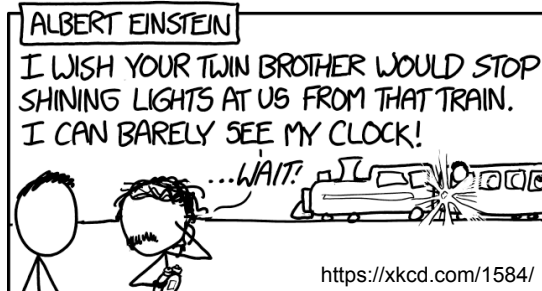
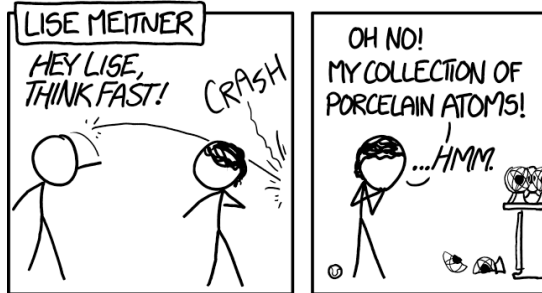
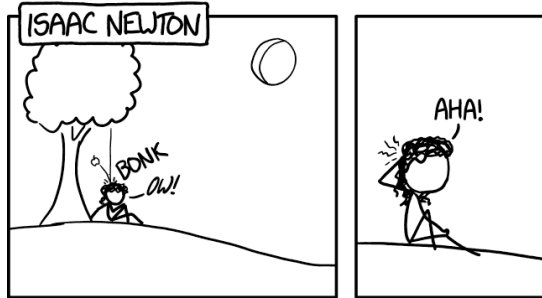


# „The end of the world as we know it“

Physik 1 für Chemiker und Biologen

12. Vorlesung



<https://xkcd.com/1584/>

Spezielle Relativitätstheorie:

- Lorentz-Transformation
- Zeitdilatation
- Längenkontraktion
- Impuls und Masse, relativistisch
- Kernspaltung und Kernfusion

# Newton'sches Relativitätsprinzip & Galilei Transformation

Erinnerung: Galilei-Transformation zwischen Inertialsystemen

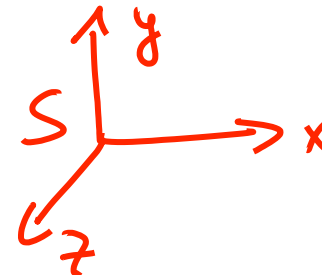


[http://www.abendblatt.de/img/hamburg/crop134573888/4392602762-w820-cv16\\_9-q85/Intercity-Express.jpg](http://www.abendblatt.de/img/hamburg/crop134573888/4392602762-w820-cv16_9-q85/Intercity-Express.jpg)



<http://3.mirror.co.uk/incoming/article1193614.ece/ALTERNATES/s615/James%20Bond%20Skyfall>

$v$  entlang  $x$



$\xrightarrow{v_{\text{Kugel}}}$

$\xrightarrow{v_{\text{Zug}}}$

$$x = x' + vt'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

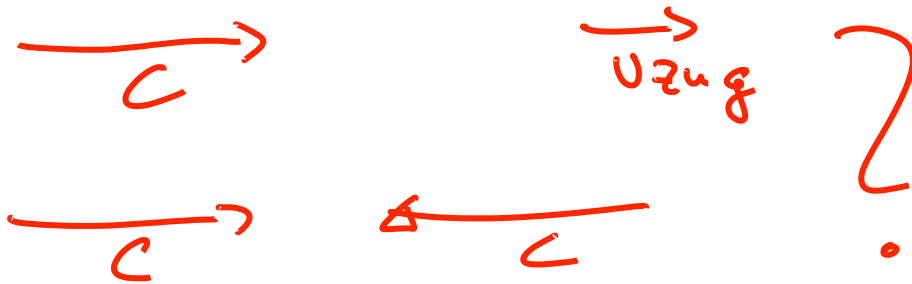
$$v_x' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} = \frac{d}{dt}(x - vt) = v_x - v$$

$$a_x' = \frac{dv_x'}{dt'} = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$

# Spezielle Relativitätstheorie

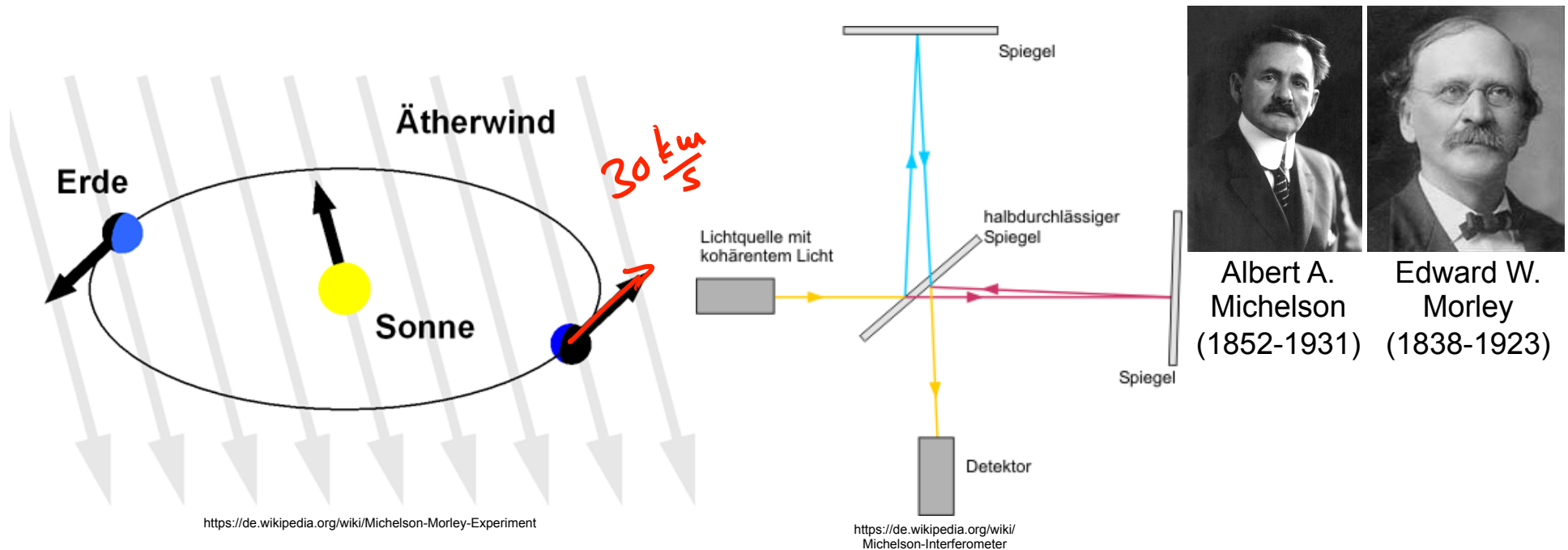


[http://www.starwars.com/the-force-awakens/images/share\\_1200x627.jpg](http://www.starwars.com/the-force-awakens/images/share_1200x627.jpg)



# Die Lichtgeschwindigkeit ist in jedem Inertialsystem gleich groß

Gibt es ein Ausbreitungsmedium für elektromagnetische Wellen (den Äther)?  
Hängt die Lichtgeschwindigkeit von der eigenen Geschwindigkeit ab?



Die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Bezugssystemen gleich!  
Es gibt keinen Äther.

**Michelson-Morley-Experiment**  
1881 in Potsdam und  
1887 in Cleveland

# Einsteins Lösung (1905)

## 3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;* *von A. Einstein.*

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in

*Annalen der Physik (1905)*

Zwei Postulate:

1. Die Naturgesetze sind invariant, d.h. die sind in allen Inertialsystemen gleich.
2. Jeder Beobachter misst für die Lichtgeschwindigkeit  $c$  im Vakuum denselben Wert.

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

# Lorentz-Transformation

Inertialsystem  $S'$  bewegt sich mit Geschwindigkeit  $v$  relativ zu  $S$ , bei  $t=0$  fallen die beiden Systeme zusammen

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit  $c$  soll gelten:

- Ansatz:  $x = \gamma (x' + vt')$  und  $x' = \gamma (x - vt)$
- $\gamma$  ist der gesuchte Korrekturterm

Lichtblitz in  $S$  bei  $t=0$ :  $x = ct$

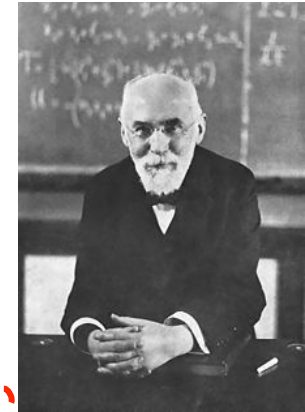
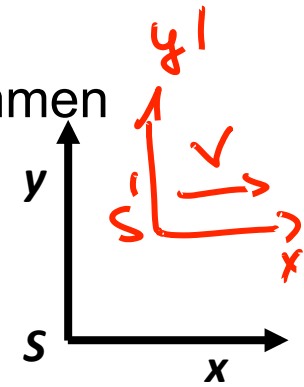
Aber auch  $x' = ct'$  in  $S'$

$$ct = \gamma (c + v)t'$$

$$ct' = \gamma (c - v)t$$

$$\Rightarrow c^2 = \gamma^2 (c + v)(c - v)$$

$$\Rightarrow \gamma^2 = \frac{c^2}{(c + v)(c - v)} = \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



[https://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik\\_Lorentz](https://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Lorentz)  
Hendrik Lorentz  
(1853 – 1928)

# Der $\gamma$ -Faktor

## Lorentz-Transformation

(S und S' bewegend sich relativ entlang x)

$$x = \gamma(x' + vt')$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

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

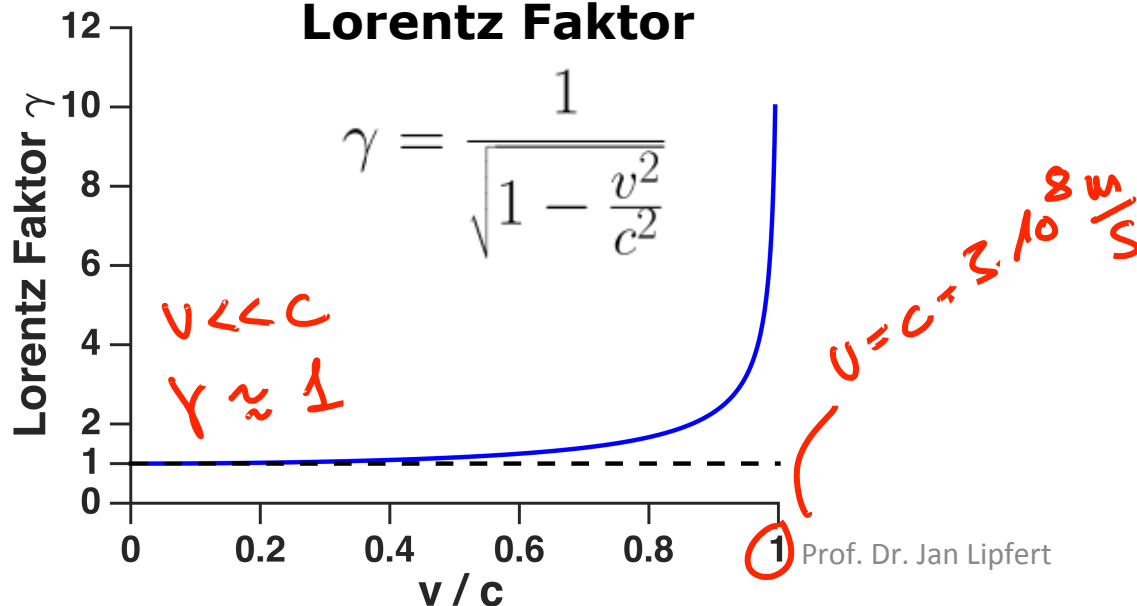
Für  $v \rightarrow c$   
 $\gamma \rightarrow \infty$



[http://adfc-blog.de/2014/01/tempo-30/beginn\\_der\\_zone\\_30/](http://adfc-blog.de/2014/01/tempo-30/beginn_der_zone_30/)

## Lorentz Faktor

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



# Wo spielt $\gamma$ eine Rolle?

## Makroskopische Objekte



<https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Herbie>

150 km/h

$$\gamma = 1$$



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Finnish\\_Air\\_Force\\_McDonnell\\_Douglas\\_F-18C\\_%28HN-411%29\\_at\\_RIAT.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Finnish_Air_Force_McDonnell_Douglas_F-18C_%28HN-411%29_at_RIAT.jpg)

2000 km/h

$$\gamma = 1$$



<https://de.wikipedia.org/wiki/Rakete>

10  $\frac{\text{km}}{\text{s}}$

$$\gamma \approx 1$$



<https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite>

Für GPS sind relativistische Effekte wichtig.

## Mikroskopische Objekte (Elementarteilchen)



<https://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber>

Flüssig bei Raumtemperatur



<http://home.wikia.com/wiki/File:Television.jpg>

$v \approx 0,1 c$



# Effekte der Speziellen Relativitätstheorie

## - Zeitdilatation

$$\Delta t_0 \hat{=} \text{Eigenzeit}$$

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

## - Längenkontraktion

$$L_0 \hat{=} \text{Eigenlänge}$$

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

## - Relativistischer Impuls

$$p = \gamma m_0 v$$



Hafele-Keating experiment  
(1971)

# Masse und Energie, relativistisch

Eine Masse  $m_0$  werde durch eine Kraft entlang eines Weges beschleunigt.

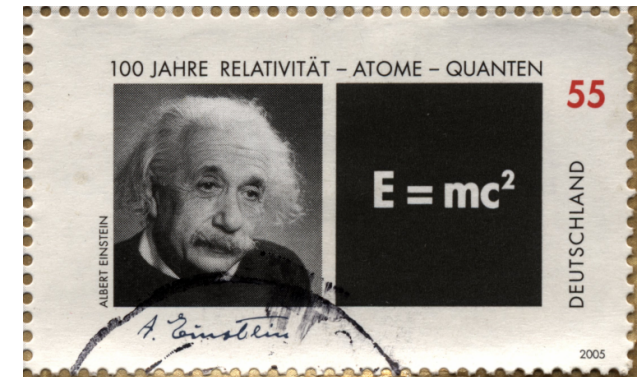
**Kinetische Energie:** Energie, die man verrichten muss, um die Masse zu beschleunigen.

$$E_{kin} = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad \text{Relativistische kinetische Energie}$$

$$E_0 = m_0 c^2 \quad \text{Ruheenergie}$$

$$E_{ges} = E_{kin} + E_0 = \gamma m_0 c^2 = m c^2$$

$$m = \gamma m_0$$

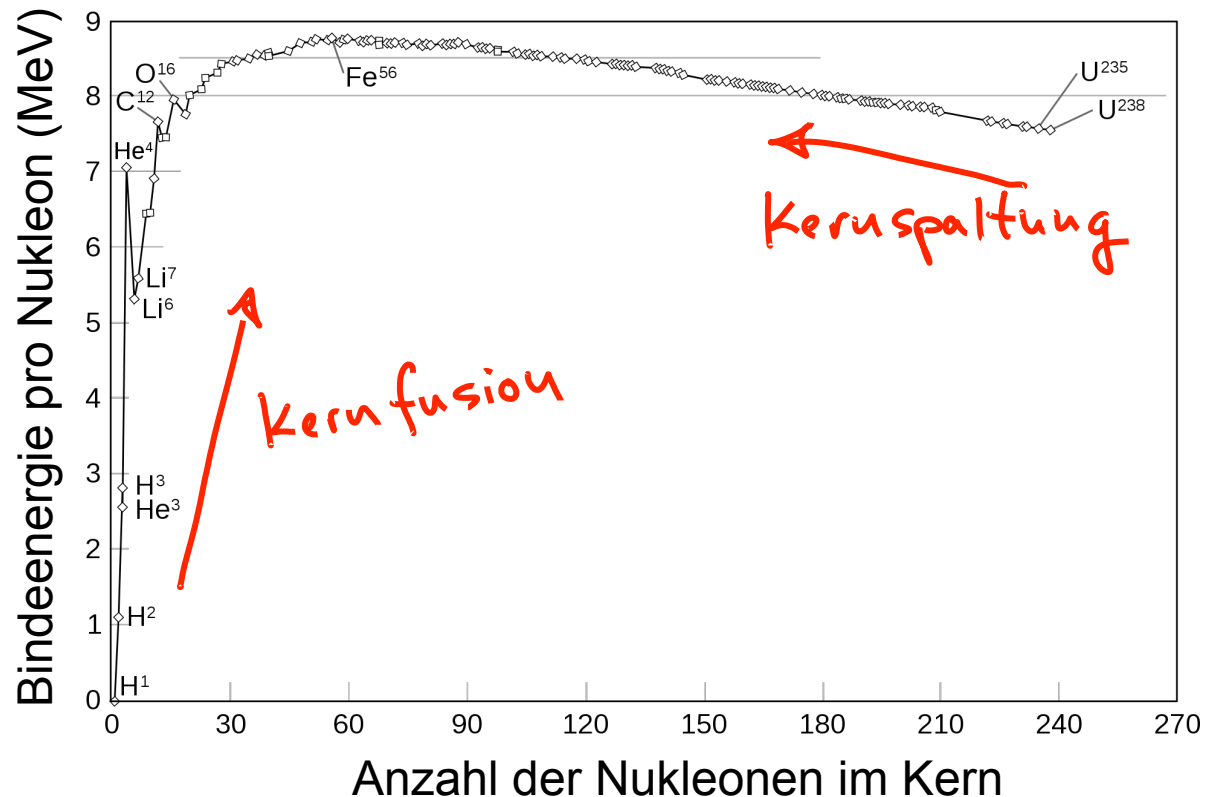


Relativistische Masse:

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

# Massendefekt und Kernbindungsenergie

Atomkerne haben eine geringere Masse als die Summe der Massen ihrer Bestandteile („Massendefekt“). Die Massedifferenz entspricht nach  $E = mc^2$  einer Energie, der Bindungsenergie.



# Kernspaltung

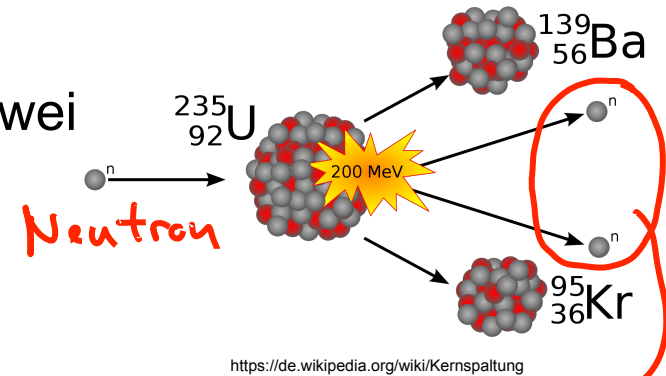
**Kernspaltung:** Spaltung eines Atomkerns in zwei oder mehr Teile unter Energiefreisetzung.



[https://en.wikipedia.org/wiki/Trinity\\_\(nuclear\\_test\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_(nuclear_test))



<https://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk>



„Trinity“ Test der  
1. Atombombe,  
16 ms nach Zündung  
(16. Juli 1945)

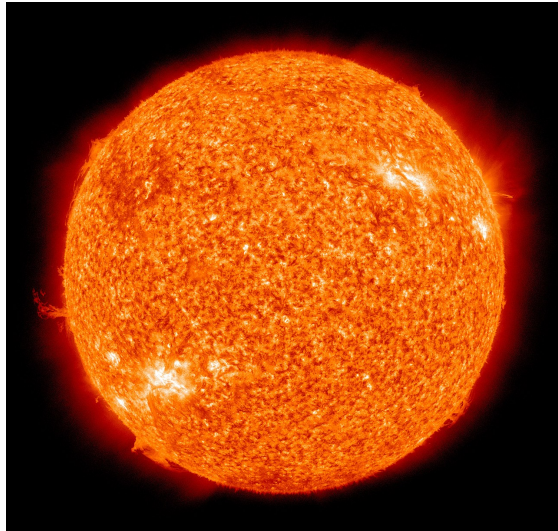
$\approx 22 \text{ kt TNT}$

Kettenreaktion

Atomkraftwerk  
(Grafenrheinfeld)

# Kernfusion

**Kernfusion:** Verschmelzen von zwei Kernen zu einem neuen, größeren Kern.



<https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

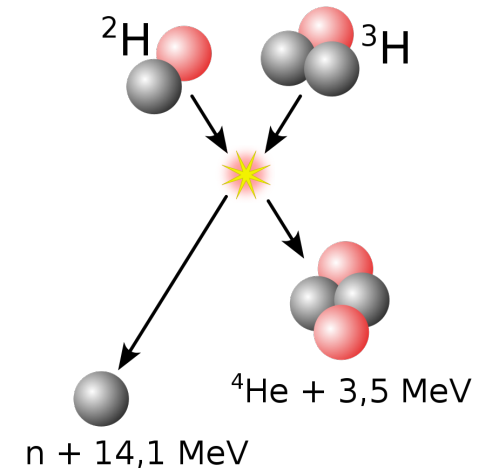
Falschfarben-Bild  
der Sonne im UV





[https://en.wikipedia.org/wiki/Ivy\\_Mike](https://en.wikipedia.org/wiki/Ivy_Mike)

„Ivy Mike“ Test der  
1. Wasserstoffbombe  
(1. November 1952)

$\approx 10,4 \text{ Mt TNT}$



<https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion>

Proton   
Neutron 

# Zusammenfassung: Einsteins Postulate und Lorentz-Transformation

## Einsteins Postulate:

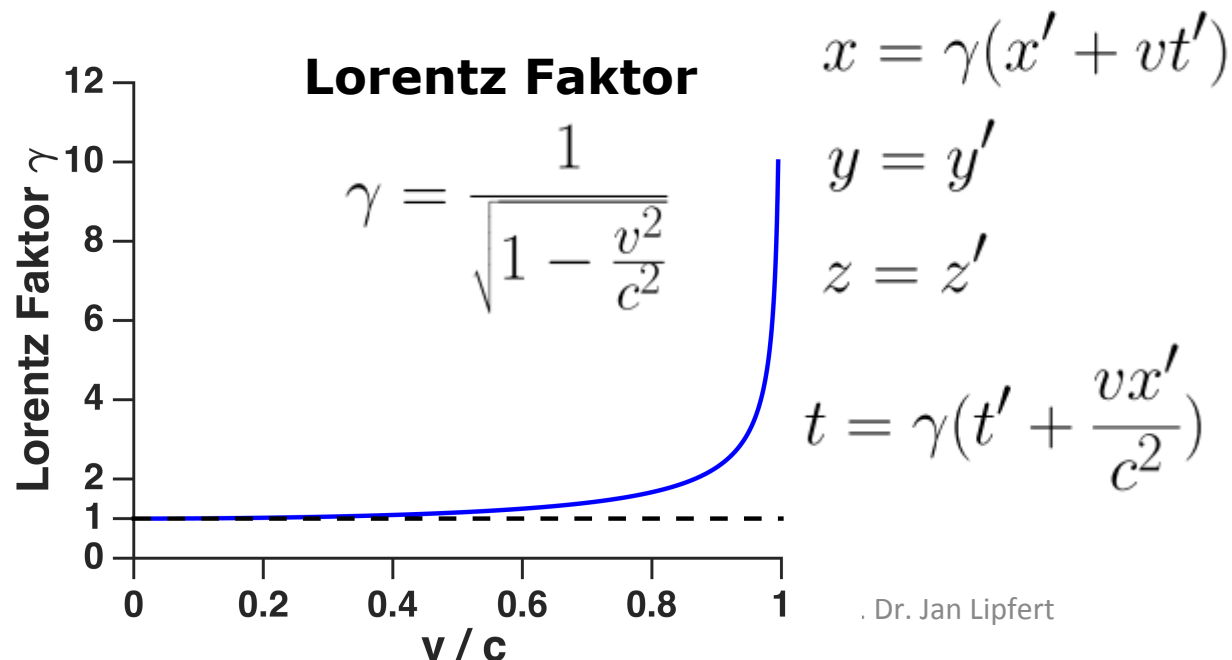
1. Die Naturgesetze sind invariant, d.h. die sind in allen Inertialsystemen gleich.
2. Jeder Beobachter misst für die Lichtgeschwindigkeit  $c$  im Vakuum denselben Wert.



[http://adfc-blog.de/2014/01/tempo-30/beginn\\_der\\_zone\\_30/](http://adfc-blog.de/2014/01/tempo-30/beginn_der_zone_30/)

## Lorentz-Transformation

( $S$  und  $S'$  bewegend sich relativ entlang  $x$ )



# Zusammenfassung: Effekte der Speziellen Relativitätstheorie

- **Längenkontraktion**

$L_0$  *Eigenlänge (= Länge eines Objektes, in dem es in Ruhe ist)*

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

- **Zeitdilatation**

$\Delta t_0$  *Eigenzeit (= Zeit im Inertialsystem, in dem die „Uhr in Ruhe ist“)*

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

- **Relativistischer Impuls:**  $p = \gamma m_0 v$

- **Relativistische Masse**  $m = \gamma m_0$   
**und Energie:**

$$E_{\text{ges}} = \gamma m_0 c^2$$