

# Einstein Basics

## Die Spezielle Relativitätstheorie

46 02324

### Glossar

#### A

absolut  
absoluter Raum  
absolute Zeit  
Allgemeine Relativitätstheorie  
Anti-Elektron  
Antimaterie  
Anti-Proton  
Antiteilchen  
Äquivalenzprinzip  
Äquivalenz von Energie und Masse  
Atom  
Atomhülle  
Atomkern

#### B

Beobachter  
Bezugssystem

#### C

chemische Reaktion

#### D

Deuterium

#### E

Einstein-Kreuz  
Einstein-Ring  
elektromagnetische Welle  
Elektron  
Elementarteilchen  
Elementarteilchenreaktion  
Energie  
Energieerhaltung  
Ereignis  
Ereignishorizont  
euklidische Geometrie

#### F

Fernwirkung  
flacher Raum  
flache Raumzeit  
Foucaultsches Pendel  
Frequenz

#### G

Galaxie  
Galaxienhaufen (Cluster)  
Gegenwart  
Geodäte  
Geometrie  
Geometrie der Raumzeit  
Gerade  
Geschwindigkeit  
gleichzeitig  
Global Positioning System (GPS)  
Gravitationsfeld  
Gravitationskollaps  
Gravitationskonstante  
Gravitationskraft  
Gravitationslinse  
Gravitationstrichter  
Gravitationswelle

#### H

Hawking-Strahlung  
Helium  
Horizont  
Hubble Space Telescope

#### I

Impuls  
Inertialsystem

#### J

Joule

**K**

Kausalstruktur der Raumzeit  
Kernfission  
Kernfusion  
Kernkraft  
Kernladungszahl  
Kernreaktion  
Kernspaltung  
Kernverschmelzung  
Kilogramm  
Krümmung

**L**

Längenkontraktion  
Licht  
Lichtablenkung  
Lichtgeschwindigkeit  
Lichtkegel  
Lichtquant  
Licht-Teilchen  
Lorentzkontraktion

**M**

Masse  
masselos  
Massendefekt  
Masse, relativistische  
Maßstäbe, bewegte  
Maßstäbe im Gravitationsfeld  
Merkur

**N**

Naturgesetze  
Neutron  
Neutronenstern  
Newtonsche Gravitationstheorie

**O**

Oberfläche

**P**

Periheldrehung  
Photon  
Plancksche Konstante (Plancksches Wirkungsquantum)  
Positron  
Proton  
Pulsar

**Q**

Quantentheorie  
Quasar

**R**

Raum  
Raumzeit  
Raumzeit-Diagramme  
relativ  
relativistische Energie  
relativistische Masse  
relativistischer Impuls  
Relativitätsprinzip  
Relativitätstheorie  
Rotverschiebung  
Ruheenergie  
Ruhemasse

**S**

Schwarzes Loch  
Schwarzschildradius  
Schwerkraft  
Shapiro-Experiment  
Signalgeschwindigkeit  
Singularität  
Spezielle Relativitätstheorie  
Sonne  
Sonnenfinsternis

**T**

Thirring-Lense-Effekt  
Trägheit  
Trägheitssatz

**U**

Überlichtgeschwindigkeit  
Uhren, bewegte  
Uhren im Gravitationsfeld

**V**

Vakuum-Lichtgeschwindigkeit  
Venus  
Vergangenheit  
virtuelle Teilchen  
Volumen

**W**

Wasserstoff  
Wellenlänge  
Weltlinie

**Z**

Zeit  
Zeitdilatation  
Zukunft  
Zwillingsparadoxon

# A

## absolut

In der Physik bezieht sich dieser Begriff auf Größen oder Strukturen, die vom Beobachter unabhängig oder durch die Naturgesetze fest vorgegeben sind. So dachte Newton an einen **absoluten Raum** und eine **absolute Zeit**.

## absoluter Raum

Newton sah den Raum als absolut vorgegebene, unveränderliche Bühne für das physikalische Geschehen an.

## absolute Zeit

Nach Newton verrinnt die Zeit in absolut gleichförmiger, für alle Beobachter gültiger Weise.

## Allgemeine Relativitätstheorie

Von Albert Einstein im Jahr 1915 vorgestellte Theorie der Gravitation. Ihre Grundaussagen können so zusammengefasst werden: Die Materie verursacht eine **Krümmung** der **Raumzeit**. Diese Krümmung beeinflusst ihrerseits die Bewegung von Objekten. Auf diese Weise wird die **Schwerkraft** auf die **Geometrie der Raumzeit** zurückgeführt.

## Anti-Elektron

auch Positron genannt, ist das **Antiteilchen** des Elektrons.

## Antimaterie

ist eine im Prinzip vorstellbare Form von Materie, in der jedes **Elementarteilchen** durch sein Antiteilchen ersetzt ist. Im Labor kann Antimaterie hergestellt werden, im Universum scheint sie nicht in größeren Mengen vorzukommen.

## Anti-Proton

**Antiteilchen** des Protons

## Antiteilchen

Jedes **Elementarteilchen** besitzt ein Antiteilchen. Teilchen und Antiteilchen unterscheiden sich voneinander durch die Vorzeichen ihrer Ladungen – worunter neben der elektrischen Ladung auch andere Größen, die die Teilchenphysik entdeckt hat (wie z. B. die Baryonenzahl oder die Leptonenzahl) gemeint sind. Lediglich die **Ruhemasse** aller Elementarteilchen ist positiv oder Null. Manche Teilchen (wie z. B. das **Photon**) sind mit ihrem Antiteilchen identisch.

## Äquivalenzprinzip

Dieses Prinzip war für Einstein der Ausgangspunkt zur Entwicklung der **Allgemeinen Relativitätstheorie**. Es besagt, dass sich ein *kleines* physikalisches System, das sich in einem **Gravitationsfeld** befindet, *während kurzer Zeiten* genauso verhält, als wäre es beschleunigt. Für große Systeme und lange Zeiträume gilt dieses Prinzip nicht – in diesem Fall machen sich die Effekte der **Krümmung** der **Raumzeit** bemerkbar, die von der Schwerkraft herrühren, nicht aber von einer Beschleunigung verursacht werden können.

## Äquivalenz von Energie und Masse

Nach der **Speziellen Relativitätstheorie** sind **Energie** und **Masse** nur verschiedene Bezeichnungen für ein und dieselbe Sache (die man, um ein Wort dafür zu haben, als „Menergie“ bezeichnen kann): Einer Masse  $m$  entspricht die Energie  $E = mc^2$ , und umgekehrt entspricht einer Energie  $E$  die Masse  $m = E/c^2$ . Das bedeutet, dass ein System, dem Energie zugeführt wird, dadurch automatisch schwerer wird. In **chemischen Reaktionen** ist dieser Effekt unmessbar klein, aber in **Elementarteilchenreaktionen** kann er beobachtet werden. Er bildet auch die physikalische Grundlage für die **Kernspaltung** und die **Kernfusion**.

## Atom

Das Atom besteht aus Neutronen und Protonen (die den Atomkern bilden) und Elektronen (die die Atomhülle bilden). Die Zahl der Protonen im Kern ist die Kernladungszahl (in einem elektrisch neutralen Atom ist sie gleich der Zahl der Elektronen in der Hülle). Atomkerne mit gleicher Kernladungszahl unterscheiden sich nur durch die Zahl der Neutronen – sie werden Isotope genannt. Siehe auch [Kernfusion](#) und [Kernspaltung](#).

## Atomhülle

[Atom](#)

## Atomkern

[Atom](#)

# B

## Beobachter

Physikalische Aussagen über die Natur betreffen Beobachtungen, beziehen sich daher genau genommen immer auch auf Eigenschaften (wie den Bewegungszustand) des Beobachters. Dabei darf, wie die [Spezielle Relativitätstheorie](#) lehrt, nicht automatisch angenommen werden, dass ein Phänomen wie die Zeitdauer, die während eines Prozesses vergeht, für alle Beobachter die gleiche ist. In der Relativitätstheorie stellt man sich unter einem Beobachter jemanden vor, der seine Messungen mithilfe eines [Bezugssystems](#) ausführt.

## Bezugssystem

Darunter ist ganz allgemein eine Regel verstanden, die es gestattet, Ereignissen Angaben über deren Ort und Zeit zuzuschreiben. Im Rahmen der [Speziellen Relativitätstheorie](#) sind [Inertialsysteme](#) besonders wichtig. Die [Allgemeine Relativitätstheorie](#) muss sogar *alle* möglichen Bezugssysteme berücksichtigen.

# C

## chemische Reaktion

In chemischen Reaktionen verändern sich die Bindungen zwischen [Atomen](#). An ihnen ist lediglich die Elektronenhülle beteiligt. Atomkerne bleiben von ihnen unberührt. Die bei chemischen Reaktionen umgesetzten [Energien](#) sind im Vergleich zu jenen, die bei [Elementarteilchenreaktionen](#) auftreten, klein. Daher sind die bei ihnen auftretenden Massenveränderungen (siehe [Äquivalenz von Energie und Masse](#) und [Massendefekt](#)) unmessbar klein.

# D

## Deuterium

oder schwerer Wasserstoff, ist ein [Atom](#), dessen Kern aus einem Proton und einem Neutron besteht, die durch die Kernkraft zusammengehalten werden. Seine Masse ist etwas *kleiner* als die Summe der Massen seiner Bestandteile. Das ist ein Beispiel für den [Massendefekt](#) und eine Bestätigung für die [Äquivalenz von Energie und Masse](#).

# E

## Einstein-Kreuz

Durch eine [Gravitationslinse](#) verursachtes kreuzförmiges Abbild eines dahinter liegenden Objekts (i. Allg. einer Galaxie).

## Einstein-Ring

Durch eine [Gravitationslinse](#) verursachtes ringförmiges Abbild eines dahinter liegenden Objekts (i. Allg. einer Galaxie).

## elektromagnetische Welle

Das elektromagnetische Feld, das für die elektrischen und magnetischen Phänomene verantwortlich ist, kann sich im Raum als Welle fortpflanzen. Das sichtbare [Licht](#) ist nur ein kleiner Teil im Spektrum der elektromagnetischen Wellen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum ist die [Lichtgeschwindigkeit](#). Sie ist für alle [Frequenzen](#) und [Wellenlängen](#) sowie für alle [Beobachter](#) gleich.

## Elektron

[Elementarteilchen](#)

## Elementarteilchen

Für die moderne Physik sind sie die Bausteine der Materie und die Vermittler von Kräften. Die „gewöhnliche“ Materie, aus der wir bestehen, setzt sich vor allem aus Protonen, Neutronen und Elektronen zusammen (siehe [Atom](#)). Weitere Elementarteilchen sind das [Photon](#) (das Lichtteilchen oder Lichtquant), die Neutrinos, die Quarks und die Müonen. Jedes Elementarteilchen besitzt ein [Antiteilchen](#).

## Elementarteilchenreaktion

Elementarteilchen können untereinander die verschiedensten Reaktionen eingehen. Ein typischer Prozess besteht in der Verschmelzung mehrerer Elementarteilchen, gefolgt von einem Zerfall, in dem neue Teilchen auftreten können. Bei Reaktionen dieser Art werden [Energie](#) und [Masse](#) ineinander umgewandelt. In Teilchenbeschleuniger-Anlagen wird dies benutzt, um die Struktur der Materie und die [Naturgesetze](#) zu untersuchen. Durch Experimente dieser Art werden die Voraussagen der [Speziellen Relativitätstheorie](#) und insbesondere das Gesetz von der [Äquivalenz von Energie und Masse](#) tagtäglich aufs Neue bestätigt. Siehe auch [Kernreaktionen](#).

## Energie

tritt in verschiedenen Formen (z. B. als Bewegungsenergie, Bindungsenergie oder Wärmeenergie) auf, die alle ineinander umgewandelt werden können. Die Summe aller Energieformen eines abgeschlossenen Systems ist konstant (Energieerhaltung). In der [Speziellen Relativitätstheorie](#) tritt die [Ruheenergie](#)  $mc^2$  eines Körpers der Masse  $m$  hinzu. (Siehe auch [Äquivalenz von Masse und Energie](#)).

## Energieerhaltung

[Energie](#)

## Ereignis

Unter einem Ereignis versteht man ein elementares „Hier und Jetzt“. Um ein Ereignis festzulegen, sind vier Zahlen nötig (eine Zeit- und drei Ortskoordinaten). Die Menge aller Ereignisse bildet die [Raumzeit](#).

### Ereignishorizont

Ist ein Objekt einmal in das Innere eines [Schwarzen Lochs](#) gefallen, so kann es nicht wieder herausgelangen. Die Grenze zwischen jenem Teil der [Raumzeit](#), in dem ein Entkommen möglich ist und dem Innenbereich ist der Ereignishorizont.

### euklidische Geometrie

Jene [Geometrie](#), die wir in der Schule lernen (mit Aussagen wie „die Winkelsumme im Dreieck ist  $180^\circ$ “ oder „der Umfang eines Kreises ist  $2\pi r$ “). Die [Allgemeine Relativitätstheorie](#) hat uns gezeigt, dass die euklidische Geometrie im *physikalischen* Raum in der Nähe schwerer Massen nicht gilt. Wir sollten ihn daher von *mathematischen* Räumen, in denen wir die Gültigkeit der euklidischen Geometrie *annehmen* können, unterscheiden.

## F

### Fernwirkung

Newton interpretierte die [Schwerkraft](#) als eine Fernwirkung zwischen Körpern. Vom Standpunkt der Relativitätstheorie ist damit das Problem verbunden, dass derartige Fernwirkungen zur instantanen („unendlich schnellen“) Übertragung von Signalen benutzt werden können.

### flacher Raum

ist ein Raum ohne [Krümmung](#).

### flache Raumzeit

ist eine Raumzeit ohne [Krümmung](#). Nach der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) ist die Raumzeit nur dann flach (und damit durch die [Spezielle Relativitätstheorie](#) beschreibbar), wenn kein Gravitationsfeld vorhanden ist.

### Foucaultsches Pendel

Ein am Nordpol der Erde aufgehängtes Pendel sollte nach der Newtonschen Physik eine relativ zum Rest des Universums nicht rotierende Schwingungsebene aufweisen. Die [Allgemeine Relativitätstheorie](#) hingegen sagt eine (sehr langsame) Rotation der Schwingungsebene voraus ([Thirring-Lense-Effekt](#)).

### Frequenz

Licht einer einheitlichen Farbe besitzt – da es eine [elektromagnetische Welle](#) ist – eine Frequenz (die wir als „Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit“ interpretieren können). Einem [Photon](#) aus einem solchen Lichtstrahl wird ebenfalls diese Frequenz zugeschrieben (obwohl wir uns *nicht* vorstellen sollten, dass ein einzelnes Teilchen „Schwingungen ausführt“).

## G

### Galaxie

Ansammlung vieler durch die Schwerkraft lose aneinander gebundener Sterne. Beispiel: unsere Milchstraße.

### Galaxienhaufen (Cluster)

Ansammlung vieler Galaxien, die durch die Schwerkraft (lose) zusammengehalten wird. Galaxienhaufen wirken manchmal wie [Gravitationslinsen](#).

### Gegenwart

[Kausalstruktur der Raumzeit](#)

### Geodäte

Eine Geodäte ist (im Rahmen einer gegebenen **Geometrie**) die kürzeste (manchmal auch die längste) Verbindung zweier Punkte, d. h. die Verallgemeinerung der Geraden. Da auch die Raumzeit eine Geometrie besitzt, gibt es auch in ihr Geodäten. Nach der **Allgemeinen Relativitätstheorie** sind die Geodäten der Raumzeit die **Weltlinien** kräftefrei bewegter Teilchen.

### Geometrie

Die Geometrie eines Raumes ist die Gesamtheit der in ihm existierenden Längenbeziehungen. Der Begriff der Geometrie setzt daher eine Festlegung, was Längen sind, voraus. Zum besseren Verständnis lassen sich gedanklich „Räume“ konstruieren, in denen ein von unserer intuitiven Vorstellung (**euklidische Geometrie**) abweichender Längenbegriff verwendet wird.

### Geometrie der Raumzeit

Die Geometrie der **Raumzeit** ist die Gesamtheit der in ihr existierenden Beziehungen zwischen Längen und Zeiten. Nach der **Allgemeinen Relativitätstheorie** bewirkt Materie eine **Krümmung** der Raumzeit.

### Gerade

Eine Gerade ist (im Rahmen einer gegebenen **Geometrie**) die kürzeste Verbindung zweier Punkte. Sie wird besser **Geodäte** genannt.

### Geschwindigkeit

Geschwindigkeit ist auch in der **Speziellen Relativitätstheorie** der Quotient „zurückgelegter Weg dividiert durch die dazu benötigte Zeit“. Allerdings muss dazugesagt werden, auf welches **Inertialsystem** sich die Messung von Weg und Zeit bezieht.

### gleichzeitig

ist nach der Speziellen Relativitätstheorie ein **relativer** Begriff. Zwei **Ereignisse**, die für einen Beobachter gleichzeitig stattfinden, finden für einen relativ dazu bewegten Beobachter *nicht* gleichzeitig statt.

### Global Positioning System (GPS)

das globale Satelliten-Ortungs-System beruht auf der Messung der Entfernungen des eigenen Standorts zu mehreren Satelliten, deren Positionen ausreichend genau bekannt sind. Da die Zeit in den Satelliten schneller vergeht als auf der Erde (**Zeitdilatation** und **Uhren im Gravitationsfeld**), sind relativistische Korrekturen nötig, um das Funktionieren des Systems zu garantieren.

### Gravitationsfeld

Für Newton war die **Schwerkraft** eine **Fernwirkung** zwischen Körpern. Mathematisch wurde sie durch ein Feld (das Gravitationsfeld) beschrieben, das von einem Körper „ausgeht“ und auf einen anderen Körper „wirkt“. In der **Allgemeinen Relativitätstheorie** wird die Schwerkraft als Auswirkung der **Krümmung** der **Raumzeit** auf die Bewegung von Objekten verstanden. Das Gravitationsfeld wird somit zu einer Eigenschaft der **Geometrie der Raumzeit**.

### Gravitationskollaps

Der Gravitationskollaps eines Sterns kann einsetzen, wenn er seinen „Brennstoff“ verbraucht hat und führt im Extremfall zur Bildung eines **Schwarzen Lochs**.

### Gravitationskonstante

Konstante, die die Stärke der **Schwerkraft** beschreibt. Sie geht sowohl in die Newtonsche Gravitationstheorie als auch in die **Allgemeine Relativitätstheorie** ein.

### Gravitationskraft Schwerkraft

### Gravitationslinse

Massives Objekt (meistens ein [Galaxienhaufen](#)), das Lichtstrahlen so stark ablenkt ([Lichtablenkung](#)), dass wir mehrfache Abbildungen von dahinter liegenden Galaxien beobachten.

### Gravitationstrichter

Anschauliches Modell für die [Krümmung](#) des Raumes in der Nähe einer Masse.

### Gravitationswelle

In Analogie zum Phänomen der [elektromagnetischen Wellen](#) sagt die [Allgemeine Relativitätstheorie](#) die Existenz von Gravitationswellen, d. h. wellenförmiger Ausbreitung von Störungen der [Geometrie der Raumzeit](#), voraus. Bislang wurden noch keine Gravitationswellen nachgewiesen, aber zahlreiche Experimente sind in Vorbereitung und lassen auf baldige Beobachtungen hoffen.

## H

### Hawking-Strahlung

Strahlung, die ein [Schwarzes Loch](#) nach den Berechnungen der [Quantentheorie](#) abgibt. Wenn es sie tatsächlich gibt, so führt sie dazu, dass ein Schwarzes Loch „verdampft“.

### Helium

wird in der [Sonne](#) aus [Wasserstoff](#) produziert.

### Horizont

[Ereignishorizont](#)

### Hubble Space Telescope

Das Hubble Space Telescope sendet wunderbare Bilder vom Kosmos zur Erde, so auch Aufnahmen von [Gravitationslinsen](#).

## I

### Impuls

Der Impuls ist in der nichtrelativistischen Physik das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Er ist jene Größe, an der die Wirkung einer Kraft ansetzt (Kraft = zeitliche Änderungsrate des Impulses). In der [Speziellen Relativitätstheorie](#) wird er durch [relativistischen Impuls](#) ersetzt.

### Inertialsystem

[Bezugssystem](#), in dem der [Trägheitssatz](#) gilt. Die [Spezielle Relativitätstheorie](#) untersucht, wie sich physikalische Phänomene darstellen, wenn sie in verschiedenen Inertialsystemen (d. h. von [Beobachtern](#), die sich auf unterschiedliche Inertialsysteme stützen) vermessen werden.

## J

### Joule

Einheit der Energie. Aufgrund der [Äquivalenz von Energie und Masse](#) kann sie auch dazu benutzt werden, Massen auszudrücken.



# K

## Kausalstruktur der Raumzeit

Der [Lichtkegel](#) eines Ereignisses trennt die Raumzeit in Bezug auf dieses Ereignis in drei Bereiche: die Vergangenheit, die Gegenwart und die Zukunft. Die Vergangenheit und die Zukunft sind jene Bereiche, die das Ereignis mittels Signale, die die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten dürfen, beeinflussen können bzw. von ihm beeinflusst werden können. Die Gegenwart ist der von diesem Ereignis kausal getrennte Bereich.

## Kernfission Kernspaltung

## Kernfusion

oder Kernverschmelzung ist, grob gesagt, eine [Kernreaktion](#), bei der zwei leichte Atomkerne zu einem schwereren Kern verschmelzen. Aufgrund des dabei auftretenden [Massendefekts](#) entsteht Energie (Fusionskraftwerk, Wasserstoffbombe).

## Kernkraft

Kraft, die die Bausteine des Atomkerns zusammenhält ([Atom](#)).

## Kernladungszahl Atom

## Kernreaktion

Spezialfälle von [Elementarteilchenreaktionen](#) sind Umwandlungen, die in oder zwischen Atomkernen stattfinden ([Atom](#)). Beispiele sind die [Kernspaltung](#) und die [Kernfusion](#), die zur Gewinnung von Energie aus Masse eingesetzt werden. Das dahinter liegende physikalische Prinzip ist die [Äquivalenz von Energie und Masse](#).

## Kernspaltung

oder Kernfission ist, grob gesagt, eine [Kernreaktion](#), bei der ein schwerer Atomkern in zwei mittelschwere Kerne zerfällt. Aufgrund des dabei auftretenden [Massendefekts](#) entsteht Energie (Kernkraftwerk, Atombombe).

## Kernverschmelzung Kernfusion

## Kilogramm

Einheit der Masse. Aufgrund der [Äquivalenz von Energie und Masse](#) kann es auch dazu benutzt werden, Energien auszudrücken.

## Krümmung

liegt immer dann vor, wenn die Gesetze der [euklidischen Geometrie](#), die wir in der Schule lernen (z. B. „die Winkelsumme im Dreieck ist  $180^\circ$ “ oder „der Umfang eines Kreises ist  $2\pi r$ “) nicht gelten. Eine Krümmung der [Raumzeit](#) liegt vor, wenn die Gesetzmäßigkeiten der [Speziellen Relativitätstheorie](#) (z. B. die Existenz von Inertialsystemen) nicht gelten.

# L

## Längenkontraktion

oder Lorentzkontraktion. Nach der [Speziellen Relativitätstheorie](#) ist ein Maßstab für einen relativ zu ihm bewegten Beobachter *kürzer* als er für einen Beobachter in seinem Ruhesystem ist.

## Licht

ist eine [elektromagnetische Welle](#). Heute wissen wir, dass das Licht aus Teilchen, den [Photonen](#), besteht.

## Lichtablenkung

Lichtstrahlen werden nach der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) durch Massen abgelenkt. Dieser Effekt konnte im Jahr 1919 während einer totalen [Sonnenfinsternis](#) nachgewiesen werden. Eine extreme Form der Lichtablenkung bilden die [Gravitationslinsen](#).

## Lichtgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des Lichts (genauer: die Ausbreitungsgeschwindigkeit [elektromagnetischer Wellen](#) im Vakuum) hat nach der [Speziellen Relativitätstheorie](#) für alle Beobachter, unabhängig von deren Bewegungszustand, den gleichen Wert. Sie ist eine „Invariante“ und gleichzeitig die maximale von der Relativitätstheorie erlaubte [Signalgeschwindigkeit](#).

## Lichtkegel

Der Lichtkegel eines Ereignisses ist die Gesamtheit aller Weltlinien von [Photonen](#), die in ihm beginnen oder enden. Eine [Weltlinie](#) in einem [Raumzeit-Diagramm](#) stellt nur dann eine erlaubte Bewegung dar, wenn sie immer innerhalb des momentanen Lichtkegels (Unterlichtgeschwindigkeit) oder tangential zum momentanen Lichtkegel (Lichtgeschwindigkeit) verläuft. Weiterhin definiert der Lichtkegel eines Ereignisses eine auf dieses Ereignis bezogene [Kausalstruktur](#).

## Lichtquant

[Photon](#)

## Licht-Teilchen

[Photon](#)

## Lorentzkontraktion

[Längenkontraktion](#)

# M

## Masse

Die Masse ist ein Ausdruck der [Trägheit](#), d. h. der Kraft, die nötig ist, um einem Körper eine gegebene Beschleunigung zu erteilen. In der nichtrelativistischen Physik ist die Summe aller Massen konstant. In der [Speziellen Relativitätstheorie](#) gilt dies aufgrund der [Äquivalenz von Energie und Masse](#) nicht mehr. Gleichzeitig ist die Masse ein Maß für die Stärke der Schwerkraft, die ein Körper auf einen anderen ausübt (träge Masse = schwere Masse).

## masselos

Als masselos wird ein Teilchen bezeichnet, dessen [Ruhemasse](#) 0 ist. (Beispiel: das [Photon](#)).

## Massendefekt

Die Masse eines Systems aus mehreren aneinander gebundenen Körpern ist kleiner als die Summe der Massen der ungebundenen Bestandteile. Die Differenz rührt von der Bindungsenergie her ([Äquivalenz von Energie und Masse](#)) und heißt Massendefekt. (Siehe auch [Deuterium](#)).

## Masse, relativistische relativistische Masse

## Maßstäbe, bewegte Längenkontraktion

### Maßstäbe im Gravitationsfeld

Maßstäbe in der Nähe eines massiven Objekts verhalten sich so, als ob sie zu kurz wären. (Mit anderen Worten: Das Volumen eines massiven Objekts ist größer als dies aufgrund seiner [Oberfläche](#) zu erwarten wäre.) Dieser Effekt ist eine Folge der [Krümmung](#) des Raumes in der Nähe schwerer Massen.

## Merkur Periheldrehung

# N

### Naturgesetze

müssen nach der [Speziellen Relativitätstheorie](#) so formuliert werden, dass sie bezüglich aller [Inertialsysteme](#) die gleiche Form annehmen. Nach der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) müssen sie sogar für *alle* Bezugssysteme in gleicher Weise gelten.

## Neutron Elementarteilchen

### Neutronenstern

Sehr dichter Stern, der vorwiegend aus Neutronen besteht. Ein solcher Stern entsteht, wenn der durch seine eigene Schwerkraft hervorgerufene Druck Protonen und Elektronen „ineinander quetscht“ und in Neutronen verwandelt. Siehe auch [Pulsar](#).

## Newtonsche Gravitationstheorie Gravitationsfeld

# O

### Oberfläche

Aus der Oberfläche einer Kugel können wir normalerweise auf ihr Volumen schließen. In einem gekrümmten Raum ([Krümmung](#)) ist das aber nicht immer der Fall! Hier kann das Volumen größer oder kleiner sein als aufgrund der Oberfläche erwartet.

# P

### Periheldrehung

Der sonnennächste Punkt (das Perihel) einer Planetenbahn wandert langsam um die Sonne, sodass die Bahn keine geschlossene Ellipse ist, sondern einer Rosette gleicht. Dafür ist in erster Linie die Schwerkraft der anderen Planeten verantwortlich. Allerdings ist damit nur ein Teil des Effekts erklärbar. Erst die [Allgemeine Relativitätstheorie](#) sagte korrekte Werte für diesen Effekt voraus. Er wurde zuerst für den Planeten Merkur berechnet.

## Photon

Wie wir heute wissen, besteht das Licht aus (**masselosen**) Teilchen – den Photonen, auch Lichtquanten genannt. *Gleichzeitig* ist das Licht ein Wellenphänomen, dem eine **Frequenz** (oder ein Frequenzspektrum) und eine **Wellenlänge** zugeschrieben werden kann. Wenn in der Relativitätstheorie von einem Photon die Rede ist, wird darunter meistens der (idealisierte) Fall eines Punktteilchens verstanden, das sich geradlinig mit **Lichtgeschwindigkeit** bewegt. Die **Weltlinien** aller Photonen, die von einem Ereignis ausgehen, bilden den **Lichtkegel**.

## Plancksche Konstante (Plancksches Wirkungsquantum)

Die von Albert Einstein im Jahr 1905 formulierte Photonenhypothese besagt, dass zwischen der **Energie**  $E$  und der **Frequenz**  $f$  eines **Photons** der Zusammenhang  $E = hf$  besteht. Dabei ist  $h$  jene Konstante, auf die Max Planck in einem ähnlichen Zusammenhang bereits im Jahr 1900 gestoßen war.

## Positron

Anderer Name für das Anti-Elektron, das **Antiteilchen** des Elektrons.

## Proton

**Elementarteilchen**

## Pulsar

Schnell rotierender **Neutronenstern**, der in einem engen (mitrotierenden) Winkelbereich **elektromagnetische Wellen** aussendet, die wir als regelmäßige Impulse beobachten. Die genaue Beobachtung eines Systems aus zwei einander umkreisenden Pulsaren lieferte die ersten indirekten Hinweise auf die Existenz von **Gravitationswellen** (Taylor und Hulse: Nobelpreis 1993).

# Q

## Quantentheorie

Zweig der modernen Physik, der uns lehrt, dass physikalische Größen „unscharfe“ Eigenschaften haben können, und dass auch der leere Raum nicht wirklich leer, sondern von „virtuellen Prozessen“ angefüllt ist. Albert Einstein hatte durch die These, dass das Licht aus Teilchen (den **Photonen** oder Lichtquanten) besteht, Anteil an der Entstehung dieses Gebiets.

## Quasar

Sehr helles, sehr weit entferntes Objekt. Nach unserem heutigen Wissen handelt es sich um sehr lange zurückliegende Prozesse, in denen galaktische Schwarze Löcher entstanden.

# R

## Raum

wird in der **Speziellen Relativitätstheorie** nur als ein Aspekt der **Raumzeit** angesehen.

## Raumzeit

oder Raum-Zeit-Kontinuum tritt in der Relativitätstheorie an die Stelle der beiden getrennten Begriffe Raum und Zeit. Die Raumzeit ist vierdimensional (daher schwer vorzustellen) und besteht aus **Ereignissen**. In der **Speziellen Relativitätstheorie** ist sie die „Bühne“ für das physikalische Geschehen. In der **Allgemeinen Relativitätstheorie** wird sie selbst zur Variablen: Die **Geometrie der Raumzeit** wird von Massen beeinflusst.

### Raumzeit-Diagramme

Als Raumzeit-Diagramme bezeichnet man (auf zwei oder drei Dimensionen reduzierte) anschauliche Darstellungen der **Raumzeit**.

### relativ

ist das physikalische Gegenstück zu **absolut**. So kann die **Geschwindigkeit** eines Körpers nur *relativ* zu einem Bezugssystem oder zu anderen Körpern angegeben werden.

### relativistische Energie

In der **Speziellen Relativitätstheorie** besteht die Gesamtenergie eines mit Geschwindigkeit  $v$  bewegten Körpers der Masse  $m$  aus drei Anteilen: der Ruheenergie  $mc^2$ , der nichtrelativistischen Bewegungsenergie  $mv^2/2$  und einer relativistischen Korrektur, in die die **Lichtgeschwindigkeit** eingeht. In einer **Elementarteilchenreaktion** ist die Summe der relativistischen Energien der Partner vor und nach der Reaktion gleich. (Erhaltungssatz der relativistischen Energie).

### relativistische Masse

Wird die (relativistische) Masse eines Körpers mithilfe der **Äquivalenz von Energie und Masse** aus seiner Gesamtenergie  $E$  als  $m = E/c^2$  definiert, so gilt: die Masse eines Körpers nimmt mit seiner Geschwindigkeit zu (relativistische Massenzunahme). Das Wort „Masse“ wird allerdings nicht einheitlich verwendet – oft ist damit lediglich die (geschwindigkeitsunabhängige) **Ruhemasse** gemeint.

### relativistischer Impuls

Jene Größe, durch die in der **Speziellen Relativitätstheorie** die bekannte nichtrelativistische Formel  $mv$  ersetzt wird. In einer **Elementarteilchenreaktion** ist die Summe der relativistischen Impulse der Partner vor und nach der Reaktion gleich. (Erhaltungssatz des relativistischen Impulses)

### Relativitätsprinzip

Unter dem Relativitätsprinzip versteht man die Aussage, dass die **Naturgesetze** in allen Inertialsystemen in gleicher Weise gelten müssen, d. h., dass „alle Inertialsysteme gleichberechtigt“ sind. Zusammen mit der Konstanz der **Lichtgeschwindigkeit** war es Einsteins Wegweiser zur **Speziellen Relativitätstheorie**.

### Relativitätstheorie

Gemeinsame Bezeichnung für die **Spezielle Relativitätstheorie** und die **Allgemeine Relativitätstheorie**.

### Rotverschiebung

Das von einer vom Beobachter *weg* bewegten Lichtquelle empfangene Licht ist röter (d. h. es hat eine kleinere **Frequenz** bzw. eine größere **Wellenlänge**) als es ausgesandt wurde. Umgekehrt bewirkt eine auf den Beobachter *zu* bewegte Quelle eine Blauverschiebung.

### Ruheenergie

Jene Energie, die ein Körper im Ruhezustand besitzt. Ist  $m$  seine **Ruhemasse**, so ist seine Ruheenergie durch die berühmte Formel  $E = mc^2$  gegeben.

### Ruhemasse

Jene Masse, die ein Körper im Ruhezustand besitzt. Die Ruhemasse des **Photons** ist 0. (Das Photon wird daher auch als masseloses Teilchen bezeichnet). Oft wird die Ruhemasse einfach als „Masse“ bezeichnet. (Siehe auch **relativistische Masse**).

# S

## Schwarzes Loch

Jener Teil der [Raumzeit](#), der nach der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) nach einem [Gravitationskollaps](#) entsteht und aus dem kein Körper wieder in die Außenwelt gelangen kann. Es ist von letzterer durch einen [Ereignishorizont](#) getrennt.

## Schwarzschildradius

Jene Länge, die der Radius eines kollabierenden Objekts erreichen muss, um unabwendbar zu einem [Schwarzen Loch](#) zu werden. Der Schwarzschildradius hängt nur von der Masse des Objekts ab. Für die Erde beträgt er 9 Millimeter, für die Sonne etwa 3 Kilometer.

## Schwerkraft

Unter diesem Begriff wird die Massenanziehung verstanden. Newton verstand sie als Wirkung eines [Gravitationsfeldes](#). In Einsteins [Allgemeiner Relativitätstheorie](#) wird sie auf die [Geometrie der Raumzeit](#) zurückgeführt.

## Shapiro-Experiment

Stehen Erde und Venus von der Sonne aus betrachtet in entgegengesetzten Richtungen, so ist aufgrund der durch die Sonne verursachten [Krümmung](#) des Raumes ihre Entfernung um 36 Kilometer länger als sie es ohne die Existenz der Sonne wäre ([Maßstäbe im Gravitationsfeld](#)). Dieser Effekt konnte durch eine genaue Messung der Lichtlaufzeiten experimentell bestätigt werden.

## Signalgeschwindigkeit

Nach der [Speziellen Relativitätstheorie](#) kann sich kein Signal schneller als mit [Lichtgeschwindigkeit](#) (genauer: Vakuum-Lichtgeschwindigkeit) ausbreiten.

## Singularität

Eine Grenze der [Raumzeit](#), an der physikalische Größen divergieren (d. h. unbeschränkt anwachsen). So verbirgt sich beispielsweise nach der Theorie in einem [Schwarzen Loch](#) eine Singularität. Ob Singularitäten tatsächlich existieren oder durch die [Quantentheorie](#) zum Verschwinden gebracht werden, ist noch unklar.

## Spezielle Relativitätstheorie

Von Albert Einstein im Jahr 1905 veröffentlichte Theorie von Raum und Zeit, die auf dem [Relativitätsprinzip](#) und der Konstanz der [Lichtgeschwindigkeit](#) beruht. Sie gilt *nicht* in physikalischen Situationen, in denen [Gravitationsfelder](#) eine wesentliche Rolle spielen. Für letztere ist die [Allgemeine Relativitätstheorie](#) zuständig.

## Sonne

Ohne die Gesetze der [Speziellen Relativitätstheorie](#) würde sie nicht leuchten. In ihr spielen sich vor allem Prozesse der [Kernfusion](#) ab, die Wasserstoff in Helium umwandeln. Aufgrund des [Massendefekts](#) wird dabei Energie frei: Daher ist die Sonne heiß und strahlt.

## Sonnenfinsternis

Während einer totalen Sonnenfinsternis können die Sternpositionen nahe am Sonnenrand beobachtet und auf diese Weise die [Lichtablenkung](#) im Gravitationsfeld bestätigt werden. Die Bestätigung von Einsteins Vorhersage bei einer Sonnenfinsternis im Jahr 1919 galt als erste spektakuläre Bestätigung der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#).

## T

### Thirring-Lense-Effekt

Von der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) vorausgesagte langsame Rotation von lokalen Inertialsystemen (oder der Schwingungsebene eines [Foucault-Pendels](#)) in der Nähe rotierender Massen. Der Effekt wurde erst im Jahr 2004 experimentell bestätigt.

### Trägheit

Bestreben von Körpern, ihren Bewegungszustand beizubehalten. Ein Maß für die Trägheit eines Körpers ist seine [Masse](#).

### Trägheitssatz

Aussage, dass ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, seinen Bewegungszustand beibehält, d. h. (relativ zu einem Bezugssystem) in Ruhe oder gleichförmiger Bewegung verharrt. Der Trägheitssatz gilt *nicht* allgemein, sondern nur in [Inertialsystemen](#).

## U

### Überlichtgeschwindigkeit

von Körpern oder Signalen ist nach der [Speziellen Relativitätstheorie](#) (und nach der experimentellen Erfahrung) nicht möglich.

### Uhren, bewegte

[Zeitdilatation](#)

### Uhren im Gravitationsfeld

Wird eine in der Nähe eines massiven Objekts befindliche Uhr aus großer Entfernung durch Lichtsignale beobachtet, so erscheint ihr Gang zu langsam. Dieser Effekt ist eine Folge der [Krümmung](#) der Raumzeit.

## V

### Vakuum-Lichtgeschwindigkeit

[Lichtgeschwindigkeit](#)

### Venus

[Shapiro-Experiment](#)

### Vergangenheit

[Kausalstruktur der Raumzeit](#)

### virtuelle Teilchen

Teilchen, die (nach der [Quantentheorie](#)) nicht „wirklich“ existieren, aber deren „Möglichkeit“ zur Energie des Raumes beiträgt. Virtuelle Teilchen können zur Erklärung der [Hawking-Strahlung](#) herangezogen werden.

### Volumen

[Oberfläche](#)

## W

### Wasserstoff

wird in der [Sonne](#) zu [Helium](#) verschmolzen.

### Wellenlänge

Licht einer einheitlichen Farbe besitzt – da es eine [elektromagnetische Welle](#) ist – eine Wellenlänge (die wir als „Länge“ einer Schwingung interpretieren können). Einem [Photon](#) aus einem solchen Lichtstrahl wird ebenfalls diese Wellenlänge zugeschrieben (obwohl wir uns *nicht* vorstellen sollten, dass ein einzelnes Teilchen „Schwingungen ausführt“).

### Weltlinie

ist der „grafische Fahrplan“ eines bewegten (als punktförmig angenommenen) Objekts in einem [Raumzeit-Diagramm](#).

## Z

### Zeit

wird in der [Speziellen Relativitätstheorie](#) nur als ein Aspekt der [Raumzeit](#) angesehen.

### Zeitdilatation

Nach der [Speziellen Relativitätstheorie](#) geht eine Uhr für einen relativ zu ihr bewegten Beobachter *langsamer* als für einen Beobachter in ihrem Ruhesystem.

### Zukunft

[Kausalstruktur der Raumzeit](#)

### Zwillingsparadoxon

Ein Zwilling, der eine Reise macht, ist bei seiner Rückkehr jünger geblieben als jener Zwilling, der (in seinem Inertialsystem) zuhause geblieben ist.