrahle geteilt, wobei der eine senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde und der andere parallel zur Bewegungsrichtung der Erde verlief. In einen bei beiden Lichtstrahlen gleichen Abstand wurden die Lichtstrahlen gespiegelt und wiederum auf den Halbspiegel geworfen. Dieser führte beide Lichtstrahlen zusammen, wodurch diese interferieren konnten. Es wurde ein Interferenzmuster erzeugt. Die ganze Apparatur wurde nun um  $90^\circ$  gedreht. Dadurch wurden die Strahlen vertauscht und es sollte sich somit das Interferenzmuster verschieben. Dieses sah jedoch genau so wie das erste aus. Das [Michelson-Morley-Experiment](#) war ein Fehlschlag. Eine Bewegung der Erde durch einen [Äther](#) konnte nicht nachgewiesen werden und somit auch nicht der Äther selber. <http://de.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley-Experiment>



## Gleichzeitigkeit gibt es nicht

Fest gefügte Begriffe wie Gleichzeitigkeit lösen sich auf, sobald man voraussetzt, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Beobachter gleich bleibt. Auf der Erde stellen wir leicht fest, ob zwei weit voneinander entfernte Lampen gleichzeitig aufblitzen: Genau dann, wenn das Licht beider Blitze gleichzeitig an der Mitte der Strecke eintrifft (Bild\_d). Ein mit hoher Geschwindigkeit vorbeifliegender Raumfahrer würde dasselbe Ereignis aber anders beurteilen: Da er auf die rechte Lampe zufliegt, erreicht ihr Licht ihn früher; das der linken erreicht ihn später, da er von ihr wegfiegt (Bild c ). Für ihn blitzt also die rechte Lampe früher als die linke. Welche Ereignisse als gleichzeitig betrachtet werden, hängt folglich vom Standpunkt des Beobachters ab: Eine >objektive < Gleichzeitigkeit gibt es nicht.



Anhand eines [Cäsiumatoms](#) kann ein Zeittakt festgelegt werden, welcher nur eine Ungenauigkeit kleiner als  $5 \times 10^{-12}$  besitzt. Das Cäsiumatom kann, wie alle Atome, in zwei Energiezuständen vorkommen, nämlich (+) und (-). Der ständige Wechsel des Energiezustandes dieses Cäsiumatoms kann durch elektronische Strahlung mit einer charakteristischen Frequenz erzwungen werden. Die Frequenz des Cäsiumatoms liegt bei einem Wert von 9.192.631.770 Hz. Das bedeutet, innerhalb einer Sekunde wechselt das Cäsiumatom seinen Energiezustand 9.192.631.770 mal. Diese Schwingdauer eines Cäsiumatoms ist zeitlich konstanter als das Schwingen eines Pendels oder die Schwingfrequenz eines Quarzes oder die Periodendauer der Erdrotation

In der [Physik](#) ist ein [Inertialsystem](#) (von [lateinisch](#) *inert* = untätig, träge) ein [Bezugssystem](#), in dem sich ein Beobachter ohne Einfluss von Kräften gleichförmig geradlinig bewegt.

## Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant

Fahren zwei Autos mit 200 km/h bzw. 300 km/h



aufeinander zu, so sieht jeder Fahrer den anderen mit 500 km/h näher kommen (Bild oben). Erhöhen wir die Geschwindigkeiten erheblich, so ändert sich die Lage grundlegend: Rast ein Raumschiff mit 200 000 km/s auf einen Lichtstrahl zu, der ihm mit circa 300 000 km/s entgegenkommt (Bild unten), so sieht der Raumfahrer den Lichtstrahl nun nicht etwa mit 500 000 km/s näherkommen, sondern nur mit etwa 300 000 km/s: Die Lichtgeschwindigkeit ist für alle Beobachter gleich! Dieser seltsame Umstand widerspricht unserer Intuition - und dennoch ist die Welt tatsächlich so beschaffen!



# Relativitätstheorie – Fragen

Galileitransformation, Lorentztransformation,

Weltdiagramme

Weltlinien

### **Relativistische Masse**

Ruhemasse

Relativistische Massenzunahme

Beispiele

### **Äquivalenz von Masse und Energie**

Relativistische kinetische Energie

Massendefekt

Teilchenproduktion

### **Längenkontraktion**

Bewegte Maßstäbe

Experimenteller Nachweis

## Relativitätstheorie – Antworten

## Die Masse wächst

Nicht nur Raum und Zeit verändern sich für einen schnell bewegten Beobachter, sondern auch die Massen. Warum das so ist, zeigt wieder der Blick in das fliegende Raumschiff. Die Astronautin dort wirft ein blinkendes Radio gegen die Wand und lässt es zerschellen (Bild j), Von der Erde aus betrachtet scheint die Lampe langsamer zu fliegen, da die Zeit im Raumschiff langsamer verstreicht (Bild k) Dennoch muss die Wucht mit der das Radio an die Wand prallt, für beide Beobachter gleich sein, denn beide sehen es ja zerschellen. Deshalb muss, von der Erde aus gesehen, die Masse des Radios gewachsen sein.

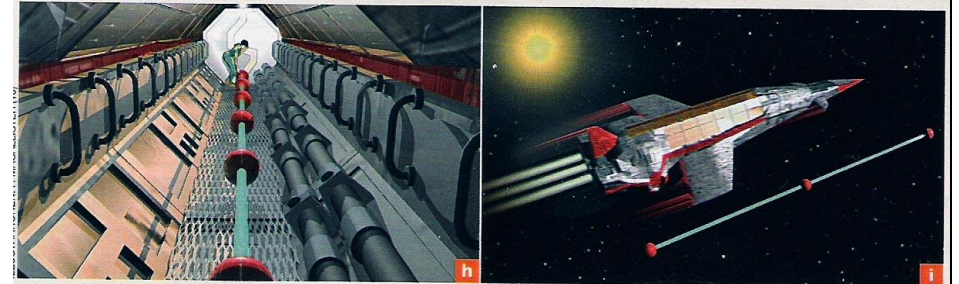
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Beispiel: Teilchenbeschleuniger



## Der Raum staucht sich (Längenkontraktion)

Rechnet man die Situation eines bewegten Beobachters genauer nach, so stellt man fest: Nicht nur die Zeit dehnt sich, sondern zusätzlich staucht sich auch noch der Raum. Wiederum bemerkt der Beobachter im fliegenden Raumschiff keine Veränderung: Für ihn bleibt sein Gefährt auch bei höchsten Geschwindigkeiten unverändert (Bild h). Von der stehenden Erde aus messen wir allerdings, dass sich das Raumschiff bei hohen Geschwindigkeiten verkürzt (Bild i). Wenn niemand im Universum eine Sonderstellung hat, muss dasselbe selbstverständlich auch umgekehrt gelten: Auch der Astronaut misst im Vorbeiflug, dass sich die Erde für ihn verkürzt hat – sie ist in seiner Flugrichtung abgeplattet und hat die Form einer riesigen Linse.



Seien  $x, y, z, t$  die Orts- und Zeitkoordinaten im ersten System,  $x', y', z', t'$  die **Koordinaten** im zweiten System, das sich mit der **konstanten** Geschwindigkeit  $v_x$  gegenüber dem ersten System in Richtung der  $x$ -Achse bewegt. Wenn man zusätzlich annimmt, dass zum Zeitpunkt 0 die Nullpunkte der Systeme übereinstimmen, erhält man als einfachste Form der **Galileitransformation** die vier Formeln:

$$x' = x + tv_x, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

Wenn die relative Bewegung der Koordinatensysteme entlang der  $x$ -Achse mit der Geschwindigkeit  $v$  erfolgt, und der Ursprung  $(0,0,0,0)$  beider Koordinatensysteme übereinstimmt, dann nimmt die **Lorentztransformation** folgende Gestalt an:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}$$

$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

wobei

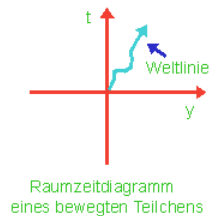
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

Es gilt  $\gamma \geq 1$ . Für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit wird  $\gamma$  sehr groß. Für kleine Geschwindigkeiten (im Alltagsleben beobachtete Geschwindigkeiten sind in diesem Sinne

immer klein) ist  $\gamma \approx 1$ . Die Lorentztransformation wird für  $c \rightarrow \infty$ , und daher  $\gamma = 1$ , zur **Galileitransformation**.

In der linken Darstellung sieht man nun, wie sich ein Teilchen in der **Raumzeit** bewegt. Wenn es eine gleichmäßige Geschwindigkeit hat, ergibt sich eine schräg ansteigende gerade Linie. Durch beschleunigte oder verzögerte Bewegung erhält man eine Kurve. Bei Beschleunigung bewegt sich die Kurve von der Zeitachse weg, durch Abbremsen wieder auf sie zu. Solche Linien, ob Kurven oder Geraden innerhalb der Raumzeit nennt man **Weltlinien**.



Die **relativistische kinetische Energie** leitet sich von der Einsteinformel

$E = m \cdot c^2$  ab, wenn man die Ruheenergie  $E_0 = m_0 \cdot c^2$  abzieht, das ergibt dann:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} \approx \frac{1}{2} x^2 + 1 \quad \text{um } x = 0 \quad \text{mit } x = v/c :$$

$$E_{\text{kin}} = (m - m_0)c^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) m_0 c^2 \approx \left( \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + 1 - 1 \right) m_0 c^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Näherung klass. kinet. E

**Massendefekt** ergibt sich, wenn sich die Kernbestandteile zu einem Kern binden und die Bindungsenergie sich in verringerter Masse des Kern ausdrückt.