

Reflexionen über die Physik von Raum & Zeit

Abstract

Einführend wird die historische Entwicklung der Raum- / Zeitvorstellungen von der Antike zur modernen Physik geschildert. Ausgehend von **Aristoteles'** Annahme eines natürlichen Ruhezustands von Körpern und dem schnelleren Fallen schwererer Objekte wird gezeigt, wie **Galileo Galilei** über Versuche herausgefunden hat, dass alle Dinge gleich schnell fallen und sogar schon das Relativitätsprinzip ergründete. **Isaac Newton** hat daraus die klassischen Bewegungsgesetze und das Gravitationsgesetz entwickelt, hielt aber an der Idee von einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit fest.

Die experimentell bestätigte Konstanz der Lichtgeschwindigkeit durch **Michelson** und **Morley** 1887 führte dann 1905 zur **Speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins**. Seine Theorie zeigt, dass Raum und Zeit relativ zum Bewegungszustand des Beobachters sind und sich zu einer vierdimensionalen Entität, genannt **Raumzeit**, zusammenfügen. Konsequenzen sind **Zeitdilatation** und **Längenkontraktion** und nicht zuletzt die **Äquivalenz von Masse und Energie**. Die beifolgend formulierte **Allgemeine Relativitätstheorie** Einsteins von 1915 definiert die Gravitation nicht mehr als Kraft, sondern als Krümmung von Raum und Zeit durch Masse und Energie. Ausgangspunkt ist das **Äquivalenzprinzip**, nach dem Beschleunigung und Gravitation gleiche physikalische Wirkungen zeigen. So vergeht Zeit in Gravitationsfeldern langsamer, Licht wird abgelenkt und je nach Richtung rot- oder blauverschoben und die Planeten und Kometen bewegen sich auf geradest möglichen Bahnen, den **Geodäten**, in der gekrümmten Raumzeit.

Zentrale Konzepte der Kosmologie und Astrophysik, ausgehend von der **Urknall-Theorie**, werden aufgezeigt. Dabei liegt ein Schwerpunkt in der Frage nach der Geometrie des Universums. Es wird eine fiktive Reise durch das **sichtbare Universum** nacherzählt, beginnend beim Sonnensystem, über die Milchstraße, benachbarte Galaxien, Galaxienhaufen bis an die Grenze des beobachtbaren Kosmos'. Diese Exkursion endet an der „Fläche der letzten Streuung“, jenseits derer elektromagnetische Beobachtungen nicht mehr möglich sind. Auch werden die **Kosmologischen Prinzipien** erörtert. Generell vermittelt dieser Teil der Arbeit ein zusammenhängendes Bild von Ursprung, Struktur und Entwicklung des Universums und auch den methodischen Grundlagen, mit denen die Kosmologie zu ihren Erkenntnissen gelangt.

Schließlich werden die **Bausteine der Materie** betrachtet, vom Anfang ihrer Entstehung beim Urknall, bei dem Raum und Zeit entstanden sind und wie sich aus dem extrem heißen, dichten, hochsymmetrischen und energiereichen Zustand nach und nach Elementarteilchen, Atome und Sterne formten und zuletzt die Welt, so wie sie uns heute erscheint. Im Zentrum dieser Betrachtungen stehen **Atome und Moleküle** und wie sie zusammengehalten werden.

.....
Der Arbeit inklusive ist die Excel-Tabelle **Raum & Zeit (Excel)** mit dem Titel: „**Illustrationen zu diversen physikalischen Themen**“. Mit ihr lassen sich, auch durch Interaktion, diverse Themen intensiver ergründen.
.....

Achtung! Wichtiger Hinweis:

Diese Arbeit ist nicht als wissenschaftlich zitierfähige Quelle gedacht. Inhaltliche Fehler sind möglich.

Inhalt

1) Die Entwicklung der Physik von Aristoteles über Galilei zu Newton	Seite	2 – 9
2) Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT)		
a) Raum und Zeit als veränderliche Größen	Seite	10 – 20
b) Raum und Zeit – Newton versus Einstein	Seite	21 – 24
c) Die Äquivalenz von Masse und Energie	Seite	25 – 30
3) Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART)		
a) Mit Einsteins Äquivalenzprinzip zu einer neuen Theorie der Gravitation	Seite	31 – 36
b) Die Krümmung der Raumzeit	Seite	37 – 38
c) Die nichteuklidische Geometrie	Seite	39 – 44
3) Die Urknall-Theorie – Standard-Modell der Astrophysik		
a) Das Universum ist flach	Seite	45 – 49
b) Reise durch das für uns sichtbare Universum	Seite	50 – 67
c) Reise an den Ursprung von Raum und Zeit	Seite	68 – 74
d) Dunkle Materie	Seite	74 – 78
e) Dunkle Energie	Seite	78 – 80
5) Die Welt des sehr Kleinen – Standard-Modell der Teilchenphysik	Seite	81 – 91
6) Anhang: Elektrodynamik	Seite	92 – 96

Reflexionen über die Physik von Raum & Zeit

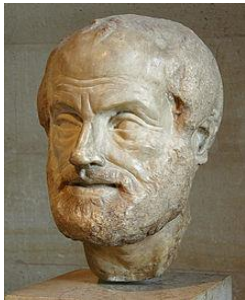
Diese Excel-Datei steht im Kontext mit der Word-Datei **Raum & Zeit (Excel)**:

1) Die Entwicklung der Physik von Aristoteles über Galilei zu Newton

Die Betrachtungen basieren vor allem auf dem Buch "Eine kurze Geschichte der Zeit" von Stephen Hawking.

Bis in die frühe Neuzeit (1450 – 1650) war unter Gelehrten Konsens, dass der natürliche Zustand eines Körpers die Ruhe sei und er sich nur in Bewegung setzt, wenn eine Kraft an ihm angreift. Wird die Kraft weggenommen, dann geht der Körper wieder in den Ruhezustand über und verweilt darin so lange, bis erneut eine Kraft an ihm wirkt. Diese Vorstellung geht zurück auf den griechischen Philosophen Aristoteles (384 – 322 v. Chr.), der dies wohl aus der Beobachtung folgerte dass natürliche, gemeint war „göttliche“ Bewegung ohne Antriebskraft, fürwahr nur am Himmel existiere, wo Sonne, Mond, Planeten und Sterne sich innerhalb von Sphären um die Erde bewegen, die Erde aber, als „Mittelpunkt der Welt“, im Zustand absoluter Ruhe verharre*.

Dieses **Geozentrische Weltbild** Aristoteles´ hatte 500 Jahre später der in Alexandria lebende römische Mathematiker und Astronom Claudius Ptolemäus (100 – 170 n. Chr.) übernommen und in seinem Werk „Syntaxis mathematica“, das heißt „Mathematische Zusammenstellung“, abgebildet. Der arabische Titel des Buches heißt Almagest und gilt als das Standardwerk der antiken Astronomie. Es gelang Ptolemäus die Bewegungen der oberen Planeten Mars, Jupiter, ... und deren vermeintliche Anomalien, die „Rückwärtsbewegungen“, auf Kreisbewegungen zurückzuführen, "... weil nur diese Bewegungen der Natur dem göttlichen Wesen entsprechen, während Regellosigkeit und Ungleichförmigkeit ihnen fremd sind". So nahm er an, dass sich die Mittelpunkte von Kreisen ihrerseits auf Kreisen, den Deferenten (griech. Überkreis), bewegen. Kreise auf Deferenten heißen Epizykel.



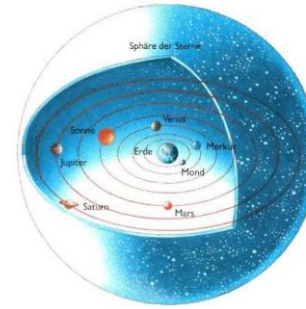
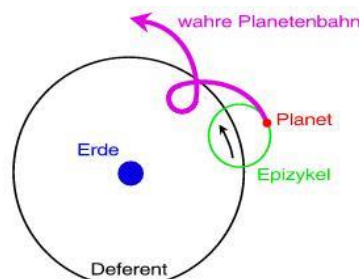
Aristoteles

Büste im Louvre, Paris



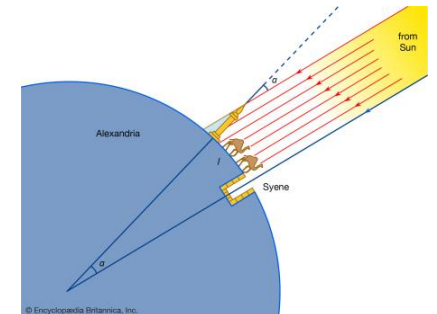
Claudius Ptolemäus

[Grafik: spektrum.de](http://spektrum.de)



Geozentrisches Weltbild

[Grafik: schulz-dresden.de](http://schulz-dresden.de)



Messung der Erde nach Eratosthenes

[Grafik: kritisch-denken.ch](http://kritisch-denken.ch)

„Rückwärtsbewegung“ des Mars´ <https://www.youtube.com/watch?v=BDSQbw8NKzE> 1 min

[Online-Version Stellarium](#)

*) Die Illusion drängt sich auf, wenn man in klarer Nacht den Polarstern (Polaris) anpeilt und beobachtet, wie sich der Fixstern-Himmel um eine virtuelle Achse zu drehen scheint, die nahezu genau auf den Stern weist und so der Eindruck entstehen kann, als sei die Erde **ruhendes Zentrum von allem**: [Klicke Online-Version Stellarium](#).

Aristoteles ging auch davon aus, dass die Erde eine Kugel ist und keine Scheibe. In seiner Schrift „Vom Himmel“ von 340 v. Chr., führt er dafür zwei gute Gründe an:

- Bei einer Mondfinsternis ist der Erdschatten auf dem Mond immer rund, denn wäre die Erde eine Scheibe, dann müsste der Schatten eine längliche, elliptische Form haben, wenn die Erde zwischen Sonne und Mond tritt.
- Von Reisen wussten die Griechen, dass der Polarstern im Süden niedriger am Nachthimmel steht als in nördlicheren Regionen. So erscheint der Stern einem Betrachter vom Äquator aus knapp über dem Horizont und nah am Nordpol sieht er ihn quasi direkt über sich funkeln.

Noch ein Argument für die Kugelgestalt der Erde geht auf die Griechen zurück:

- Von einem Segelschiff, das den Hafen verlässt und in die See sticht, sieht man zuerst den Rumpf entschwinden und nachfolgend den Mast.

Der Grieche Eratosthenes (275 – 194 v. Chr.), Mathematiker und Bibliothekar in Alexandria, hatte vor Ort, am 21. Juni 224 v. Chr. um 12:00 Uhr mittags an einem senkrecht in der Erde steckenden Stab die Schattenlänge der Sonne gemessen. Zudem wusste er, dass die Sonne in Syene (heute Assuan) zu dieser Zeit auch im Zenit stand, aber keine Schatten warf (siehe rechtes Bild Seite 2). Daraus folgerte er, dass die Erde gekrümmt sei und die Form einer Kugel haben müsse. Ferner war die Distanz zwischen Alexandria und Syene bekannt und so errechnete er aus all diesen Konstellationen die Größe der Erde. Die Differenz zum exakten Wert ist kleiner als 1 %, laut Prof. Beutelspacher vom Mathematikum Gießen e.V., siehe Anfang des folgenden Videos:

Die Zahl π , Prof. Beutelsbacher vom Mathematikum Gießen <https://www.youtube.com/watch?v=FJwzsSPkuWQ> 14 min.

Beispiele für einen Ruhezustand:

Ein Objekt, wie Stein, Billardkugel, Taubenfeder, ..., liegt bewegungslos auf dem Erdboden, dem Billardtisch oder sonst wo herum, weil es von der Erde angezogen wird und bewegt sich nur, wenn eine **Kraft (F)** an ihm angreift. So könnte man den Stein mit Muskel-**Kraft** schieben, ziehen, heben und auf die Billardkugel, über einen **Kraft**-Stoß mit dem Queue, den Impuls (p) = Masse (m) · Geschwindigkeit (v) übertragen und sie in Bewegung versetzen. Die Taubenfeder ließe über einen **Kraft**-Stoß mit Luft, z. B. durch Pusten, von der Stelle bewegen. Mit Wegnahme der **Kraft** bzw. nach der Übertragung des Impulses, gehen die Objekte dann wieder in den Ruhezustand über*.

Aus seinen Überlegungen folgerte Aristoteles auch dass ein schwerer Körper schneller fallen müsse als ein leichter, weil er ja, auf Grund seines höheren Gewichtes, stärker von der Erde angezogen wird. Dafür scheint auch die Alltagserfahrung zu sprechen: So fällt doch ein schwerer Dachziegel schneller zu Boden als die leichte Feder einer Taube, die sich auf demselben Ziegeldach niederlässt, dabei den Absturz eines lockeren Ziegels auslöst und gleichzeitig noch eine Feder verliert. Die experimentelle Überprüfung, ob eine solche Aussage überhaupt richtig ist, hielt man im antiken Griechenland für entbehrlich; man war vielmehr der Ansicht, dass alle Gesetze, die die Welt beschreiben, also die **Naturgesetze****, allein durch Nachsinnen aufzuspüren seien.

Erst der italienische Gelehrte Galileo Galilei hat 1604 durch Fallversuche entdeckt, dass alle Körper gleich schnell fallen. Er ließ unterschiedlich schwere Kugeln eine schiefe Rinne runterrollen, maß zu festen Zeitspannen (z. B. **1, 2, 3, 4, ...** Sekunden s), die er mittels Wasseruhr prüfte, ihre Position auf der Schräge (z. B. **1, 4, 9, 16, ...** Meter m) und stellte so fest, dass der zurückgelegte Weg proportional zum Quadrat der verronnenen Zeit war. Die über die Intervalle gemittelte Geschwindigkeit ergibt sich als Differenz zwischen den sukzessiven Quadrat-Zahlen der Position auf der Schräge (**1, 3, 5, 7, ...** m/s).

*) Als Folge von Reibung, wie aber erst lange nach Newton exakt formuliert wurde.

**) Diesen Begriff hat 1644 erstmals der französische Philosoph und Mathematiker Rene Descartes (1596 – 1650) angeführt, in seinem Werk „Principia philosophiae“.

Galilei hat so herausgefunden, dass die Geschwindigkeit der Kugeln gleichmäßig zunahm und zwar **unabhängig** von ihrem Gewicht. Die Zunahme der Geschwindigkeit, das ist die Beschleunigung **a**, beträgt im Beispiel $a = 2 \text{ m/s}^2$. Das ist die Differenz zwischen zwei benachbarten Geschwindigkeits-Werten (siehe Seite 3, letzter Absatz). Die Situation ist wie beim senkrechten Fall, lässt sich aber besser beobachten, weil die Geschwindigkeiten geringer sind.

Und so fällt, anders als nach den Vorstellungen Aristoteles', eine leichte Falkenfeder ebenso schnell zu Boden wie ein schwerer Hammer aus Stahl. Das hat der US-Astronaut David Scott, bei der Apollo-15-Mission im Juli 1971, in einem Experiment auf dem Mond eindrucksvoll vorgeführt. Er hielt mit den Händen die beiden Dinge auf gleiche Höhe und ließ sie gleichzeitig los. Befund: Feder und Hammer schlugen gleichzeitig auf dem Mondboden auf. Der Grund: Der Mond hat keine Atmosphäre, die das freie Fallen von Objekten behindern könnte, während auf der Erde die Atmosphären-Luft ihre Wirkung entfaltet, z. B. beim Zitronen-Falter, Fallschirm, Fallbeil,* → Siehe auch Excel-Tab. „Galilei“.

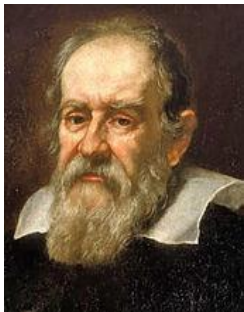
Feder-Hammer-Experiment Mond 1971 <https://www.youtube.com/watch?v=Oo8TaPVsn9Y> 1 min

Brian Cox visits ... <https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs> 5 min

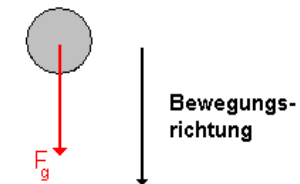
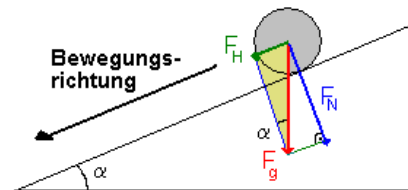
Galilei hatte die Messwerte aufgezeichnet und ausgewertet und so als erster zwischen theoretischer und empirischer Physik unterschieden. Damit gilt er auch als der Wegbereiter moderner Naturwissenschaften, deren Vorgehensweise darin besteht einen Vorgang von allen störenden Einflüssen zu trennen, → **Abstraktion****), ein Prinzip des Vorgangs als Vermutung zu formulieren → **Hypothese**, die Vermutung durch Versuche zu überprüfen → **Experiment**.

Freier Fall auf schiefer Ebene

Freier Fall senkrecht zum Erdmittelpunkt



Grafiken: schule-bw.de



Galileo Galilei (1564 – 1642)

Beschleunigung:

$$a = g \cdot \sin \alpha \quad (g = \text{Erdbeschleunigung})$$

$$a = g \cdot (\sin \alpha = 1) = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Ferner hatte sich Galilei optische Linsen beschafft und ein zuvor von dem Holländer Jan Lipperhey erfundenes „Holländisches Fernrohr“ nachgebaut, mit vierfacher Vergrößerung und 1609 als erster auch zur Himmelsbeobachtung eingesetzt. Die optische Qualität dieses Nachbaus war wohl miserabel und dennoch hat er damit astronomische Entdeckungen gemacht; so auch die vier größten Monde Jupiters, die „Galileischen Monde“ Ganymed, Kallisto, Io und Europa. Später lernte Galilei Linsen selber zu schleifen und erhöhte die Vergrößerung zuletzt auf das 33-fache. Mit seinen Beobachtungen bestätigte er auch das Heliozentrische Weltbild, das bereits 1514 von dem polnischen Arzt, Astronom und Domherr im Fürstentum Ermland (Preußen, heute Polen), Nikolaus Kopernikus, entwickelt wurde. Danach ist die Sonne Mittelpunkt der Welt und nicht die Erde, die auch nur ein Planet unter mehreren ist, die auf Kreis-Bahnen die Sonne umrunden (später korrigiert in Ellipsen-Bahnen durch Johannes Kepler (1571 – 1630) → deutscher Mathematiker und Astronom).

*) Dass Galilei verschieden schwere Kugeln vom „Schiefen Turm von Pisa“ fallen ließ, ist wahrscheinlich eine Legende (ChatGPT).

**) Fähigkeit, im Denkprozess die Einzelheiten wegzulassen und sie direkt zu verallgemeinern und somit zu vereinfachen (Google).

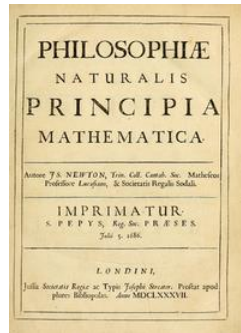
Wegen seiner Anschauungen kam Galilei in Konflikt mit der damals allmächtigen Katholischen Kirche, die das geozentrische Weltbild nach Ptolemäus übernommen hatte, mit der Erde als Mittelpunkt der Welt und so musste er seinen Überzeugungen abschwören und wurde unter Hausarrest gestellt.

Heliozentrisch – Geozentrisch / Prof. Harald Lesch <https://www.youtube.com/watch?v=XKkEYJxBDHM> 7 min

Galilei hat als erster schon das Relativitätsprinzip* überlegt. In seinem Werk "Dialog über die beiden hauptsächlichsten zwei Weltsysteme"*** erklärt Salviati (alias Galilei) seinem Freund Sagredo: "Schließt euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter Deck eines großen Schiffes ein Hängt oben einen kleinen Eimer auf, welcher tropfenweise Wasser in ein enghalsiges Gefäß träufeln lässt Und nun lasst das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen; ihr werdet, wenn nur die Bewegung **gleichförmig** ist und nicht hier und dorthin schwankend ..., nicht die geringste Veränderung sehen. ... Die Tropfen werden wie zuvor in das Gefäß fallen, obgleich das Schiff, während der Tropfen in der Luft ist, viele Spannen zurücklegt." Seine Schlussfolgerung:

"Aus keiner Erscheinung werdet Ihr entnehmen können, ob das Schiff fährt oder stille steht."

Galileis Messungen bildeten die Grundlage für die Bewegungsgesetze, wie sie später von Isaac Newton entwickelt wurden.



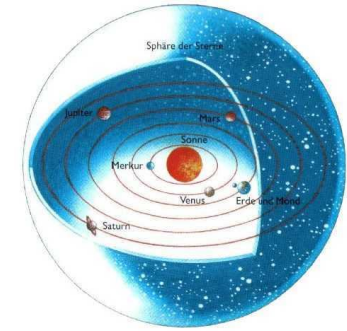
Isaac Newton (1643 – 1727)

Porträtiert von Godfrey Kneller, London 1702,
Bestandteil der National Portrait Gallery.



Nikolaus Kopernikus (1473 – 1543)

Revolutionibus Orbium Coelestium - 1543
Hauptwerk: Über die Umlaufbahnen der Himmelsphären.



Heliozentrisches Weltbild

Kopernikus – Galilei - Newton

Grafik: schulz-dresden.de

Wenn nun, wie in Galileis` Versuchen, eine Kugel auf einer geneigten Ebene abwärts rollt, dann wirkt stets dieselbe Kraft auf sie ein und diese Kraft ist das Gewicht der Kugel. Das hat den Effekt, dass Ihre Geschwindigkeit gleichmäßig zunimmt, d. h. sie wird beschleunigt. Und dies zeigt, dass die Wirkung einer Kraft **auch** darin besteht die Geschwindigkeit eines Körpers zu verändern und nicht **nur** ihn aus seiner Position der Ruhe heraus in Bewegung zu versetzen, wie Aristoteles aus seinen Überlegungen folgerte. Das bedeutet: Die Kraft ist eine gerichtete Größe und somit ein Vektor. Ergo hat sie einen Angriffspunkt, eine Richtung entlang einer Wirkungslinie und einen Betrag. Hierzu ein Gedankenexperiment:

*) Prinzip besagt, dass physikalische Gesetze in allen inertialen (trägen) Bezugssystemen, d. h. Systemen die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, gleich sind.

**) Ptolemäisches Weltbild und Kopernikanisches Weltbild.

Ein sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit „reibungsfrei“ bewegender Körper, z. B. ein mit Schwung aufgesetzter Eisstock, der auf einem zugefrorenen Teich gleitet und an dem eine Kraft angreift, wird

- **beschleunigt** → wenn die Kraft in Richtung der Bewegung angreift
- **verzögert** → wenn die Kraft entgegen der Bewegungsrichtung angreift
- **seitwärts abgelenkt** → wenn der Kraftangriff seitlich zur Bewegungsrichtung geschieht

Im Umkehrschluss heißt das: Ein Körper, an dem **keine** Kraft angreift, bewegt sich mit **konstanter** Geschwindigkeit in **gerader** Linie, **bis in alle Ewigkeit** (Eisstock auf einem zugefrorenen Teich ohne Ufer). Eine plausible Erklärung für das Phänomen gibt es bis heute nicht, laut Prof. Richard P. Feynman (1918 – 1988). In seinem Buch „Vom Wesen Physikalischer Gesetze“ bemerkt er dazu: „Der Ursprung des Trägheitsgesetzes liegt im Dunkeln“.

Diesen Gedanken entwickelte Newton erstmals 1687 und hat ihn in seinem Werk „Principia mathematica“ formuliert. Diese Idee gilt als

Das Erste Newtonsche Gesetz

„Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Translation, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“ Das ist das **Trägheitsprinzip** oder **Inertialprinzip** (lateinisch: inert = untätig, träge)

Was mit einem Körper geschieht an dem eine Kraft angreift sagt

Das Zweite Newtonsche Gesetz

„Die Änderung der Bewegung ist zur Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.“ Mathematisch formuliert:

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung} \rightarrow F = m \cdot a \text{ [kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N]} \text{ (N = Newton)}$$

Das bedeutet: Bei doppelt so großer Krafteinwirkung verdoppelt sich die Änderung der Bewegung, sprich Beschleunigung / Verzögerung, denn das sind Bewegungsänderungen. Zugleich ist die Beschleunigung / Verzögerung umso kleiner, je größer die Masse (Materiemenge) des Körpers ist. Wenn die gleiche Kraft auf eine doppelt so große Masse einwirkt, dann halbiert sich ihre Beschleunigung / Verzögerung. Eine weitere Feststellung Newtons benennt

Das Dritte Newtonsche Gesetz

„Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio)“:

$$\text{actio} = \text{reactio}$$

Neben der Entwicklung der Bewegungsgesetze hat Newton auch das

Gravitationsgesetz

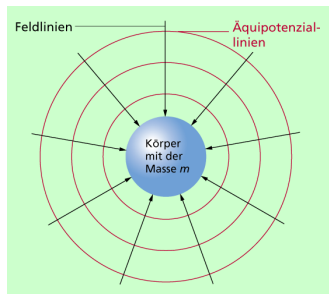
entdeckt. Dieses Gesetz sagt aus: **Jeder** Körper zieht **jeden** anderen Körper an, mit einer Kraft **F**, gemäß der Formel:

$$F_1 = F_2 = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

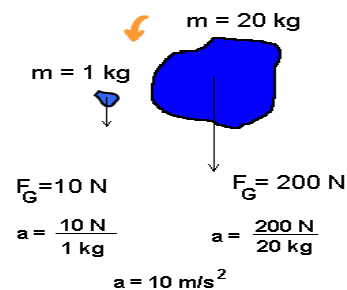
$F_1, F_2 \rightarrow$ Kraft [N] $m_1, m_2 \rightarrow$ Masse [kg], $r \rightarrow$ Abstand der Massenschwerpunkte [m], $G \rightarrow$ Gravitationskonstante, $G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}]$

Die **Schwerkraft / Gravitation** (lat.: Gravitatio = Schwere) bzw. das **Schwerefeld / Gravitationsfeld*** wirken universell, das meint **überall im Universum** (lat.: universus = gesamt). Zwei Körper ziehen sich an, egal wo sie sich befinden im Kosmos (griechisch: Anordnung, wohlgeordnetes Weltall) und egal wie fern sie einander sind. Man kann die Gravitation nicht neutralisieren oder abschirmen, wie das bei elektrischen und magnetischen Feldern der Fall ist. Die Gravitation hat keine Ladung! Nach Newton ist die Gravitationswirkung instantan, also ohne Verzögerung an jeder Stelle des Universums präsent.

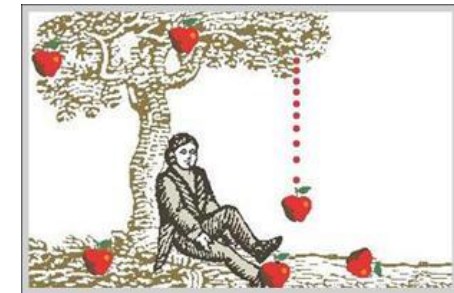
Das gleich schnelle Fallen verschieden schwerer Körper erklärt sich nach dem Gravitationsgesetz so: Beim freien Fall in einem Gravitationsfeld, wie dem der Erde, zieht die Schwerkraft die Dinge an ihrer schweren Masse, gemäß der v. g. Formel Newtons. So bewirkt die Schwerkraft, dass sich Objekte, wie Dachziegel und Taubenfedern, mit linear steigender Geschwindigkeit, sprich konstanter Beschleunigung, auf das Gravitationszentrum zu bewegen, hier zum Erdschwerpunkt hin. Dieser Fallbeschleunigung wirkt aber die Trägheit der Objekte entgegen, die sich der Beschleunigung widersetzt. Trägheitskraft und Schwerkraft sind exakt gleich groß, so dass im freien Fall die größere Trägheit schwererer Objekte (ihre **träge** Masse) durch die Schwere der Objekte (ihre **schwere** Masse) **exakt** ausgeglichen wird, was erklärt: **Alle Körper fallen gleich schnell!**



Grafik: Lernhelfer.de



Grafik: schulen-eduhi.at



Grafik: leibniz-pirmasens.de

Der fundamentale Unterschied zwischen den Vorstellungen Aristoteles' einerseits und Galileis / Newtons andererseits besteht nun darin, dass Aristoteles an einen bevorzugten Ruhezustand glaubte, den jeder Körper einnehmen würde, wenn nicht irgendeine Kraft an ihm wirkt. Newton dagegen ging davon aus dass ein Körper, an dem **keine** Kraft wirkt, sich in gerader Linie mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt, wie der v. g. reibungsfrei gleitende Eisstock auf dem zugefrorenen Teich oder ein vagabundierender Planet im „gravitationsfreien“ Weltall. Auch glaubte Aristoteles die Erde sei im Zustand absoluter Ruhe und obendrein noch Bezugspunkt für den Ablauf allen Geschehens am Himmelsgewölbe. Und so hatte er das geozentrische Weltbild „erschaffen“.

Aus den Gesetzen Newtons folgt jedoch, dass es weder einen eindeutigen noch bevorzugten Ruhezustand gibt. So läuft doch ein Vorgang in einem mit gleichförmiger Geschwindigkeit fahrenden Zug genauso ab wie der gleiche Vorgang am ruhenden Bahnsteig, z. B. der freie Fall eines Balls. Zu dieser Erkenntnis war schon Galilei gekommen (siehe Dialog Salviati / Sagredo Seite 5). Fällt der Ball, z. B. aus einer Höhe von $h = 1,22625 \text{ m}$, zu Boden, dann liefern die Newtonschen Gesetze, sowohl für den freien Fall des Balls im bewegten Zug, als auch am ruhenden Bahnsteig, das gleiche Ergebnis:

Der Ball schlägt nach der **Zeit** $t = \sqrt{2 \cdot h / g} = \sqrt{2 \cdot 1,22625 / 9,81} = 0,5 \text{ s}$ auf dem Boden des Zugs bzw. Bahnsteigs auf ($g = \text{Erdbeschleunigung} [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$).

*) Felder sind mathematische Gebilde. Ein Feld ordnet einem Raumpunkt Eigenschaften zu, z. B. Richtung und Geschwindigkeit in einem Gravitationsfeld; daher handelt es sich hier um ein Vektor-Feld. Kann die Eigenschaft durch einen einzigen Zahlenwert beschrieben werden, wie Druck, Temperatur, ..., dann liegt ein Skalar-Feld vor.

Angenommen der Ball ist ein „idealer“ Flummi, dann schlägt er, im zeitlichen Abstand von einer Sekunde, permanent auf demselben Punkt im Boden des Zuges auf. Wenn nun der Zug mit der konstanten Geschwindigkeit von $v = 10 \text{ m/s}$ an einem Bahnsteig längs fährt und eine dort stillstehende Person den Vorgang peilt, dann liegen aus ihrer Sicht, die Aufschlagpunkte 10 m weit auseinander, weil der Zug, pro Sekunde, eine Strecke von 10 m zurücklegt.

Was genauso gilt: Lässt die Person am Bahnsteig den Flummi unter gleichen Bedingungen fallen und aus dem fahrenden Zug beobachtet ein Fahrgast das Geschehen, dann liegen für ihn die Aufschlagpunkte auch 10 m weit auseinander. Das erscheint auf den ersten Blick verrückt. Man kann sich die Situation aber gut am Beispiel zweier Personenzüge klarmachen, die auf benachbarten Gleisen Seite an Seite stehen. Fährt einer der Züge „langsam“ los, kann ein Passagier im haltenden Zug, beim Blick durchs Fenster zum fahrenden Zug, das Gefühl verspüren, als hätte sich sein Zug in Bewegung gesetzt. Allenfalls merkt er erst wenn der letzte Wagen des Nachbarzuges aus seinem Blickfeld rollt, dass sein Zug noch an Ort und Stelle steht. Die Person im fahrenden Zug kann die Situation umgekehrt empfinden. Sehen die Fahrgäste, beim Blick aus ihren Fenstern, jeweils nur den Nachbarzug und nichts vom Umfeld, dann ist für sie nicht feststellbar, auch nicht über ein Experiment, welcher der Züge steht oder fährt oder ob beide stehen oder fahren, wenn die Zugbewegungen nur gleichförmig sind „... und nicht hier und dorthin schwankend ...“ → *Salvati alias Galilei*. Ähnliches hat wohl jeder schon erlebt.

Das Fehlen eines absoluten Zustands der Ruhe bedeutet somit, dass man einem Ereignis, im Gegensatz zur Auffassung Aristoteles´, keine eindeutige Position im Raum zuweisen kann. Orte und damit auch räumliche Distanzen, zeigen sich dem Betrachter unterschiedlich, je nachdem ob er sie, wie hier, im "bewegten" Zug oder vom "ruhenden" Bahnsteig aus anschaut und umgekehrt. **Es kommt auf die Perspektive an!!** Folglich lässt sich dann auch nicht bestimmen, ob Ereignisse (wie das Aufschlagen des Balls auf demselben Punkt im Boden des Zuges), die zu verschiedenen Zeitpunkten geschehen sind (hier im Intervall einer Sekunde), auch am gleichen Ort im Raum vorkamen.

Aber sowohl Aristoteles als auch Galilei und Newton glaubten an die absolute Zeit und sie dachten, man könne die Zeitspanne zwischen zwei Ereignissen eindeutig bestimmen und sie bliebe immer gleich, wer auch immer sie messe, egal ob der Passagier im bewegten Zug oder die Person am ruhenden Bahndamm. Nach dieser Auffassung existiert die Zeit getrennt und vollkommen unabhängig vom Raum. Newtons Definition der Zeit: "Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand."

Resümee: Die Entwicklung der Physik von **Aristoteles** über **Galilei** zu **Newton** zeigt den tiefgreifenden Wandel im wissenschaftlichen Denken. Während Aristoteles eine qualitative und **theologische** Sichtweise hatte, revolutionierte Galilei die Physik durch Experimente und das Trägheitsprinzip und Newton vollendete diesen Wandel mit einer mathematisch weitgehend exakten Beschreibung der Naturgesetze, die bis heute die klassische Mechanik dominieren.

Das Verflixte an der Zeit!

Neben der Vorstellung vom absoluten Raum, konnte letztlich auch Newtons Definition von der absoluten Zeit nicht bestehen bleiben. Aus der Theorie* von James Clerk Maxwell von 1895 über die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen und damit auch von sichtbarem Licht, geht hervor, dass sich diese Wellen im Vakuum mit der unveränderlichen Geschwindigkeit von $c = 299792,458 \text{ km/s}$ in alle Richtungen des Raumes ausbreiten. Wenn man eine Geschwindigkeit angibt, muss gesagt werden worauf sich die Angabe bezieht. Bei einem Zug z. B. bezieht sich die Angabe auf das Gleis, auf dem die Räder des Zuges rollen und somit auf die Erdoberfläche, in die das Gleis eingebettet ist. Beim Gewehr ist die Mündung des Gewehrlaufs Bezugspunkt. Nach Abschuss bewegt sich die Kugel von da an ballistisch und die Geschwindigkeit an dieser Stelle wird treffend Mündungsgeschwindigkeit v_0 genannt.

*) A und O einer Theorie ist ihre Prognosefähigkeit. Physikalische Theorien können nicht bewiesen (verifiziert), nur widerlegt (falsifiziert) werden: **Falsifikations-Prinzip!**

Und auf was bezieht sich dann die Geschwindigkeit des Lichts?

Die Physikerinnen und Physiker des 19. Jahrhunderts dachten sich eine hypothetische Substanz aus, den **Äther** (griechisch, **blauer** Himmel) und diesen stellten sie sich als allgegenwärtig existent im Universum vor und Lichtwellen und alle Dinge, wie Sonne, Planeten, Kometen, Mensch, Tier, ... bewegten sich durch diesen Äther. Folglich müsste sich Licht relativ zum Äther ausbreiten und zwar so, wie sich Schallwellen longitudinal (d. h. in Längsrichtung verlaufend) zur Luft ausbreiten. Bewegt sich eine Person auf eine Schallquelle zu, dann wird sie den Schall früher hören als bei Stillstand, weil sich die Geschwindigkeiten des Schalls und der Person zu einer höheren Gesamtgeschwindigkeit addieren. Somit müsste ein Beobachter, der sich relativ zum Äther bewegt, die Lichtwellen mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf sich zukommen sehen.

Doppler-Effekt Physik-simpleclub <https://www.youtube.com/watch?v=oai453XmEZQ> 4 min

Doch im Jahr 1887 stellten der Physiker Albert Michelson und der Chemiker Edward Morley in dem „berühmtesten misslungenen Experiment aller Zeiten“ (Daniela Leitner, Buch „Als das Licht laufen lernte“) mittels Interferometrie* fest: **Die Lichtgeschwindigkeit ist unveränderlich!** Und das gilt unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle (z. B. den Lampen einer Lokomotive) und des Lichtempfängers (z. B. den Augen eines Bahnwärters). Es ist auch egal mit welcher Geschwindigkeit sich Lichtquelle und Lichtempfänger relativ zueinander bewegen. Und das war der experimentelle Beweis dafür, dass Licht **kein** Trägermedium braucht und so ist die Theorie vom Äther unnötig. Die Lichtgeschwindigkeit ist generell unabhängig von einem Bezugssystem!

Eine Bestätigung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gibt sogar auch die Emissions- / Emitter-Theorie des Lichts her, die von Newton stammt und besagt, dass Licht „Teilchen“ sind und keine elektromagnetischen Wellen. Bewegen sich diese (Licht-) Teilchen relativ zu einer Lichtquelle, dann ist das so wie bei Gewehr kugeln (Teilchen), die mit Mündungsgeschwindigkeit den Gewehrlauf (Quelle) verlassen. Werden die Kugeln z. B. von einem fahrenden Zug aus parallel zum Gleis abgefeuert, dann errechnet sich ihre Geschwindigkeit klassisch als Summe aus Mündungs- und Fahrgeschwindigkeit. Nun könnte man, an einer bewegten Lichtquelle, wie den Lampen der Lokomotive, messen, ob die Geschwindigkeit dieser Licht-Wellen bzw. Licht-Teilchen, um den Betrag der Zuggeschwindigkeit höher oder niedriger ist, je nach der Richtung der Fahrt. Ein Test hierzu gelang in den 1970er Jahren mit neutralen Pionen**, die in Teilchenbeschleunigern mit fast Lichtgeschwindigkeit bewegt werden können und unter Emission von zwei Gammaquanten zerfallen. Die Geschwindigkeit dieses Gamma-„Lichts“ kann man sehr genau messen, Fazit: Auch dieses

Licht breitet sich im Vakuum mit der konstanten Geschwindigkeit von $c = 299792,458$ Kilometern pro Sekunde aus!

Zwischen 1887 und 1905 wurden diverse Versuche unternommen, namentlich von dem holländischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz (1858 - 1923), die Ergebnisse des Michelson-Morley-Experiments so zu deuten, dass sich Gegenstände in Bewegungsrichtung zusammenziehen. Wenn die gleichförmige Bewegung des Lichts gegenüber dem Äther so auch nicht nachweisbar war, hielt Lorentz dennoch an dessen Existenz fest.

Doch im Wunderjahr „annus mirabilis“ 1905*** erklärte Albert Einstein, ein bis dahin noch unbekannter „Technischer Experte III. Klasse“ am Schweizer Patentamt in Bern, dass die Vorstellung vom Äther überflüssig sei wenn man nur bereit wäre, die Vorstellung von der absoluten Zeit aufzugeben. Einstein hatte eine neue Theorie ersonnen:

*) Interferometrie ist eine Messmethode, die das Phänomen der Interferenz anwendet; das ist die Verstärkung bzw. Auslöschung von Wellen bei ihrer Überlagerung.

***) Pionen, auch Pi-Mesonen genannt, bestehen aus je einem Up-/Anti-Up-Quark und sie entstehen bei Kollisionen von Atomkernen, z. B. in Teilchenbeschleunigern.

***) In diesem Jahr veröffentlichte Einstein vier bedeutende Arbeiten: Lichtquantenhypothese / Brownsche Bewegung → Realität der Atome / SRT / Formel $E = m \cdot c^2$.

2) Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT)

a) Raum und Zeit als veränderliche Größen

Die spezielle Relativitätstheorie beschreibt die Relation (lat.: relatio = Beziehung, Verhältnis) von Bezugssystemen, die **relativ** zueinander im Zustand **gleichförmiger*** Bewegung sind. Klassiker: „Bewegter“ Zug / „ruhender“ Bahnsteig. Einsteins Bedingungen, unter denen seine Theorie gültig ist, lauten:

- **Die Naturgesetze sind für alle Beobachter gleich!**

Es ist egal ob die Beobachter im „bewegten“ Zug oder am „ruhenden“ Bahnsteig sind und mit welcher **konstanten** Geschwindigkeit sie in **relativer** Bewegung zueinander sind. Das galt auch schon für Newtons Bewegungsgesetze (siehe Beispiel Ball im Zug und Ball am Bahnsteig auf Seite 8).

- **Alle Beobachter messen für die Lichtgeschwindigkeit denselben Wert : 299792,458 km/s im Vakuum!**)**

Es ist egal, mit welcher **konstanten** Geschwindigkeit sich die Beobachter bewegen oder das Licht bzw. die Lichtquelle auf sie zukommt oder sich von ihnen entfernt.

Die konsequente Anwendung dieser Maßgaben führte letztlich zum Sturz der Newtonschen Mechanik und zum Aufbau einer neuen Physik, deren Grundlage **Raum und Zeit** bilden. Die bekannteste Folgerung aus Einsteins Postulaten ist wohl die Äquivalenz von Masse und Energie, die mathematisch in der berühmten Formel $E = m \cdot c^2$ imponiert (Seite 25 – 30). Ferner erweist sich die Lichtgeschwindigkeit **c** auch als maximale Transportgeschwindigkeit für die Ausbreitung von Objekten, Wirkungen, Informationen, das ist Austausch von Signalen, kurzum von **allem** im Kosmos. **Nichts ist schneller als Licht!**

Objekte mit Massen, wie Züge oder Atome, können **c** nicht erreichen! „Teilchen“ ohne Masse, wie die Photonen, so werden die Lichtquanten genannt, können **c** nicht unterschreiten! Und weil Photonen keine Ruhemasse haben können sie auch nicht ruhen und sind allzeit mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs, wenn ihnen Raum zur Verfügung steht. Ansonsten wechselwirken sie mit den Elektronen der Materie in den Atomen und Molekülen. Auch in Bezug auf die Gleichzeitigkeit von Ereignissen ergibt sich unter den Prämissen Einsteins eine neue Interpretation. So bemerkt er in seiner Publikation vom 26.09.1905 „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, die im Nachhinein als die Spezielle Relativitätstheorie in die Wissenschaftsgeschichte einging (S. 893):

"Wir haben zu berücksichtigen, dass alle unsere Urteile, in welchen die Zeit eine Rolle spielt, immer Urteile über gleichzeitige Ereignisse sind."

Einsteins Publikation von 1905 https://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/einstein-papers/1905_17_891-921.pdf

Nach seinen Überlegungen kann man, bis auf weiteres, nur dann von gleichzeitigen Ereignissen sprechen, wenn diese sehr nahe beieinander passieren. Beispiel: Die S-Bahn fährt in den Bahnhof von Flörsheim am Main, kommt zum Stehen **und** der große Zeiger der Bahnhofsuhr springt auf 17:35 Uhr.

Wie lässt sich dann abklären ob zwei Ereignisse, wie ein Lichtblitz auf der Erde und ein Lichtblitz auf dem Mond, zur gleichen Zeit erfolgt sind?

Nach Newton ist das einfach; er geht davon aus, dass die Zeit absolut ist und man kann überall im Universum, mithin auch auf Erde und Mond, Uhren aufstellen und synchron laufen lassen. Das setzt aber voraus, dass die sich Zeitsignale zum Synchronisieren der Uhren **ohne** Zeitverzögerung ausbreiten.

*) Daher „spezielle“ Relativitätstheorie; die Relationen beschleunigt bewegter Bezugssysteme ist Thema der „allgemeinen“ Relativitätstheorie, siehe dazu Seite 25 ff.

***) In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit geringer, z. B. in Wasser 75 % von c, das sind 225.000 km/s. Dann können z. B. Elektronen auch schneller sein als Licht, so entsteht die (elektromagnetische) Tscherenkow-Strahlung → eine bläuliche Leuchterscheinung in Abklingbecken für Brennstäbe von Atomkraftwerken.

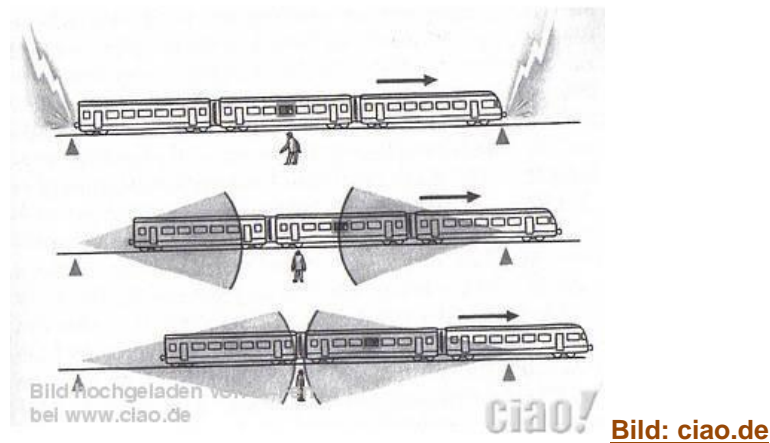
Nach Einstein geht das nicht, weil die Lichtgeschwindigkeit maximale Transportgeschwindigkeit ist, auch für Informationen, wie zuvor schon bemerkt. Doch auch nach Einstein können zwei Ereignisse, die räumlich weit auseinander liegen, als gleichzeitig geschehen betrachtet werden und zwar dann, wenn die von ihnen ausgesandten Lichtsignale gleichzeitig bei einem mittig zwischen ihnen befindlichen Beobachter eintreffen und auch nur unter der Voraussetzung, dass die Ereignisse und der Beobachter im Zustand der Ruhe zueinander sind; dann ist die Relativgeschwindigkeit $v = 0$.

Vorbemerkung zu dem nun folgenden Gedankenexperiment:

Eine Lichtquelle sendet kugelförmig Fronten von Lichtwellen aus, die transversal, also senkrecht, zur Ausbreitungsrichtung schwingen und sich mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen des Raumes ausbreiten.

Gedankenexperiment: Ein Personenzug fährt einen Bahndamm entlang und kommt auf gerader Strecke zum Stehen. In der Mitte des Zuges kontrolliert der Zugschaffner die Fahrkarten der Reisenden und etwas abseits des Gleiskörpers, aber genau auf Augenhöhe mit dem Schaffner, steht ein Bahnwärter. Beide Personen sind mit Uhren ausgestattet, die synchronisiert sind und exakt gleich gehen. Zum Zeitpunkt $t = 0$, sagen wir **12:00:00: ... Uhr mittags**, schlägt vorn und hinten am Zug simultan ein Blitz ein. Das Licht der Blitze breitet sich, ausgehend von den Einschlagpunkten, kugelförmig in alle Raumrichtungen aus und erreicht den Schaffner gleichzeitig nach der Zeit t_1 . Diese Zeitspanne benötigen die Lichtsignale um vom jeweiligen Ende des Zuges bis zu Schaffner in die Mitte zu gelangen. Also nimmt er die Blitzeinschläge als zwei Ereignisse wahr, die zum gleichen Zeitpunkt erfolgt sind.

Einleuchtend ist auch, dass der Bahnwärter die Blitzeinschläge ebenfalls als gleichzeitig geschehen erkennt, allerdings zum etwas späteren Zeitpunkt t_2 . Das Zeitmaß t_2 ist größer als t_1 weil der Bahnwärter abseits des Gleiskörpers steht und das Licht der Blitze somit einen längeren Weg zurückzulegen hat, als bis zum Schaffner in der Mitte des Zuges. Der Weg des Lichts vom jeweiligen Einschlagpunkt bis zum Bahnwärter entspricht der **Hypotenuse** der rechtwinkligen Dreiecke **Zuganfang–Schaffner–Bahnwärter** bzw. **Zugende–Schaffner–Bahnwärter**; für den Schaffner ergibt die **Ankathete** den Lichtweg. Bei bekannter Zuglänge können Schaffner und Bahnwärter den Zeitpunkt berechnen, an dem die Blitze einschlugen: **12:00:00: ... Uhr mittags**.



Fazit: Schaffner und Bahnwärter erkennen die Blitzeinschläge als gleichzeitige Ereignisse.

Wie ist die Situation aber wenn der Zug mit konstantem Tempo am stehenden Bahnwärter längs fährt und die Blitze genau dann einschlagen wenn Zugschaffner und Bahnwärter wieder auf Augenhöhe zueinander sind?

Perspektive Schaffner: Er bewegt sich, mit dem fahrenden Zug, der Lichtkugel des Blitzes entgegen, der vorne am Zug einschlug und eilt der Lichtkugel des Blitzes davon, der den Zug hinten getroffen hat. Somit sieht er den Blitz am Zuganfang zuerst und danach den Blitz am Ende des Zuges aufleuchten.

Schaffner: "Am Zug schlug zuerst vorn und dann hinten ein Blitz ein".

Perspektive Bahnwärter: Er ist zum Zeitpunkt der Blitzeinschläge nach wie vor gleich weit vom vorderen und hinteren Ende des Zuges entfernt und das Licht der Blitze erreicht ihn daher gleichzeitig, genau wie zuvor beim stehenden Zug.

Bahnwärter: "Am Zug schlug vorn und hinten gleichzeitig ein Blitz ein".

Frage: Wer hat Recht?

Antwort: Beide!

Schaffner und Bahnwärter befinden sich in **verschiedenen** Bezugssystemen, die relativ zueinander in gleichförmiger Bewegung sind. Im Beispiel befindet sich der Schaffner im "bewegten" System Zug und der Bahnwärter im "ruhenden" System Bahndamm. Und so wird ein Pendler, der in dem gleichförmig "bewegten" System S-Bahn auf dem Parallelgleis dem "bewegten" System Zug entgegenfährt und sich zum Zeitpunkt der Blitzeinschläge auf Augenhöhe mit dem Zugschaffner und dem Bahnwärter am „ruhenden“ System Bahndamm befindet, behaupten, dass ein Blitz den Zug erst hinten und danach vorn getroffen hat. Auch die Aussage des S-Bahnfahrers ist richtig.

Das heißt: Ereignisse, die in Bezug auf den ruhenden Bahnwärter gleichzeitig sind, sind bezogen auf den bewegten Schaffner im Zug und den bewegten Pendler in der S-Bahn nicht gleichzeitig. Das gilt genauso umgekehrt (Relativität der Gleichzeitigkeit). Jedes Bezugssystem hat seine besondere Zeit, die man treffend **Eigenzeit** nennt und das ist die Zeit, die mir meine Armbanduhr zeigt. So ist der zeitliche Ablauf von Ereignissen vom Bewegungszustand des Beobachters abhängig. Folgerichtig gibt eine Zeitangabe auch nur dann Sinn, wenn der Bezugskörper angegeben wird, auf den sich diese Angabe bezieht. Solche Bezugssysteme, die im Zustand **gleichförmiger** Bewegung zueinander sind, nennen die Physikerinnen und Physiker **Inertialsysteme** (Erläuterung siehe Seite 15). Wichtig: Es sind **nur** Relativbewegungen von Belang! Vormerkung zum folgenden Gedankenexperiment (gilt immer):

Die Augen eines Beobachters sind nur Lichtempfänger und keine Lichtsender!

Statt bloß Signale zu empfangen, wie das Licht der Blitze, die vorn und hinten am Zug einschlugen, könnte jeder Beobachter auch Lichtsignale aussenden um festzustellen, **wo** und **wann** ein Ereignis stattgefunden hat. Zum Beispiel könnte man, in dunkler Nacht, mit einer Taschenlampe, die Kirchturm-Uhr der Sankt Martins Kirche in Engers anpeilen um zu ermitteln, wie deren fiktive „Nano-Sekunden-Zeigerstellung“ (**Ereignis**) ist. Hierzu wird die Lampe auf die Uhr ausgerichtet und zum Zeitpunkt t_1 eingeschaltet. Ein Teil des Lichts wird vom Ziel- / Treff-Punkt Kirchturm-Uhr (**wo**) reflektiert und der Beobachter misst beim Eintreffen des Echos die Zeit t_2 . Als Zeitpunkt t für das Ereignis gilt dann die Hälfte der Zeit zwischen Aussendung und Empfang des Lichtsignals, das heißt: $t = (t_1 + t_2) / 2$ (**wann**). Die Entfernung zur Kirchturm-Uhr ergibt sich dann durch Multiplikation der Zeit t mit der Lichtgeschwindigkeit c . Nach dem gleichen Prinzip lässt sich auch der Zeitpunkt eines Ereignisses auf dem Mond oder dem Mars oder ... ermitteln.

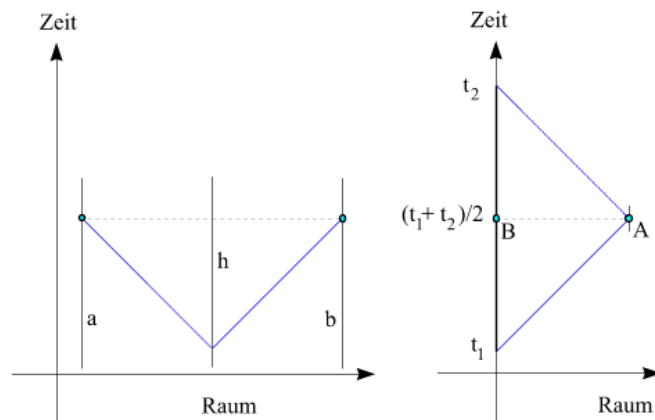
Wichtige Anmerkung: Die Position eines Punktes im Raum lässt sich durch drei Koordinaten bestimmen. So kann man z. B. sagen, dass in einem rechtwinkligen Zimmer ein Punkt einen Meter vom Fußboden, zwei Meter von der einen Wand und drei Meter von der anderen Wand entfernt ist. Diese drei Raumkoordinaten „wo“ bilden zusammen mit der Koordinate für die Zeit „wann“ den **vierdimensionalen Raum**, genannt **Raumzeit**.

Mehr steckt im Grunde nicht dahinter!?

Einen vierdimensionalen Raum kann man sich, als dreidimensionales Wesen, kaum vorstellen. Man kann aber leicht Diagramme von zweidimensionalen Räumen zeichnen und z. B. in einem kartesischen Koordinatensystem auf der vertikalen y-Achse die Zeit nach oben hin zunehmend kennzeichnen und auf der horizontalen x-Achse die drei Raumdimensionen, in einer einzigen Raumdimension vereint, nach rechts ansteigend markieren (s. Bild unten links).

Bewegte Objekte werden in solchen Raumzeit-Diagrammen als **Weltlinien** abgebildet, wie dies die **blauen** Linien in den Diagrammen unten zeigen. Eine Weltlinie ist eine Folge von Ereignissen, während derer sich ein Objekt zu einem bestimmten Zeitpunkt „wann“ an einem bestimmten Ort „wo“ befindet.

Bewegungen **ohne** Geschwindigkeit ergeben senkrechte Geraden (Linien a und b), Bewegungen mit **konstanter** Geschwindigkeit schräge Geraden. Das linke Diagramm zeigt zwei Objekte, die in einem Inertialsystem ruhen. Anschaulich kann man sich z. B. zwei Uhren denken, die bewegungslos in einem Zimmer auf dem Boden liegen oder erhöht auf einem Tisch oder auch sonst wo. Die Uhren bewegen sich aber in der Zeit, denn sie ticken ja weiter. Die Linien a und b stellen die Weltlinien dar und die Halbierungslinie h bezeichnet die Weltlinie des Halbierungspunktes. Das rechte Diagramm bildet den vor genannten Fall der Kirchturm-Uhr ab. Das Licht der Taschenlampe wird zum Zeitpunkt t_1 abgesandt, erreicht die Turmuhr (**A**), ein Teil des Lichts wird dort reflektiert und kommt zum Zeitpunkt t_2 wieder beim Sender (**B**) an.



Grafik: uni-tuebingen.de



Bild: Spektrum.de ...

Wenn man Sterne am Nachthimmel schaut, erkennt man sie als verschiedene Licht-Punkte im dreidimensionalen Raum und gleichzeitig sieht man sie an verschiedenen Punkten in der Zeit, denn ihr Licht braucht Jahre, Jahrzehnte, Jahrhunderte, ..., Jahrmilliarden, um in unsere Augen zu gelangen. Auch mit Teleskopen sind Sterne praktisch nur als Punkte zu sehen, weil sie so weit weg sind (nur Beteigeuze ist als Fläche erkennbar). Der z. Zt. am weitesten entfernte Stern, **Earendel** (altenglisch → Morgenstern / siehe Pfeil im rechten Bild / > 50 Sonnenmassen groß), ist 12,9 Milliarden Lichtjahre fern von uns, hat also sein Licht bereits 900 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesandt und ist vermutlich schon längst als Supernova explodiert. Nur durch den Gravitationslinsen-Effekt, den Einstein 1936 vorhergesagt hatte, ist der Stern mit dem Hubble-Weltraum-Teleskops überhaupt zu beobachten.

Bei dem vorgenannten Verfahren

"Lichtsignal aussenden und die Zeitspanne bis zum Echo messen",

werden Beobachter, die relativ zueinander in gleichförmiger Bewegung sind, ein und demselben Ereignis verschiedene Zeiten und Positionen im Raum zuweisen (siehe Schaffner / Bahnwärter). Und es gibt keinen Beobachter, dessen Messungen richtiger wären als die irgendeines anderen Beobachters. Aber alle Messungen stehen in Beziehung zueinander und darum kann jeder Beobachter genau ermitteln, welche Zeit und Position ein anderer diesem Ereignis zuweisen wird, wenn er dessen relative Geschwindigkeit kennt. Prinzipiell sagt das: Die Relativitätstheorie definiert Entfernung und das ist der Raum zwischen zwei Ereignissen, durch die **Zeit** und die **Lichtgeschwindigkeit**. Das bedeutet:

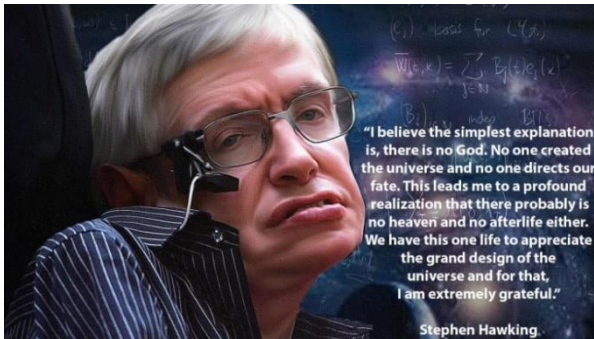
Jeder kommt zu dem gleichen Ergebnis, wenn er die Lichtgeschwindigkeit misst:

1 Meter pro 0,0000000335640952 Sekunden

Und das wiederum erfordert definitiv die klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit als absolute Größen grundlegend zu modifizieren.

Erläuterung zum Phänomen Zeit

Auszug aus "Das Universum in der Nussschale" von Stephen Hawking, Kapitel 2 → DIE FORM DER ZEIT:



"Ich (Stephen Hawking) bin der Meinung, jede vernünftige wissenschaftliche Theorie, ..., sollte sich auf die für den Praktiker zweckmäßigste Wissenschaftsphilosophie gründen, den positivistischen Ansatz, den Karl Popper und andere entwickelt haben. Nach dieser Auffassung ist eine wissenschaftliche Theorie ein mathematisches Modell, das unsere Beobachtungen beschreibt und kodifiziert*. Eine gute Theorie beschreibt ein großes Spektrum von Phänomenen auf der Grundlage einiger einfacher Postulate und macht eindeutige Vorhersagen**), die sich überprüfen lassen. Wenn die Vorhersagen mit der Beobachtung übereinstimmen, dann hat die Theorie diesen Test bestanden, doch lässt sich nie vollständig beweisen, dass sie richtig ist. Stimmen die Beobachtungen hingegen nicht mit den Vorhersagen überein, müssen wir die Theorie aufgeben oder verändern.

Stephen Hawking (1942 – 2018)

Englischer Theoretischer Physiker

„Wenn man, wie ich (Stephen Hawking), den positivistischen Standpunkt bezieht, kann man die Frage, was Zeit tatsächlich ist, nicht beantworten. Man kann lediglich beschreiben, was sich als ein sehr gutes Modell der Zeit erwiesen hat und sagen, welche Vorhersagen es macht. Das erste mathematische Modell hat Isaac Newton in seinem 1687 erschienenen Werk "Principia Mathematica" geliefert. ...“ (siehe ggf. auch Seite 8). Das Modell besagt:

„Die Zeit ist vom Raum getrennt und nach der damaligen Vorstellung eine Linie, die sich in beiden Richtungen unendlich ausdehnt.“

Hawking: „Ich glaube die einfachste Erklärung ist, dass es keinen Gott gibt. Niemand hat das Universum erschaffen und niemand lenkt unser Schicksal.“

*) In eine geordnete Form bringen, eine Gesetzmäßigkeit formulieren.

**) Man denke z. B. an Galilei: „Alle Körper fallen gleich schnell!“

Erläuterung zum Inertialsystem

<https://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/Inertialsystem.html>

Die Bewegung des Objekts selbst findet **nicht in** einem Inertialsystem statt! Das Inertialsystem **dient nur** dazu, die Bewegung des Objekts quantitativ zu beschreiben. Im Beispiel vorhin bewegt sich der Schaffner **nicht** im Zug, der Bahnwärter **nicht** entlang des Bahndamms und der Pendler auch **nicht** in der S-Bahn. Zug, Bahndamm und S-Bahn lassen sich als separate räumliche Ausdehnungen auffassen - als dreidimensionale Koordinatensysteme - die relativ zueinander in gleichförmiger Bewegung sind. Und die Augen von Schaffner, Bahnwärter und Pendler kann man sich als Fotozellen denken, die mit Atomuhren ausgestattet sind und das bei ihnen ankommende Licht der Blitze detektieren. Die Fotozellen mit ihren Atomuhren werden exakt die gleiche zeitliche Abfolge der Blitzeinschläge ermitteln wie Zugschaffner, Bahnwärter und S-Bahn-Fahrer mit ihren Augen und Uhren, die sie bei sich tragen. Der Zweck des Inertialsystems ist es, mittels Koordinaten, quantitativ festzustellen:

Wo (Punkt im Raum) ein Ereignis, z. B. ein Lichtblitz, **wann** (Punkt auf der Zeitskala) stattgefunden hat.

Hierzu werden dem Ereignis vier Zahlenwerte zugewiesen, um es eindeutig von anderen Ereignissen unterscheiden zu können: In dem ruhenden Inertialsystem **S** (hier „ruhender“ Bahndamm) sind dies die drei Raumkoordinaten **x**, **y**, **z** und eine Koordinate für die Zeit **t** und in dem relativ zu **S** gleichförmig bewegten System **S'** (hier "bewegter" Zug) die drei Raumkoordinaten **x'**, **y'**, **z'** sowie die Zeitkoordinate **t'**.

Wenn der Schaffner in dem mit gleichförmiger Geschwindigkeit fahrenden Zug in gleichförmigem Tempo den Mittelgang entlang geht, dann bewegt er sich relativ zum Zug und somit auch zu den in ihren Sitzen ruhenden Fahrgästen. Schaffner und Fahrgäste sind zwar in einem Zug, aber in verschiedenen Inertialsystemen. Es sind immer nur Relativbewegungen von Belang, wie schon gesagt, so dass gilt:

Alle Inertialsysteme, die sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit relativ zueinander bewegen, sind ebenfalls Inertialsysteme.

Inertialsystem Physik simpleclub <https://www.youtube.com/watch?v=1Z57k9TVU5k> 5 min

Aus dieser Konstellation heraus stellt sich nun die Frage:

Wie wird ein Beobachter, der im Inertialsystem S (Bahndamm) ruht, ein Ereignis (Lichtblitz) wahrnehmen, das im Inertialsystem S' (gleichförmig bewegter Zug) geschieht? Oder konkret:

Welche Werte für die Koordinaten **x'**, **y'**, **z'** und **t'** wird er dem Ereignis zuweisen?

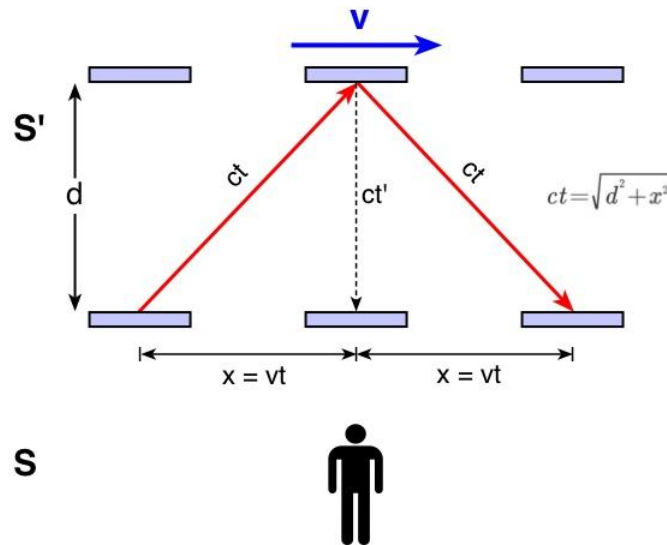
Oder einfacher und zunächst **nur** auf die **Zeitkoordinate t'** reduziert:

Wie sieht ein ruhender Beobachter die Uhr eines bewegten anderen?

Die Antwort auf diese Frage lässt sich an Hand der Erweiterung des Gedankenexperiments „Personenzug“ herleiten:

Es wird angenommen, dass im Zug eine Lichtuhr installiert ist, so wie im Bild schematisch dargestellt. Die Konstruktion besteht aus zwei Spiegeln, die im Abstand d parallel und horizontal zueinander angeordnet sind, zwischen denen ein Lichtsignal hin und her reflektiert. Die Spiegel sind mit Fozelle und Zählwerk ausgerüstet, so dass die Uhr „tickt“, wenn das Licht am oberen Spiegel ankommt und "tackt" wenn es den unteren Spiegel erreicht.

...-Tick-tack-Tick-tack-Tick-...



Lichtuhr [Grafik: physikunterricht-online.de](http://physikunterricht-online.de)

Beim Schauen auf die Lichtuhr sieht der Schaffner, in dem bewegten Zug (S'), deren Lichtsignal vertikal zwischen den Spiegeln rauf und runter sausen. Der Abstand d zwischen den Spiegeln berechnet er nach der Formel:

$$d = c * t'$$

Wie sieht der Bahnwärter im System S (ruhender Bahndamm) die Lichtuhr des Schaffners im System S' (bewegter Zug)?

Der Bahnwärter am ruhenden Bahndamm (S) nimmt das Lichtsignal jedoch als **diagonal** laufende Zick-Tick- und Zack-Tack-Linien wahr und berechnet die Länge einer Zick- bzw. Zack-Linie nach dem Satz des Pythagoras:

$$c * t = \sqrt{d^2 + x^2}$$

Und da sich Licht, per Definition, in **allen** Inertialsystemen gleich schnell ausbreitet, ist für den Bahnwärter am Bahndamm (S) die Zeitspanne Δt größer als die Zeitspanne $\Delta t'$, die der Schaffner im fahrenden Zug (S') erkennt. Ergo geht aus Sicht des Bahnwärters die Uhr des Schaffners langsamer.

Die Formel zur Berechnung der **Zeit t**, die im Inertialsystem **S** (Bahndamm) vergeht, lässt sich über den Satz des Pythagoras´ herleiten:

$$c^2 * t'^2 = c^2 * t^2 - v^2 * t^2$$

$$c^2 * t'^2 = t^2 * (c^2 - v^2) \quad | : (c^2 - v^2)$$

$$t^2 = \frac{c^2 * t'^2}{c^2 - v^2} = t'^2 * \frac{c^2}{c^2 - v^2} \quad | \text{ Zähler und Nenner : } c^2$$

$$t^2 = t'^2 * \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

So dass gilt:

$$t = t' * \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{und} \quad \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \gamma$$

wobei γ (Gamma) als der **Lorentz-Faktor** benannt ist und somit die doch **einfache** Beziehung gilt:

$$t = t' * \gamma$$

Und da der Lorentz-Faktor γ immer größer ist als 1, ist das Zeitmaß Δt , welches ein Beobachter im ruhenden System **S** (Bahndamm) für einen Vorgang im gleichförmig bewegten System **S'** (Zug) ermittelt, um diesen Faktor gedehnt. Also ist Δt am Bahndamm größer als $\Delta t'$ im Zug. Somit ist Faktum:

Relativ zum Beobachter bewegte Uhren gehen für ihn langsamer!

Zeitdilatation

<https://www.youtube.com/watch?v=nLFJggfjCA8>

Physik simpleclub 5,0 min.

Wie sieht es mit dem Weg aus?

Angenommen der Zug ist mit einer Apparatur ausgerüstet die es dem Schaffner ermöglicht, pro Sekunde, gemäß seiner „bewegten“ Uhr, das Gleisbett zu markieren, dann stellt sich die Frage: Welchen Abstand haben die Markierungen? Der Schaffner im „bewegten“ Zug bestimmt den Abstand x' zu:

$$x' = v * t'$$

Für den Bahnwärter am „ruhenden“ Bahndamm ist die Zeit aber gedehnt und er ermittelt seine persönliche Zeit zu:

$$t = t' * \gamma$$

und berechnet den Markierungsabstand nach der Formel:

$$x = v * t$$

Ist der Zug nun mit 86,6 % der Lichtgeschwindigkeit c unterwegs, dann nimmt der Lorentz-Faktor den Wert $\gamma = 2$ an (siehe Grafik auf Seite 20). Somit werden die Markierungen im Gleisbett, aus Sicht des Bahnwärters, im Intervall von $t = 2$ Sekunden ausgeführt und nicht von $t' = 1$ Sekunde, wie für den Schaffner im Zug. Der Markierungs-Abstand ist, da über die Relativgeschwindigkeit ja Einigkeit besteht, nämlich 86,6 % c , für den Bahnwärter am Gleis dann definitiv größer als für den Zugschaffner, hier um den Lorentz-Faktor $\gamma = 2$., so dass für ihn auch gilt:

$$x = x' * \gamma$$

Und welche Sichtweise ist richtig?

Der Bahnwärter hat Recht!

Die Markierungen haben im Gleisbett und somit im „ruhenden“ Bezugssystem des Bahnwärters stattgefunden, also auf dessen x -Achse und nicht auf der x' -Achse des „bewegten“ Systems Zug, in dem der Schaffner ist. Der Bahnwärter könnte, wenn der Zug vorübergefahren ist, den Gleiskörper begehen und die Markierungsabstände mit **seinem** Maßstab nachmessen. Das besagt umgekehrt: Der Schaffner im Zug nimmt aus **seinem** „bewegten“ System S' heraus die Markierungsabstände im Gleisbett um den Lorentz-Faktor $\gamma = 2$ kontrahiert wahr.

Diese Kontraktion betrifft aber nicht nur den Markierungs-Abstand, sondern alles was sich in Fahrtrichtung an ihm vorbei bewegt. So zeigen sich ihm die Abstände der Gleisschwellen und auch deren Breite kürzer und der Bahnwärter am Bahndamm sieht für ihn irgendwie zusammengestaucht aus. Aber die beiden anderen Raumdimensionen, Breite und Höhe des Zuges und der Gleise sowie deren Spurweite, sind vom Effekt der Lorentz-Kontraktion nicht betroffen, da in diese Richtungen **keinerlei** Relativbewegung in Fahrtrichtung des Inertialsystems „Zug“ existiert. Faktum ist damit auch:

Relativ zum Beobachter bewegte Körper sind für ihn in Bewegungsrichtung verkürzt!

Und da per Definition alle Inertialsysteme gleichwertig sind gilt auch umgekehrt:

Perforiert der Bahnwärter, mittels Spezial-Apparatur, vom „ruhenden“ Bahndamm (S) aus, die Außenwand des mit Tempo $v = 86,6 \% c$ vorbei rasenden Zuges im Nano-Sekunden-Takt, so erscheinen dem Schaffner im Zug (S') sowohl der Perforationsabstand x' , als auch das Zeitmaß $\Delta t'$, um den Lorentz-Faktor $\gamma = 2$ vergrößert, hier auf $\Delta t' = 2$ Nanosekunden. Das bedeutet: Der Zugschaffner kann sich auch auf den Standpunkt stellen:

„Ich bin in Ruhe und der Bahndamm bewegt sich an mir vorbei!“

Der Bahnwärter dagegen sieht den Perforations-Abstand x , sowie den Zug selbst, um den Lorentz-Faktor $\gamma = 2$ auf die Hälfte verkürzt an sich vorbei rasen und Schaffner und Fahrgäste erscheinen ihm in gleichem Maße gestaucht.

Die Lorentz-Transformation

ermöglicht die Umrechnung **von dem einen** Inertialsystem **in das andere** Inertialsystem.

1) Umrechnung vom ruhenden System S (Bahndamm) in das bewegte System S' (Zug)

$$x' = \gamma * (x - v * t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

2) Umrechnung vom bewegten System S' (Zug) in das ruhende System S (Bahndamm)

$$x = \gamma * (x' + v * t')$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

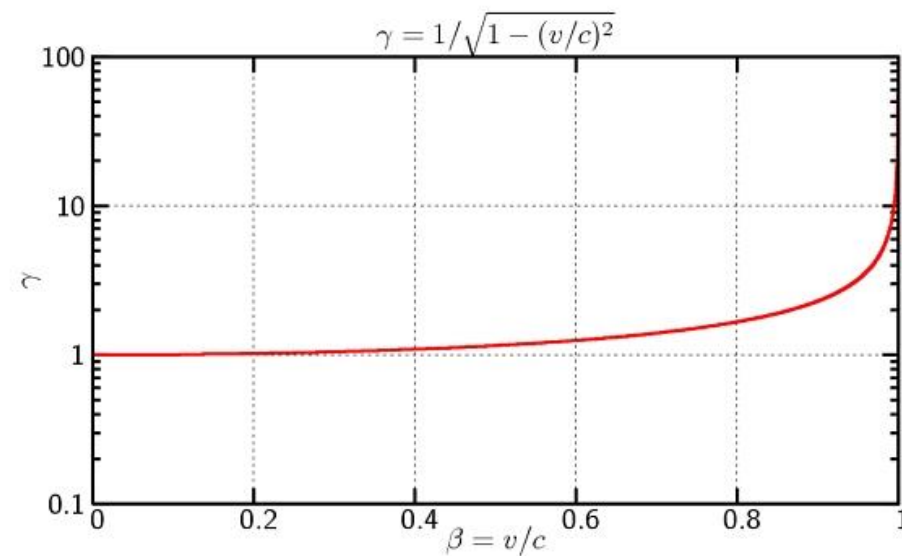
$$t = \gamma * \left(t' + \frac{v * x'}{c^2} \right)$$

Siehe hierzu Excel-Tab. Lorentz-T.

Bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten, mit β -Werten von bis zu 0,2, immerhin sind das schon bis zu 60.000 km/s, ist der Lorentz-Faktor nur geringfügig größer als eins, um genau zu sein bis $\gamma = 1,0206$. Mit weiter zurückgehender Geschwindigkeit nähert sich die Lorentz-Transformation mehr und mehr der Galilei-Transformation an, um bei $v = \beta = 0$ vollends zu entschwinden. Und so merken wir im Alltag praktisch nichts von den Auswirkungen der speziellen Relativitätstheorie, denn wer ist schon mit solch hohen (Relativ-)Geschwindigkeiten unterwegs.

Das bisher bekannte schnellste massive Objekt in der Milchstraße, der Stern S4711 in der Nähe ihres Zentrums, bringt es immerhin auf 24.000 km/s und das entspricht einem β -Wert von 0,080057 und der Lorentz-Faktor beträgt gerade mal $\gamma = 1,00322$.

Aber wegen des exponentiellen Anstiegs der Kurve steigt der Lorentz-Faktor γ zum Ende hin rasant an. Und wenn der β -Wert gegen eins tendiert, geht der γ -Wert gegen unendlich. Parallel dazu zeigen sich die Effekte auf Raum und Zeit dann in immer eindrucksvollere Weise.



Grafik: spektrum-de

Siehe hierzu Excel-Tabellen: [Sammelsurium Seite 2 und 3](#) / [Tempolimit](#) / [Zwillingsparadoxon](#)

b) Raum und Zeit – Newton versus Einstein

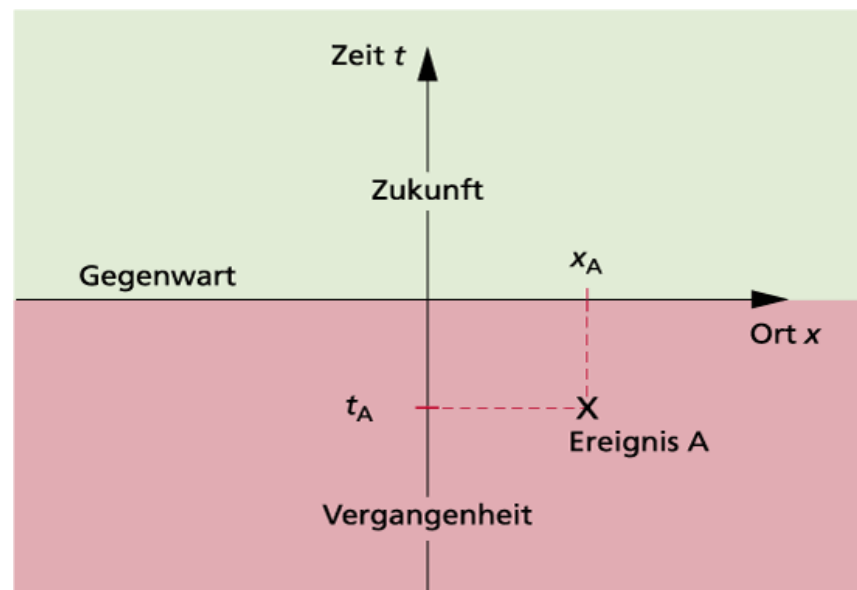
Betrachtungen basieren auf „lernhelfer.de“

Klassische Auffassung nach Newton

Der Raum selbst ist nicht zu sehen, nur die Dinge, die sich darin befinden. Raum und Zeit existieren objektiv und unabhängig voneinander, insbesondere auch unabhängig vom Bewegungszustand eines Körpers. Es gibt keine Wechselbeziehungen zwischen Raum und Zeit. Der Raum ist dreidimensional und unendlich ausgedehnt; alle Richtungen sind gleichberechtigt. Die Zeit ist unendlich ausgedehnt und nur von einer Dimension und Richtung → Zukunft. Alle Zeitpunkte sind aus physikalischer Sicht gleichberechtigt. Raum und Zeit sind universell, d. h. die räumlichen Abmessungen eines Körpers und die Dauer eines Vorgangs sind unabhängig vom Bezugssystem.

Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft sind damit eindeutig festgelegt.

In der Grafik unten sind Ereignisse, die in der Vergangenheit stattgefunden haben, unterhalb der x-Achse notiert; Ereignisse in der Gegenwart sind genau auf x-Achse und zukünftige Ereignisse oberhalb der x-Achse markiert. Ein Ereignis, z. B. ein Blitzschlag in die Turmspitze der römisch katholischen Kirche in Engers am Rhein **[wo]** am 02. Juni 2025 um 24:00 Uhr **[wann]**, ergibt einen Punkt in dem Diagramm (Ereignis **A**). Ereignisse, die **am gleichen Ort** (Kirchturmspitze) passieren und kausal miteinander verbunden sind (z. B. der Hahn auf der Turmspitze glüht infolge des Einschlags rot und die Färbung klingt wieder ab, liegen dann übereinander auf einer Geraden ($X - - - x_A$), die parallel zur Zeitachse **t** verläuft (03. Juni 2025 um 00:01, 00:02, ... Uhr).



Grafik: lernhelfer.de:

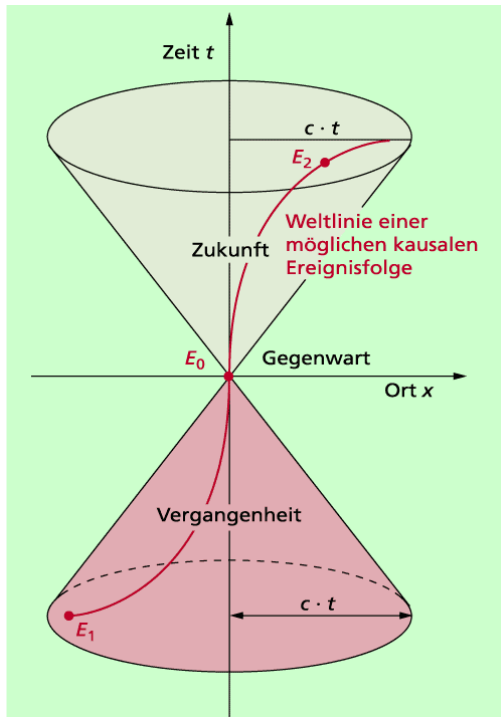
Raum-Zeit-Diagramm **klassisch**,
Zukunft und Vergangenheit sind Richtungen der **Zeit**.

Spezielle Relativitätstheorie nach Einstein

Es gibt weder einen absoluten Raum, noch gibt es eine absolute Zeit! Die Zeit ist nicht getrennt vom Raum, sondern mit ihm zu einer Raumzeit genannten **Entität**, das bedeutet „ein existierendes Ding“ / „ein Seiendes“, verbunden. Raum und Zeit sind relativ und abhängig von dem Inertialsystem, in dem man sich aufhält („ruhender“ Bahndamm S oder „bewegter“ Zug S') und von dem aus man das Geschehen, sprich Ereignisse, beobachtet. Raum und Zeit sind folglich abhängig vom Bewegungsstand des Beobachters. Notabene: Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt!

Aus der Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit unveränderlich ist folgt, dass ein Lichtsignal, das zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort im Raum ausgesandt wird, sich in Form einer Lichtkugel ausbreitet, deren Größe und Position unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle ist. Nach einer millionstel Sekunde zählt der Radius der Kugel 300 m, nach zwei millionstel Sekunden 600 m, nach drei millionstel Sekunden 900 m, usw.

Dieser Vorgang ist auf zweidimensionaler Ebene vergleichbar mit der Ausbreitung von Wasserwellen auf einem Teich. Wirft man einen Stein in den Teich, dann breiten sich, ausgehend von seinem Eintauchpunkt, Wellen auf der Teichoberfläche als Kreise aus, die im Verlauf der Zeit immer größer werden. Stellt man sich nun ein Modell vor, das aus der zweidimensionalen Oberfläche des Teiches besteht, sie soll den Raum darstellen und einer darauf vertikal stehenden weiteren Dimension für die Zeit, deren Achse genau mit der Eintauchstelle des Steins auf der Wasseroberfläche zusammenfällt, dann erhält man einen dreidimensionalen Kegel, dessen Spitze den Ort und den Zeitpunkt angibt, an dem der Stein ins Wasser eintauchte. Das ist das **Ereignis**.



Die Grüne Fläche ist die Region Anderswo.

Analog stellt das, von einem Ereignis **Lichtblitz** aus startende, sich ausbreitende Licht einen dreidimensionalen Kegel in der vierdimensionalen Raumzeit dar. Der Kegel wird als Zukunftslichtkegel des Ereignisses bezeichnet. In gleicher Weise kann man einen Vergangenheitslichtkegel darstellen. Die Mathematik zur Veranschaulichung der Theorie Einsteins wurde von dem deutschen Mathematiker Hermann Minkowski (1864 – 1909) geschaffen. Er führte spezielle Weg-Zeit-Diagramme ein, die **Minkowski-Diagramme** (siehe Bild), auf die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht intensiver eingegangen wird.

Am 21. September 1908 hielt Minkowski auf der 80. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Köln seinen berühmten Vortrag „**Raum und Zeit**“. Daraus stammt das prägnante Zitat:

„Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich zu Schatten herabsinken
und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbstständigkeit bewahren“.

Raum-Zeit-Diagramm relativistisch

Zukunft und Vergangenheit sind Richtungen der **Raumzeit**

Grafik: lernhelfer.de

Zukunfts- und Vergangenheitslichtkegel eines Ereignisses in der Gegenwart (E_0) unterteilen die Raumzeit in drei Regionen:

- **Region der absoluten Zukunft** eines Ereignisses ist der Bereich der Raumzeit innerhalb des Zukunfts-Lichtkegels. Ein Ereignis in der Gegenwart (E_0) kann prinzipiell ein Ereignis innerhalb des Zukunfts-Lichtkegels (E_2) beeinflussen ($E_0 \rightarrow E_2$). Ereignisse außerhalb des Zukunfts-Lichtkegels können durch Signale von E_0 nicht bemerkt und somit auch nicht beeinflusst werden.
- **Region der absoluten Vergangenheit** eines Ereignisses ist der Bereich der Raumzeit innerhalb des Vergangenheits-Lichtkegels. Ein Ereignis in der Vergangenheit (E_1), von dem ein Signal mit Lichtgeschwindigkeit oder darunter ausgeht, kann E_0 prinzipiell erreichen ($E_1 \rightarrow E_0$). Insofern erfasst dieser Bereich alle Ereignisse, die beeinflussen können, was in der Gegenwart E_0 geschieht. So bleibt das Kausalitätsprinzip gewahrt, das besagt: Eine bestimmte Ursache ruft eine bestimmte Wirkung hervor.
- **Region Anderswo** heißt der Bereich der Raumzeit, der weder im Zukunfts- noch im Vergangenheits-Lichtkegel der Gegenwart (E_0) liegt. Ein Ereignis in der Region Anderswo kann ein Ereignis E_0 weder beeinflussen noch von ihm beeinflusst werden.

Für jedes Ereignis in der Raumzeit (E_0) kann man einen Lichtkegel konstruieren.

Die Mantelfläche der Kegel beschreibt die Weltlinien von Objekten, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Beispiel: Flare* / Sonneneruption in diesem Augenblick, als koronaler Massenauswurf mit Teilchensturm in Richtung Erde (siehe rechtes Bild Seite 22):

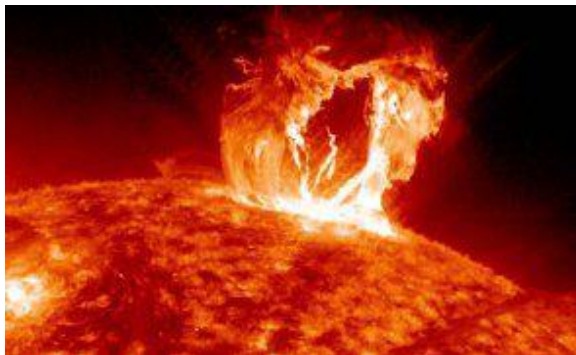


Bild: evz.ro/nasa-halloween-imagine-soare.html

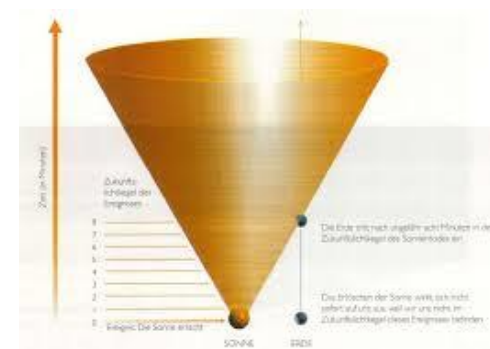


Bild: privat.marcolab.de (Spezielle Relativitätstheorie von Marco Möller)

Das Ereignis „Sonneneruption“ existiert für einen Erdbewohner zunächst nicht, weil es für ihn (noch) in der Region **Anderswo** ist (siehe Bild Seite 22). Erst nach gut acht Minuten tritt die Erde in den Zukunfts-Lichtkegel der 150 Millionen Kilometer fernen Sonne ein und das Licht des Flares erreicht den Beobachter auf der Erde nun in seiner Gegenwart als Ereignis E_0 (siehe Bild Seite 22). Bis zu diesem Zeitpunkt war das Licht, als Ereignis E_1 , in seinem Vergangenheits-Lichtkegel zu ihm unterwegs. E_0 ist Ort und Zeitpunkt, sprich **Raumzeitpunkt**, an dem der Stein in die Wasserfläche des Teiches tauchte.

*) Flare (engl., Fackel) werden einfache Plasma-Magnetfeldbögen auf der Sonne genannt. Kommt es zur Ablösung von Plasmaschläuchen, führt dies zu einem erhöhten Massenausstoß, der als koronaler Massenauswurf oder eruptive Protuberanz bezeichnet wird. In der Folge entstehen Teilchenstürme / Protonenschauer.

Das Licht des Flares bewegte sich zuvor als Weltlinie (E_1) längs der Mantelfläche des Vergangenheits-Lichtkegels in die Gegenwart E_0 des Beobachters auf der Erde und von dort weiter entlang der Mantelfläche seines Zukunfts-Lichtkegels als Ereignis E_2 . In diesem Fall kann E_2 von E_0 aus nicht beeinflusst werden, weil kein Signal schneller sein kann als Licht. Bemerkte man ein Lichtsignal, dann kann man es weder ein- und schon gar nicht überholen.

Licht, das in unsere Augen gelangt, erzählt und **immer** die Geschichte von dem
Raumzeitpunkt,
an dem es **entstanden** ist und sich zu uns auf den Weg gemacht hat.

Der von der Eruption ausgelöste Strom von Teilchen (Protonen, Elektronen, vereinzelt auch Kerne schwererer Elemente) bleibt mit Geschwindigkeiten bis 3000 km/s (normal 400 km/s) unterhalb der Lichtgeschwindigkeit. So gelangt das neue Ereignis E_1 „Teilchenstrom“ später, nach ein bis vier Tagen, vom Vergangenheits-Lichtkegel in die Gegenwart eines Beobachters auf der Erde als Ereignis E_0 und kann von ihm bemerkt werden, ggf. auch als Polarlicht. Die Weltlinien der Ereignisse E_1 / E_2 verlaufen dabei im Innern des Vergangenheits- bzw. Zukunftslichtkegels, da die Geschwindigkeit der Teilchen kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit. Theoretisch wäre das Ereignis E_2 dann von der Gegenwart E_0 aus zu beeinflussen, praktisch wohl kaum. Lassen Checks von Flares, z. B. mit Satelliten, Potential für einen Teilchensturm erkennen, können ggf. noch rechtzeitig Schutzmaßnahmen eingeleitet werden.

Sonnensturm von 1859 <https://www.youtube.com/watch?v=uqMvvOG9J8M> 7 min

Man kann auf der Erde nicht wissen, was sich momentan auf der Sonne tut. Wir sehen immer die Vergangenheit. Die Sterne, die wir am Nachthimmel sehen, sind nicht mehr an dem Ort, an dem wir sie „jetzt“ sehen und sehen „jetzt“ auch anders aus und vielleicht sind einige von ihnen schon explodiert, als Supernovae. Erinnert sei an den z. Zt. am weitesten entfernten Stern Earendel (siehe Seite 13, letzter Absatz).

So ist auch das Licht von Galaxien, das Astronominnen und Astronomen mit Teleskopen einsammeln, vor Jahrmillionen bzw. Jahrmilliarden losgelaufen. Und da sich alles bewegt im Universum und sich außerdem der Raum im Großen permanent ausdehnt, sind die Galaxien nicht mehr an dem Ort, an dem wir sie „jetzt“ sehen, mit unseren Teleskopen und sie sehen „jetzt“ auch anders aus, sei es dass sich inzwischen große Galaxien kleinere einverleibt haben und auch Galaxien miteinander verschmelzen oder auch schon verschmolzen sind.

c) Die Äquivalenz von Masse und Energie

Betrachtungen basieren hauptsächlich auf der Vorlesung "Die spezielle Relativitätstheorie" von Prof. Michael Folwer, University of Virginia, 2001.

Vorspann

Grundbegriffe der klassischen Dynamik und die Erhaltungssätze

→ **Impuls*** (\mathbf{p}) = Masse (\mathbf{m}) • Geschwindigkeit (\mathbf{v}): $\mathbf{p} = \mathbf{m} * \mathbf{v}$

Der Impuls \mathbf{p} hat einen **Betrag** und eine **Richtung** und ist demzufolge ein **Vektor**! Bei jeder Interaktion zweier Körper, sprich bei einem Stoßprozess, bleibt der gesamte Impuls erhalten. Das ist die Aussage des Impulserhaltungssatzes. Mathematisch ausgedrückt: Summe Impuls gleich Null → $\Sigma \mathbf{p} = 0$.

Beispiel: Wenn man auf reibungsfreien Rollschuhen steht und einen Ball voraus wirft, dann bewegt man sich rückwärts, da ein Rückstoß erzeugt wird. Man hat dann einen gleichgroßen Impuls wie der Ball, aber in der entgegengesetzten Richtung (Minuszeichen), sodass der Gesamtimpuls erhalten bleibt.

Auch Raketen im Weltall funktionieren nach dem Prinzip. Materie strömt mit hoher Geschwindigkeit aus der Rakete und die Rakete stößt gegen den Stoff, der aus ihr heraus strömt. Bei Raketen mit Wasserstoffantrieb ist das Wasserdampf. Dabei wird ein Rückstoß erzeugt, wie beim Wurf des vorgenannten Balls, gegen den man sich abstößt, wenn man ihn wirft. Ballwerfer bzw. Rakete werden beschleunigt: Drittes Newtonsches Gesetz → "actio = reactio".

→ **Kraft** (\mathbf{F}) = Masse (\mathbf{m}) • Beschleunigung (\mathbf{a}): $\mathbf{F} = \mathbf{m} * \mathbf{a}$ → Zweites Newtonsches Gesetz → „Krafteinwirkung verändert die Geschwindigkeit“.

Wenn man in die Formel statt der Beschleunigung \mathbf{a} die Änderungsrate der Geschwindigkeit einsetzt, das ist ja Beschleunigung, erhält man:

Kraft (\mathbf{F}) = Masse (\mathbf{m}) • Änderungsrate der Geschwindigkeit ($\Delta \mathbf{v} / \Delta t$)

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} * \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$

Aus der Definition des Impulses ($\mathbf{p} = \mathbf{m} * \mathbf{v}$) ergibt sich für ein Objekt mit konstanter Masse:

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta(\mathbf{m} * \mathbf{v})}{\Delta t}$$

So dass man für das zweite Newtonsche Gesetz auch definieren kann:

Kraft (\mathbf{F}) = Änderungsrate des Impulses ($\Delta \mathbf{p} / \Delta t$):

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}$$

*) Kann man sich als Stoß, Wucht oder Schwung vorstellen.

→ **Arbeit (W)** = Kraft (**F**) • Weg (**s**): $W = F \cdot s$

Arbeit im physikalischen Sinn wird dann verrichtet, wenn eine **Kraft** einen **Körper** schiebt oder zieht und sich der Körper in die Richtung bewegt, in der er geschoben bzw. gezogen wird.

→ **Energie**: Ist die in einem Körper gespeicherte Fähigkeit Arbeit zu verrichten.

Potentielle Energie (E_{pot}) = Masse (**m**) • Erdbeschleunigung (**g**) • Höhe (**h**)

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$

Beispiel: Wird auf der Erde ein Stein der Masse $m = 1,0 \text{ kg}$ auf $h = 1,0 \text{ m}$ Höhe gehievt, erhöht sich seine **potentielle** Energie um den Wert $E_{\text{pot}} = 9,81 \text{ J}$.
Rechnung: $E_{\text{pot}} = 1,0 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 1,0 \text{ m} = 9,81 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ bzw. J ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ist der Wert für die Erdbeschleunigung).

Kinetische Energie (E_{kin}) = (1/2) • Masse (**m**) • Geschwindigkeit zum Quadrat (**v²**)

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Beispiel: Fällt dieser Stein dann reibungsfrei zur Erde zurück, wird genau dieser Energiebetrag frei und in Arbeit/Wärme umgewandelt. Nach 1,0 m freien Fallens ist die Zeit $t = 0,45152 \text{ s}$ vergangen, der Stein hat die Geschwindigkeit $v = 4,42941 \text{ m/s}$ und die **kinetische** Energie beträgt $E_{\text{kin}} = 9,81 \text{ J}$.
Rechnung: $E_{\text{kin}} = 0,5 \cdot 1,0 \text{ kg} \cdot 4,42941^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 9,81 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ bzw. J.

Das Beispiel zeigt, dass die Energie erhalten bleibt, wie das der Energieerhaltungssatz aussagt. Der wurde aber erst lange nach Newton exakt formuliert, als den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern klar wurde, dass die durch Reibung erzeugte Wärme den Verlust beim Aufsummieren von kinetischer und potentieller Energie in realen dynamischen Systemen exakt ausgleichen konnte.

Einstein postulierte:

Die Erhaltungssätze gelten in allen Inertialsystemen

und analysierte die sich daraus ergebenden Konsequenzen!

Hierzu ein Gedankenexperiment:

Man denke sich, weit draußen im gravitationsfreien Weltraum, ein fiktives 3-D-Koordinatensystem mit den Achsen $x / y / z$ (siehe Bild), längs deren x -Achse sich die identischen Raumschiffe A und B mit der gleichen konstanten Geschwindigkeit diametral aufeinander zu bewegen und im Nullpunkt zusammenstoßen sollen. Die Raumschiffe schweben in der z -Ebene, mit etwas Versatz zur fiktiven x -Achse, aber in exakt gleichem Abstand zu ihr und zwar so, dass sie sich, bei der Kollision im Nullpunkt, leicht touchieren. Aus der Symmetrie* der Konstellation ergibt sich, scheinbar, dass der Impuls in alle Richtungen erhalten bleibt, d. h. der Gesamtimpuls ist Null. Zunächst die Frage:

Wie sieht Raumfahrer A die Situation?

Raumfahrer A sieht, vor der Kollision mit Raumschiff B, die x -Achse in konstantem Abstand seitlich an sich vorbei gleiten. Nach der Kollision stellt er fest, dass sich die x -Achse stetig von ihm entfernt, was wohl daran liegt, dass sein Raumschiff, in Folge der Kollision, eine Geschwindigkeitskomponente in z -Richtung aufgenommen hat. Für Raumfahrer B spielt sich das Geschehen, unter Umkehrung der Vorzeichen, identisch ab; denn die Konstellation ist ja völlig symmetrisch. Nächste Frage:

Wie symmetrisch ist diese Konstellation aber bei **genauem** Hinsehen?

Die **entscheidende** Frage lautet:

Wie schnell sieht Raumfahrer A das Raumschiff B sich von der fiktiven x -Achse entfernen und umgekehrt?

Angenommen die Relativgeschwindigkeit der Raumschiffe beträgt $v = 180.000 \text{ km/s}$, das entspricht einem β -Wert von $0,6 c$, dann bedeutet das, nach der speziellen Relativitätstheorie: Jeder Raumfahrer sieht die Zeit auf der Uhr des anderen um den eigenen Lorentz-Faktor, $\gamma = 1,25$, langsamer vergehen (siehe Beispiel ICE in Excel-Tab. Sammelsurium Seite 2).

Sichtweise Raumfahrer A:

Wenn Raumfahrer B sagt, dass er sich, z. B. in einer Sekunde, 15 Meter von der x -Achse entfernt, dann wird Raumfahrer A, da in der z -Richtung keine Relativbewegung existiert und folglich auch keine Lorentz-Kontraktion, über diese 15 Meter mit ihm übereinstimmen. Keine Übereinstimmung gibt es aber hinsichtlich der Zeit, dieser einen Sekunde; denn die vergeht aus Sicht des Raumfahrers A im Raumschiff B um den Lorentz-Faktor $\gamma = 1,25$ langsamer. Auf seiner Uhr sind bereits 1,25 Sekunden vergangen, wenn sich Raumschiff B die 15 Meter von der x -Achse weg bewegt hat. Aus der Zeitdehnung ergibt sich somit, dass aus Sicht des Raumfahrers A mit dem Anprall keine zwei identischen Geschwindigkeitskomponenten in z -Richtung resultieren. Er sieht wie sich Raumschiff B mit $v = 12 \text{ m/s}$ ($= 15 \text{ m/s} / 1,25$) von der x -Achse entfernt und nicht, wie er selbst, mit $v = 15 \text{ m/s}$.

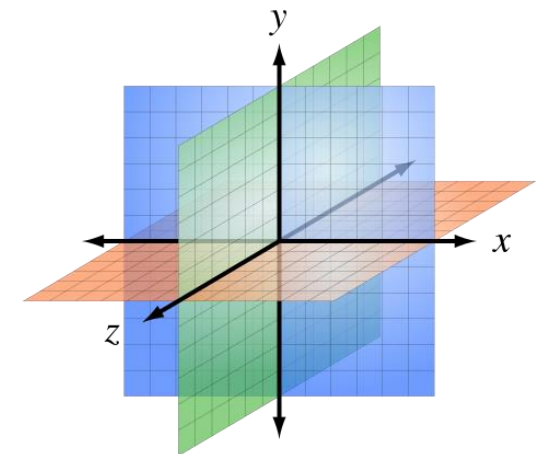


Bild: [wikipedia.org](https://www.wikipedia.org).

*) **Symmetrie ist das Verschwinden von Unterschieden**, nichts ist bevorzugt. Symmetrien sind energieärmer; gehen sie kaputt, dann wird Energie frei (Eis \rightarrow Wasser).

Sichtweise Raumfahrer B:

Er erlebt die Situation genau umgekehrt, spiegelbildlich, unter umgekehrten Vorzeichen. Für ihn geht die Uhr des Raumfahrers A langsamer und das Raumschiff A entfernt sich mit $v = 12 \text{ m/s}$ von der x -Achse, während er sich, im Raumschiff B, mit $v = 15 \text{ m/s}$ von ihr weg bewegt.

Wie lässt sich aber dann argumentieren, dass der Gesamtimpuls nach dem Zusammenstoß erhalten bleibt, wenn beide Raumschiffe, jeweils aus Sicht ihrer Besatzung, zwar entgegengesetzt gerichtete, aber keine gleichgroßen Geschwindigkeitskomponenten in z -Richtung aufweisen? Für einen Dritten, der den Zusammenstoß von der y -Achse aus vertikal zum Stoßpunkt beobachtet, ist aber vollkommene Symmetrie gegeben und die Geschwindigkeitskomponenten weisen für ihn den gleichen Betrag auf ($v = 15 \text{ m/s}$). Einstein war sich sicher, dass auch die Impulserhaltung ein allgemeingültiges Prinzip sein muss, das er mit der Hypothese rettete:

Die **träge** Masse eines Körpers hängt von seiner Geschwindigkeit ab!

Die Masse eines Objektes muss demnach in einer solchen Art und Weise mit der Geschwindigkeit zunehmen, dass sich die geringere Geschwindigkeit in der y -Richtung, die sich aus der Zeitdehnung ergibt, bei der Berechnung des Impulses **genau** ausgleicht. Das bedeutet dann, dass ein Körper, der im Ruhezustand die Masse m_0 hat, bei der Relativ-Geschwindigkeit v die dynamische oder relativistische Masse

$$m_{\text{rel}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{bzw.} \quad m_{\text{rel}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{bzw.} \quad m_{\text{rel}} = m_0 \cdot \gamma$$

haben muss. Nähert sich ein Objekt der Lichtgeschwindigkeit, wächst seine träge Masse letztlich ohne Grenzen an. **Siehe Excel-Tab. Sammelsurium S. 6.**

Die theoretische Vorhersage der dynamischen Massenzunahme wurde 1908 von dem deutschen Physiker Walter Kaufmann (1871 – 1947) bestätigt, als er die Masse von schnellen Elektronen in einer Vakuumröhre gemessen hat. In Teilchenbeschleunigern werden heute Geschwindigkeiten erreicht, bei denen die relativistische Masse der Teilchen viele Tausende Mal größer ist als ihre in Ruhe ermittelten Werte, die man **Ruhemasse** m_0 nennt.

Kinetische Energie und Masse von sehr schnellen Teilchen

Die kinetische Energie von **nicht** sehr schnellen Teilchen errechnet sich, wie auf Seite 22 schon gezeigt, nach der Formel:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Im Beispiel auf Seite 22 wurde ein Stein der Masse $m = 1 \text{ kg}$ mit der konstanten Kraft $F = m \cdot g = 9,81 \text{ N}$ auf die Höhe $h = 1,0 \text{ m}$ gehoben und dann fallen gelassen, wobei die potentielle Energie wieder frei und in kinetische Energie umgewandelt wurde.

Allgemeiner kann man die Masse m auch mit einer konstanten Kraft $F = m \cdot a$ beschleunigen um die Arbeit $W = F \cdot s$ herauszufinden, die von der Kraft F verrichtet werden muss, um einen Körper aus dem Stand auf die Geschwindigkeit v zu beschleunigen.

Bewegt sich ein Körper bereits mit der Geschwindigkeit u und soll auf eine höhere Geschwindigkeit v gebracht werden, dann errechnet sich die nötige Arbeit W für den Beschleunigungsvorgang zu:

$$W = \frac{1}{2} m * v^2 - \frac{1}{2} m * u^2$$

Das zweite Newtonsche Axiom (Krafteinwirkung verändert die Geschwindigkeit) gilt auch hier, wie auf Seite 21 dargelegt, in der Form:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \text{oder} \quad \text{Kraft} = \text{Änderungsrate des Impulses}$$

Aber in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit erhöht sich die Geschwindigkeit des Teilchens kaum noch, so dass man mit guter Näherung auch sagen kann:

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} * c \quad \text{oder} \quad \text{Kraft} = (\text{Änderungsrate der Masse}) * c$$

Annahme: Ein Teilchen der Ruhemasse m_0 wird mit einer konstanten Kraft F angeschoben, sprich beschleunigt und hat nach einer gewissen Zeit t [s] eine Geschwindigkeit v erreicht, die nahe an die Lichtgeschwindigkeit c heran reicht. Die Masse, die dieser Geschwindigkeit entspricht, sei mit M ($> m_0$) bezeichnet. Nach einer Sekunde ($t + 1$ s) ist die Masse des Teilchens auf den Betrag $M + m$ angewachsen (gemäß der oben angeführten Hypothese Einsteins), wobei m die Massezunahme ist, die das Teilchen in der einen Sekunde erfahren hat. Die Erhöhung der Geschwindigkeit des Teilchens innerhalb dieser einen Sekunde ist aber nur minimal, weil seine Geschwindigkeit schon so sehr hoch ist und daher vernachlässigbar.

Frage: Um welchen Betrag ist die kinetische Energie E_{kin} des Teilchens während dieser einen Sekunde angewachsen? Es ist ganz einfach die Arbeit, die die Kraft F in dieser Sekunde verrichtet hat. Da sich die Masse des Teilchens in der einen Sekunde um den Betrag m erhöht hat, ist m demzufolge die Änderungsrate für die Masse

$$m = \frac{\Delta m}{\Delta t} * c$$

So kann man, ausgehend vom 2. Newtonschen Axiom "Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional..." in der Form

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} * c \quad \text{auch schreiben:} \quad F = m * c$$

Die Zunahme der kinetischen Energie E_{kin} über diese eine Sekunde entspricht genau der Arbeit, die von der Kraft F verrichtet wurde:

$$E = F * s$$

Da sich das Teilchen annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, beträgt die zurückgelegte Wegstrecke, über die die Kraft während der einen Sekunde wirkt, nur minimal weniger als 299.792.458 Meter. Daher beläuft sich die gesamte Arbeit, die während dieser Sekunde verrichtet wird, auf:

$$E = F \cdot s = m \cdot c \cdot c = m \cdot c^2$$

Daher lautet die Beziehung der Massenzunahme eines relativistischen Teilchens und seiner Zunahme an kinetischer Energie:

$$E = m \cdot c^2$$

Das ist Einsteins berühmte Formel! - Die berühmteste Formel der Welt!

$E = m \cdot c^2$ <https://www.youtube.com/watch?v=U-ssl6jZxi4> Physik - simpleclub, 4,5 min.

Die Ruhe-Energie

Die Tatsache, dass die Masse eines Körpers zunimmt wenn man ihm Energie zuführt legt nahe, dass die Ruhemasse m_0 eines Körpers multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat (c^2) ein Maß für die Energiemenge ist, die in dem ruhenden Körper gespeichert ist. Dass dem so ist kann man u. a. an Elementarteilchen beobachten, z. B. wenn Elektron (Materie) und Positron (Antimaterie) mit geringer Geschwindigkeit kollidieren, so dass praktisch keine kinetische Energie im Spiel ist. Sie zerstrahlen direkt und komplett in einem Lichtblitz und wandeln ihre gesamte Materie in elektromagnetische Strahlung um, die Vernichtungsstrahlung genannt wird.

Beispiel: Die Ruhemasse Elektron / Positron ist identisch und beträgt $m_{e_0} = 9,1093826 \cdot 10^{-31}$ kg, die Lichtgeschwindigkeit beträgt $c = 299792458$ m/s. Die freigesetzte Strahlungsenergie, die bei Berührung der beiden Teilchen frei wird, errechnet sich zu:

$$\begin{aligned} E &= 2 \cdot m_{e_0} \cdot c^2 \\ &= 2 \cdot 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 299792458^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 2 \cdot 8,18710 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 2 \cdot 510999 \text{ eV} \quad (1 \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}) \end{aligned}$$

$$E = 2 \cdot 0,511 \text{ MeV}$$

Die Ruheenergie eines Elektrons / Positrons beträgt 0,511 MeV. Werte für Proton und Neutron siehe [Excel-Tab. Physik. Konstanten, Seite 4](#).

3) Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

Betrachtungen basieren auf den Büchern „ $E = m \cdot c^2$ “ von Thomas Bührke und "Einstein light" von Martin Kornelius.

a) Mit Einsteins Äquivalenzprinzip zu einer neuen Theorie der Gravitation

Die Allgemeine Relativitätstheorie wurde am 25.11.1915 in den Sitzungsprotokollen der Preußischen Akademie der Wissenschaften veröffentlicht. Sie ist umfassender als die spezielle Relativitätstheorie, weil sie auch die Relation (Beziehung) von Inertialsystemen beschreibt, die in beschleunigter Bewegung zueinander sind, was ja weit häufiger der Fall ist. Auch ein Gravitationsfeld, beispielsweise das Schwerfeld der Erde, entspricht einem beschleunigten Bezugssystem. Einstein kam auf diesen Gedanken Ende Oktober / Anfang November 1907 und erinnert sich später an diesen Tag so:

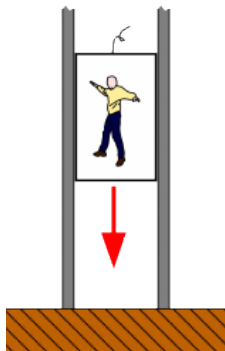
"Ich saß auf meinem Stuhl im Patentamt in Bern. Plötzlich hatte ich einen Einfall. Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, wird sie ihr Gewicht nicht spüren. Ich war verblüfft. Dieses einfache Gedankenexperiment machte auf mich einen tiefen Eindruck. Es führte mich zu einer Theorie der Gravitation."

Gedankenexperiment: Eine Person fährt im Fahrstuhl und plötzlich reißt das Zugseil. Ab diesem Moment spürt die Person die Schwerkraft nicht mehr, weil sich Fahrstuhl, samt Inhalt, im freien Fall befinden. Diesen Zustand kann man, für kurze Zeit, auch im Free-fall-tower im Holiday-Park erleben: Man ist schwerelos. Umgekehrt ergeht es dem Astronaut, der im Raumschiff schwerelos im All treibt, wenn der Raketenantrieb zündet. Bei der Beschleunigung von $a = 9,81 \text{ m/s}^2$, das entspricht der Erdbeschleunigung g , wird er sein Gewicht spüren, gerade so, als sei er auf der Erde, wo deren Gravitationsfeld wirkt. Einstein hat aus einer solchen Konstellation das

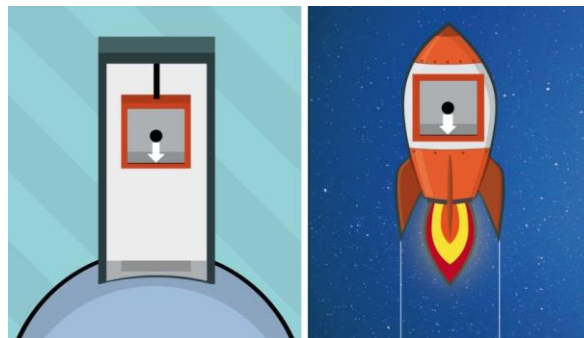
Äquivalenzprinzip

ersonnen, das Dreh- und Angelpunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie ist und besagt, dass in Bezug auf die Schwere von Materie nicht unterschieden werden braucht ob ein Gravitationsfeld die Ursache ist oder ein Beschleunigungsvorgang. Die physikalischen Abläufe sind in beiden Fällen gleich:

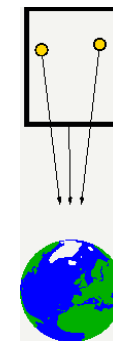
Gravitation und Beschleunigung haben denselben Effekt!



Grafiken: einstein-online.info



Spiegel.de



einstein-online.info

Nach diesem Prinzip kann eine Person, die sich in einem hermetisch abgeschlossenen Container aufhält, durch (fast) kein Experiment herausfinden, ob dieser auf der Erde steht oder im gravitationsfreien All mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ beschleunigt wird. Hält die Person einen Gegenstand in der Hand und lässt ihn los, dann schlägt er in beiden Fällen nach Ablauf der gleichen Zeitspanne auf dem Boden des Containers auf (**Bild Mitte**).

Bewegt sich der Container nun im freien Fall auf ein Gravitationszentrum zu, so kommen **Gezeitenkräfte** ins Spiel. Körper, z. B. zwei Kugeln (**Bild rechts**), bewegen sich dann horizontal aufeinander zu und ihr vertikaler Abstand vergrößert sich, weil die untere Kugel schneller fällt, da sie dem Schwerezentrum näher ist und folglich stärkerer Anziehung unterliegt. So wird ein kugelförmig kompakter Haufen von Körpern in eine ovale (Ei-)Form übergehen, deren spitzes Ende zum Schwere-Zentrums weist. Also kann die Person im Container folgern, dass ein massives Objekt in der Nähe sein muss, z. B. die Erde.

Dieses Gedankenexperiment zeigte Einstein, dass es prinzipielle Gemeinsamkeiten gibt zwischen einer beschleunigten Bewegung und der Schwerkraft und das war schließlich der Ausgangspunkt für ein erweitertes und tieferes Verständnis von Trägheit und Gravitation.

Das Äquivalenzprinzip stellt eine Verbindung her zwischen einer beschleunigten Bewegung und einem Gravitationsfeld.

Damit war der Grundstein gelegt für die mathematische Formulierung einer neuen Gravitationstheorie, deren Basis zwei Aussagen sind:

Es gibt keinen absoluten Raum im Newtonschen Sinne und Massen bestimmen die Geometrie des Raumes.

Die mathematische Fassung dieser Aussagen ist
Einsteins Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie,
ein System von 10 nicht linearen partiellen Differentialgleichungen:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} * g_{\mu\nu} * R = -\kappa * T_{\mu\nu} \quad | \quad \text{wobei } \kappa = \frac{8 * \pi * G}{c^4} \text{ die Einstein'sche Gravitationskonstante ist.}$$

- **$R_{\mu\nu}$** : Ricci – Tensor, repräsentiert die Raumkrümmung und damit die Stärke des Gravitationsfeldes.
- **$g_{\mu\nu}$** : Metrischer Fundamental – Tensor: Potential für das gravische Feld und das Trägheitsfeld; **R** ist Ricci – Skalar.
- **$T_{\mu\nu}$** : Energie – Impuls – Tensor: Energiedichte, Impulsdichte und Spannungsdichte aller physikalischen Körper, die nicht geomtrisch sind.
- **G** ist die Gravitationskonstante.
- **c** ist die Lichtgeschwindigkeit.

Der Ausdruck links des Gleichheitszeichens steht für die Geometrie des Raumes, d. h. für das Gravitationsfeld und auch für die metrische Struktur des Raumzeitkontinuums. Der Ausdruck rechts des Gleichheitszeichens steht für die Masse im Raum. Die Gleichungen beschreiben dementsprechend die Raumzeitkrümmungen in Abhängigkeit von der vorhandenen Masse. Nach der ART ist die Newtonsche Schwerkraft also **nur** das Resultat der Krümmung des Raumes, genauer der Raumzeit. Das besagt u. a.: Die vierdimensionale Raumzeit **zwingt** Körper auf bestimmte Bahnen. Griffig formuliert heißt das:

Der freie Fall ist (nicht die Folge einer Kraftwirkung, die einen hinab zieht, sondern) **ein unsichtbares Gefälle im Stoff des Universums, das einen hinabgleiten lässt** (bis man festen Boden unter den Füßen hat).

Man kann auch sagen:

Massen werden in Zonen langsamer vergehender Zeit hineingezogen.

Die erste Prüfung für die Richtigkeit der ART gelang Einstein am 18.11.1915 selbst: "Erklärung der Perihel-Bewegung des Merkur` aus der allgemeinen Relativitätstheorie" von A. Einstein. Und 1916, ein Jahr nach Publikation der ART, hatte Karl Schwarzschild bereits die erste Lösung der Einstein'schen Feldgleichung gefunden und zwar für ein **nicht** rotierendes Schwarzes Loch. **Siehe auch Excel-Tab. Sammelsurium S. 4.**

Einsteins Erklärung der Perihel-Bewegung <https://www.kritik-relativitaetstheorie.de/Anhaenge/Einstein-Perihelbewegung-Merkur.pdf> 8 Seiten

Einstein hatte 1918 auch die Existenz von **Gravitationswellen** vorhergesagt aber nicht geglaubt, dass man sie je wird nachweisen können. Sie entstehen wenn **Massen beschleunigt** werden. Dabei werden **Quadrupol-Wellen*** in der Struktur der Raumzeit erzeugt, die sich **mit Lichtgeschwindigkeit** in alle Raumrichtungen ausbreiten. Diese „**Schwingung der Raumzeit**“ verläuft senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (wie beim Licht). Die erste direkte Messung gelang Forschenden der LIGO-Kollaboration (**Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory**) am **14.09.2015 / 10:50:45 Uhr** (Ortszeit Hannover), wie am 11.02.2016 offiziell mitgeteilt wurde; Physik-Nobelpreis 2017 erhielten Rainer Weiss, Barry Barish, Kip Thorne für „... entscheidende Beiträge ...“.

Die beim LIGO-Projekt detektierten Gravitationswellen sind vor 1,3 Milliarden Jahren durch Fusion zweier schwarzer Löcher von 29 u. 36 Sonnenmassen (M_{\odot}) zu einem schwarzen Loch von $62 M_{\odot}$ entstanden. Bei diesem Ereignis wurde, innerhalb von 0,2 Sekunden, die Differenz von drei M_{\odot} vollständig in Energie umgewandelt. Die somit ausgelösten Gravitationswellen stauchen und strecken vorübergehend die Abstände innerhalb des passierten Raumbereichs, hier in Protonen-Stärke ($1,7 \cdot 10^{-15}$ m). Zum Vergleich: Ein vier Lichtjahre langer Stahlträger würde sich nur um Haaresbreite verlängern. Für die Erde besteht praktisch keine Gefahr, solange solche Kollisionen nicht innerhalb weniger Lichtjahre stattfinden, laut ChatGPT. Siehe auch auf Seite 50.

Anfänglich gab es schon Skepsis betreffs der ART. So richtig angenommen wurde sie erst, als es Eddington im Jahr 1919 gelang, die nach der Theorie vorausberechnete Ablenkung des Lichts ferner Sterne, im Gravitationsfeld der Sonne, experimentell zu bestätigen (siehe Seite 30 letzter Absatz). Doch auch ohne allzu komplizierte Mathematik lassen sich, allein durch **konsequente** Anwendung des Äquivalenzprinzips, interessante Phänomene herleiten.

Die Zeit vergeht in einem Gravitationsfeld langsamer!

Gedankenexperiment: Eine Lichtuhr befindet sich in gravitationsfreier Umgebung und löst pro Sekunde einen Lichtblitz aus. Ein Beobachter, der relativ zur Uhr in Ruhe ist, empfängt die Lichtsignale dann im Sekundentakt. Entfernen sich nun Uhr und Beobachter **beschleunigt** voneinander weg, so werden die räumlichen und somit auch zeitlichen Abstände zwischen den Lichtpulsen größer und größer und das Licht der Blitze trifft in immer späterer Abfolge beim Beobachter ein. Folglich geht für ihn die Lichtuhr langsamer, d. h. sie geht nach. Und das tut sie auch in einem Gravitationsfeld! Denn gemäß dem Äquivalenzprinzip haben Beschleunigung und Gravitation denselben Effekt, wie auf Seite 31 erörtert und dieser ist proportional zur Gravitationsfeldstärke.

*) Eine **Quadrupol-Welle** entsteht, wenn sich eine **Masseverteilung** periodisch in zwei senkrechten Richtungen verformt: In der einen Richtung wird der Raum gedehnt, gleichzeitig wird er in der dazu senkrechten Richtung **gestaucht**. Danach tauschen sich die Richtungen. Das passiert abwechselnd, während sich die Welle ausbreitet. In der Physik beschreibt man Strahlung oft danach, welche Form die zeitliche Änderung der Massen- oder Ladungsverteilung hat: **Monopol** → Gesamtmenge ändert sich zeitlich; physikalisch **nicht möglich**, Erhaltungssätze würden verletzt (z. B. Erhaltung Masse, ect.). Monopol-Strahlung ist dennoch ein legitimes mathematisches Konzept, dass durch die Erhaltungssätze in der Natur unterdrückt wird. **Dipol** → Schwerpunkt bewegt sich, z. B. Elektronen in einer Antennenstange schwingen hin u. her (oszillierender elektrischer Dipol → Radio, Licht, ..., Dipolstrahlung ist am häufigsten). **Quadrupol** → Form verformt sich, hier Länge und Breite. Gravitationswellen erzeugt auch die Erde beim Umlauf um die Sonne, im Jahresrhythmus. Die Zentrifugalbeschleunigung sorgt dafür, dass sich die Richtung der Umlaufgeschwindigkeit laufend ändert. **Quelle: ChatGPT.**

So ist auch die Erde Sphäre um Sphäre von gedehnter Zeit und gekrümmtem Raum eingehüllt. Daher tickt eine Uhr auf dem Mount Everest schneller als auf Meereshöhe. Im gravitationsfreien Weltall vergeht die Zeit am schnellsten; eine Uhr dort geht um den Faktor 1,000000000696 schneller als auf der Erde (NN). Am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ist die Gravitation so enorm hoch, dass von dort nicht mal mehr Licht entkommen kann. Eine Uhr dort steht, aus Sicht eines Beobachters außerhalb, still, d. h. für ihn vergeht dort keine Zeit und so nimmt er auch keinerlei Veränderung wahr.

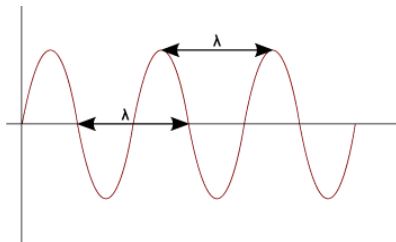
Ein weiteres Gedankenexperiment liefert eine plausible Erklärung für die Zeitdehnung im Gravitationsfeld: Im gravitationsfreien All treibt schwerelos eine Rakete, in deren Innerem, an Boden und Decke, jeweils eine Uhr montiert ist, die sich simultan Lichtpulse zusenden. Ein in der Mitte des Raumes fixierter Beobachter empfängt die Signale dann gleichzeitig. Wird das Raumschiff nun in Richtung Decke beschleunigt, zieht der Beobachter den Signalen der unteren Uhr davon und eilt den Signalen der oberen Uhr entgegen. Also treffen die Signale der unteren Uhr später und die der oberen Uhr früher bei ihm ein. Ergo geht die Uhr am Boden für ihn nach und die Uhr an der Decke vor. Laut Äquivalenzprinzip ist das in einem Gravitationsfeld auch so. **Kurzum:**

Gravitation verändert die Zeit. Das machen die anderen drei Kräfte nicht (Elektromagnetische Kraft, starke und schwache Kernkraft (später dazu mehr).

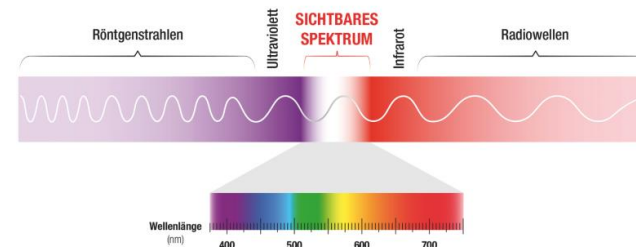
Eine weitere Vorhersage der ART lautet:

Elektromagnetische Wellen erfahren im Gravitationsfeld eine Rot- bzw. Blauverschiebung!

Elektromagnetische Wellen, also auch Licht, kann als Folge von Wellenbergen und Wellentälern aufgefasst werden. Wellen sind durch ihre Frequenz f (Anzahl der pro Sekunde beim Beobachter ankommenden Berge / Täler) und ihre Wellenlänge λ (Abstand zwischen zwei Bergen / Tälern) charakterisiert. Frequenz f und Wellenlänge λ sind über die Lichtgeschwindigkeit c mathematisch verknüpft: $c = f \cdot \lambda \rightarrow f = c / \lambda$ bzw. $\lambda = c / f$.



Grafik: Uni Wien



Grafik: zwp-online.info

Eine **Rot-** / **Blau**verschiebung tritt bei Relativbewegungen von Lichtquelle und Beobachter auf. Entfernen sich Lichtquelle und Beobachter voneinander, dann wird die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts größer und somit in den roten Bereich des Lichtspektrums verschoben. Bewegen sich Lichtquelle und Beobachter aufeinander zu, wird die Wellenlänge kleiner und in den blauen Bereich verrückt. Das ist der **optische Dopplereffekt!**

Von diesem zu unterscheiden ist der **relativistische Dopplereffekt**, der dann eintritt, wenn sich Lichtquelle und Beobachter **beschleunigt** voneinander weg oder aufeinander zu bewegen, z. B. der Feuerstrahl einer Rakete, die von der Erde aus in den Orbit zu einer Raumstation startet. Aus der Sicht eines Zuschauers auf der Erde wird der Abstand der Wellenfolge Berg-Tal-Berg-Tal- ... des Lichts dann immer größer, d. h. die Wellenzüge werden gedehnt und zwar proportional zur Beschleunigung der Rakete. Der Zuschauer sieht langwelliger werdendes Licht mit abnehmender Frequenz, das energieärmer und in den roten Spektralbereich verschoben wird. Die Crew der Raumstation indes sieht den Feuerschein der Rakete beschleunigt auf sich zukommen und registriert kurzwelliger werdendes Licht mit zunehmender Frequenz, das energiereicher wird und eine Blauverschiebung erfährt.

Nach dem Äquivalenzprinzip geschieht das in einem Gravitationsfeld auch so. Schießt z. B. der Schütze Kurt Donhauser vom Schützenverein Wicker mit seinem Gewehr vom Erdboden aus lotrecht und „reibungsfrei“ gen Himmel, nehmen Geschwindigkeit und kinetische Energie des Projektils mit steigender Höhe ab, bis die Werte Null ergeben und die potentielle Energie ihr Maximum erreicht hat. Fällt das Projektil dann beschleunigt wieder zur Erde, wird die potentielle Energie in kinetische Energie zurückverwandelt und es kehrt, mit Mündungsgeschwindigkeit, in den Gewehrlauf zurück (Energie-Erhaltung!).

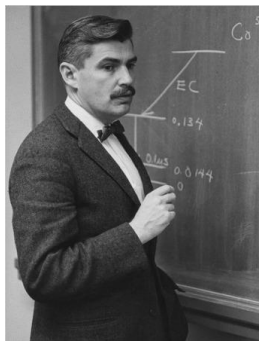
Steigt nun Licht in einem Gravitationsfeld auf, nimmt zwar die Energie der Strahlung ab, nicht aber die Lichtgeschwindigkeit, da sie mit $c \approx 300.000 \text{ km/s}$ ja konstant bleibt. Mit der Energieabgabe wird aber die Wellenlänge des Lichts größer und seine Frequenz kleiner, sodass das Licht eine Verschiebung in den roten Spektralbereich erfährt. Steigt Licht in einem Gravitationsfeld ab, dann nimmt seine Energie zu, die Wellenlänge wird kürzer, die Frequenz wird höher und das Licht wird ins blaue Spektrum verschoben. Fazit:

- **Gravitations-Rotverschiebung (redshift):** Je weiter sich eine Lichtquelle vom Gravitationszentrum entfernt, umso kleiner wird die Gravitationsfeldstärke und umso größer die Wellenlänge und umso niedriger werden Frequenz und Energie der Lichtstrahlung.
- **Gravitations-Blauverschiebung (blueshift):** Je mehr sich eine Lichtquelle einem Gravitationszentrum nähert, umso größer wird die Gravitationsfeldstärke und umso kürzer die Wellenlänge und umso größer werden Frequenz und Energie der Lichtstrahlung.

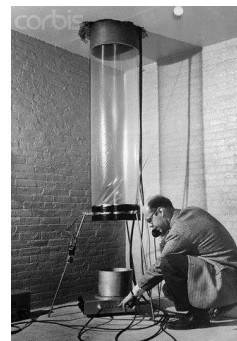
Hat Licht ein Gewicht? Prof. H. Lesch <https://www.youtube.com/watch?v=J9x9ImH21Os> 8 min

Die von Einstein vorhergesagte Gravitations-Rot- / Blau-Verschiebung in einem Gravitationsfeld wurde 1960 auf dem Campus der Harvard Universität durch einen Versuch der Physiker Robert Pound und Glen Rebka mittels des Mößbauer-Effekts experimentell nachgewiesen (Pound-Rebka-Experiment). Als der Mößbauer-Effekt (Rudolf Mößbauer (1929 – 2011), deutscher Physiker, Nobelpreis 1961) wird die rückstoßfreie Kernresonanzabsorption von Gammastrahlung bezeichnet. Es handelt sich hierbei um eine extrem empfindliche Messmethode, die **Mößbauerspektroskopie**, für die Energieänderung von Gamma-Quanten. Dazu muss sich der Strahlung emittierende Atomkern in einem **Kristallgitter** befinden, das den Rückstoß übernehmen kann und durch seine große Masse dem Gammaquant kaum Energie entzieht, so dass ein nahezu vollkommen unelastischer Stoß erzeugt wird.

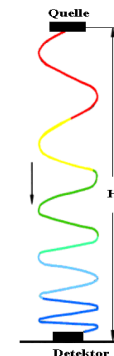
Für ihren Versuch verwendeten Pound und Rebka den nur 22 m hohen Jefferson-Turm an der Harvard University. Am Anfang des Experiments war die Gamma-Strahlen-Quelle am Boden positioniert (**Rotverschiebung**) und darauffolgend oben im Turm (**Blauverschiebung**).



Robert Pound (1919 – 2010)



Glen Rebka (1931 – 2015) beim Versuch im Jahr 1960



Grafik: leifi-physik.de

Eine weitere Vorhersage der ART sagt:

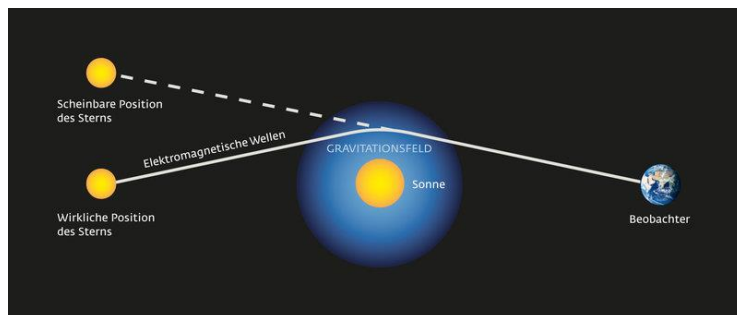
Ein Lichtstrahl wird im Gravitationsfeld von seiner Bahn abgelenkt!

Gedankenexperiment: Eine Rakete treibt schwerelos im Weltraum. In der Wand ihres Innenraums sei eine Lichtquelle installiert, von der ein parallel zum Boden der Rakete verlaufender Lichtstrahl auf die gegenüberliegende Wand geworfen wird. Wird die Rakete nun beschleunigt, dann trifft das Licht des Strahls die Wand unterhalb des ursprünglichen Ziel-/Treff-Punktes, weil es ja Zeit benötigt um bis dorthin zu gelangen, während ihm der Raketenboden entgegen kommt. Ein Beobachter, der auf Augenhöhe seitwärts zum Strahl positioniert ist sieht dann, wie der anfänglich „horizontale“ Lichtstrahl nach „unten“ abgelenkt wird und zwar proportional zur Beschleunigung der Rakete, d. h. in Form einer Wurfparabel.

Nach dem Äquivalenzprinzip erfährt ein Lichtstrahl in einem vergleichbaren Gravitationsfeld die gleiche Abbiegung. Der Nachweis gelang erstmals einem Forscherteam unter Leitung des britischen Astrophysikers Sir Arthur Eddington (1882 – 1944). Bei der Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 fotografierte sein Team, an der Westküste Afrikas, die vom Mond verdeckte Sonnenscheibe, durch ein Teleskop. Zurück in England wertete Eddington die Fotoplatten aus. Resultat: Die von Einstein vorausberechnete Ablenkung des Lichts ferner Sterne im Schwerfeld nah der Sonne, von 1,75 Bogensekunden, war bestätigt. Nach offizieller Bekanntgabe durch die Royal Society und Royal Astronomical Society, in der gemeinsamen Sitzung am 06.11.1919, berichtete an den Tagen darauf die Weltpresse und Einstein gelangte „über Nacht“ zu Weltruhm. **Die Allgemeine Relativitätstheorie hatte ihren Test bestanden!**

Das o. a. Lichtstrahl-Gedankenexperiment kann man sich noch einleuchtender denken und zwar so, dass an Stelle des Lichtstrahls eine Gewehr- oder Handgranate „horizontal“ auf die gegenüberliegende Wand geschossen oder ein x-beliebiger Gegenstand (Ball, Stein, ...) geworfen wird. Ab dem Moment, an dem sich Gewehr- oder Handgranate bzw. Wurfgegenstand von der Raketenwand entfernen, bewegen sich Wand und Boden der Rakete beschleunigt nach „oben“ und die zuvor anvisierte horizontale Wurf-Gerade geht in die adäquate Wurf-Parabel über und zwar so, wie das in einem vergleichbaren Gravitationsfeld geschieht.

Jetzt wird auch so richtig klar, warum alle Körper, unabhängig von ihrer Masse, in einem Gravitationsfeld, wie beispielsweise dem Schwerfeld der Erde, gleich schnell fallen, im Vakuum natürlich: Den schwebenden Objekten im Innern einer schwerelos im All treibenden Rakete kommt, mit der Zündung des Triebwerks, der Raketenboden entgegen und die Gegenstände schlagen auf diesem auf. Wird die Rakete mit der Erdbeschleunigung von $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ angetrieben, ist die Situation für die Objekte äquivalent zum Fallen aus einer entsprechenden Höhe auf dem Erdboden.



Grafik: www.mpg.de



Einstein und Eddington im Jahr 1930

b) Die Krümmung der Raumzeit

Ausführungen basieren wesentlich auf dem Buch " $E = m \cdot c^2$ " von Thomas Bührke.

Die Vorstellung von einem gebogenen Lichtstrahl birgt allerdings ein Problem in sich. Angenommen der Lichtstrahl hat eine bestimmte Dicke, dann hat das Licht an der Außenbiegung des Strahls eine längere Distanz zurückzulegen als an seiner Innenbiegung. Das ist wie beim 400 m Lauf im Sportstadion; die Läufer auf den äußeren (längeren) Bahnen starten weiter vorne als ihre Konkurrenten auf den inneren (kürzeren) Bahnen und zwar so, dass alle gleich lange Wege ins Ziel haben. Laufen alle Läufer gleich schnell, dann kommen auch alle Läufer gleichzeitig im Ziel an. Kommt nun Licht von einem gebogenen Lichtstrahl gleichzeitig im Auge eines Beobachters an, dann müsste es sich, auf der Innenseite des Strahls, mit geringerer Geschwindigkeit bewegt haben als auf der Außenseite. Das widerspricht jedoch dem Postulat der Speziellen Relativitätstheorie (SRT), nach dem die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen gleich ist. Und wieder war es ein Gedankenexperiment, das Einstein zur Lösung des Problems geführt hat.

Der Umfang U eines Kreises errechnet sich klassisch, also gemäß euklidischer Geometrie „der Ebene“, nach der Formel $U = 2 \cdot R \cdot \pi$ (π); R steht für den Radius des Kreises und $\pi = U / 2 \cdot R = 3,14 \dots$ ist das allseits bekannte Verhältnis vom Umfang eines Kreises zu seinem Durchmesser (siehe [Excel-Tabelle „Physik. Konstanten“](#)). Wenn nun eine kreisrunde Scheibe (S') um ihre Mittelachse rotiert, dann zeigt sich, nach SRT, die Peripherie der Scheibe einem außerhalb ruhenden Beobachter (S) kontrahiert, denn: „**Relativ zum Beobachter bewegte Körper sind für ihn in Bewegungsrichtung verkürzt**“.

Radius und Dicke der Scheibe sieht er indes nicht gemindert, da hier, aus seiner Sicht, keine Relativbewegungen vorliegen. Entsprechendes gilt für die Zeit. So geht eine Uhr an der Peripherie der rotierenden Scheibe für ihn nach, denn: "**Relativ zum Beobachter bewegte Uhren gehen für ihn langsamer**".

Der Mittelpunkt der Scheibe ist jedoch, trotz Rotation, faktisch in Ruhe, so dass eine dort fixierte Uhr keinen Gangunterschied zu der Uhr des Beobachters außerhalb aufweist, **nach SRT**. Dieser Sachverhalt soll nun präziser betrachtet werden und zwar an Hand der Erweiterung dieses Gedankenexperiments.

Man stelle sich, im gravitationsfreien Umfeld, ein ruhendes Inertialsystem S (x, y, z, t) vor, z. B. die Fläche eines Spielplatzes und ein dazu drehfähiges Inertialsystem S' (x', y', z', t') in Form einer kreisrunden Scheibe, wie die Plattform eines Kinderkarussells, auf dem Areal. Die Ursprungspunkte beider Koordinatensysteme, also die z - und z' -Achse, sollen im Mittelpunkt der Scheibe bzw. Karussellplattform lotrecht stehen und dauernd zusammenfallen.



Grafik: Holger Göbel ISBN 978-3-11-034426-4

Zunächst sei das gesamte System in Ruhe, d. h. das Karussell dreht nicht. Zwei Cousins, Lennox und Can, die mit ihrem Opa auf dem Platz sind, steigen ins Karussell ein, um Umfang, Radius und Dicke der kreisrunden **ruhenden** Karussellplattform auszumessen. Das tun sie in der Weise, dass der Opa ihnen Einheitsmaßstäbe reicht, das sind einzelne Stäbchen gleicher Länge a , die sie dann entlang der zu messenden Dimensionen aneinander legen.

Lennox ermittelt so den Umfang und Can den Radius und die Dicke der Plattform. Ist N die Anzahl der Maßstäbchen die jeweils angelegt wurden, kann man die Ausmaße der Dimensionen errechnen: Umfang $U = N_U \cdot a$, Radius $R = N_R \cdot a$ und Dicke $D = N_D \cdot a$. So gilt für eine kreisrunde **ruhende** Scheibe

$$U / 2 \cdot R \stackrel{=}{=} \pi \text{ und das sagt aus: Die Euklidische Geometrie ist gültig!}$$

Nun sollen die Messungen am **rotierenden** Karussell (S') ausgeführt werden. Für die Cousins ändert sich zunächst nichts, nach SRT, da sie ja im selben Inertialsystem sind und auch in Ruhe zu diesem. So legen sie, jeweils aus ihrer Sicht, die gleiche Anzahl Stäbchen an, wie zuvor am ruhenden Karussell. Der Opa aber, der das ganze vom **ruhenden** Spielplatz (S) aus betrachtet, sieht die Stäbchen, die er Lennox reicht und der sie sogleich am Umfang der drehenden Scheibe anlegt, um den Lorentzfaktor kürzer, gemäß SRT. Ergo muss er ihm vermeintlich mehr Stäbchen anreichen, als dies am ruhenden Karussell der Fall war. Die Stäbchen, die Can entlang Radius und Dicke der rotierenden Scheibe anlegt, sieht er nicht verkürzt, da für ihn hier keinerlei Relativbewegung existiert. So reicht er Can die gleiche Anzahl an, wie zuvor am stehenden Karussell. Insofern ist für eine kreisrunde **rotierende** Scheibe:

$$U / 2 \cdot R \stackrel{>}{=} \pi \text{ und das bedeutet: Die Euklidische Geometrie ist nicht gültig!}$$

Nun begibt sich Can in das faktisch ruhende Zentrum des **rotierenden** Karussells (S') und blickt von dort zu seinem Cousin Lennox an der Peripherie und stellt fest, dass dessen Uhr langsamer geht als seine eigene Uhr. Ergo ist die Zeit am Umfang gedehnt, aus Cans Perspektive. Gedehnte Zeit impliziert kontrahierten Raum, gemäß dem Äquivalenzprinzip, was bedeutet: Wenn Can, vom **ruhenden** Zentrum aus, Lennox' Einheitsmaßstäbe zum Messen des Umfangs anreichen würde, er ihm mehr zuteilen müsste als am stehenden Karussell. Die Ursache dafür ist aber keine Relativbewegung, wie sie der Opa vom Spielplatz (S) aus beobachtet, denn die existiert innerhalb des Karussells nicht; es ist die Zentrifugalbeschleunigung, die radial (längs des Radius) wirkt und proportional zum Quadrat der Rotationsgeschwindigkeit ansteigt und just am Umfang ihren Maximalwert erlangt. Wohlbekannt ist, seit Newton:

(Zentrifugal-) **Beschleunigung mal Masse ist gleich** (Zentrifugal-) **Kraft.**

Somit lassen sich in einem beschleunigten Bezugssystem S' (**rotierendes** Karussell / **beschleunigter** Zug) weder Raum noch Zeit so definieren, wie dies in der Speziellen Relativitätstheorie der Fall ist, die klar von gleichförmig bewegten Inertialsystemen ausgeht, die keinerlei Kraftwirkung hervorrufen (**stehendes** Karussell / **gleichförmig** bewegter Zug). Im Sinne des Äquivalenzprinzips lässt sich so das rotierende Bezugssystem S' auch als ein ruhendes Bezugssystem S in einem Gravitationsfeld betrachten. Daraus zieht Einstein den genialen Schluss, dass das Gravitationsfeld die metrischen Gesetze des raumzeitlichen Kontinuums bestimmt. Langer Rede kurzer Sinn: **Die Geometrie des raumzeitlichen Kontinuums ist nicht euklidisch**, was bedeutet:

Irgendwie ist alles krumm!!

Neben der Zeitdehnung nimmt Can, vom ruhenden Zentrum aus, auch eine gravitative Rotverschiebung an der Peripherie des Karussells wahr. Lennox indes sieht, von der Peripherie aus, Cans Uhr schneller gehen und das Zentrum des Karussells zeigt sich ihm in den blauen Spektralbereich verschoben. Für Opa überlagern sich die Effekte aus SRT und ART **irgendwie (?)**.

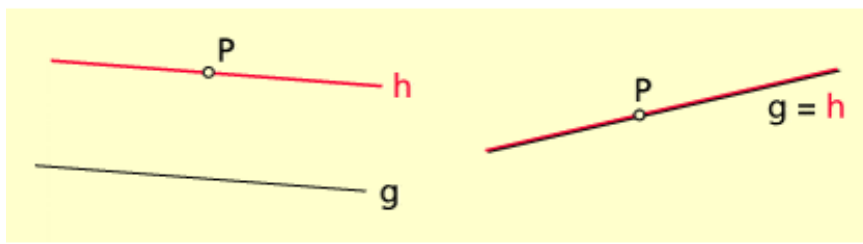
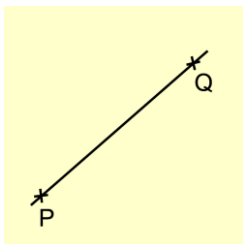
c) Die nichteuklidische Geometrie

Ausführungen basieren auf Lernhelfer.de

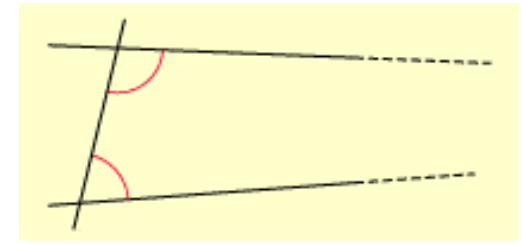
Der griechische Mathematiker Euklid von Alexandria (ca. 365 – 300 v. Chr.) hat auf Basis diverser Grundannahmen (Prinzipien, Axiome, Postulate) die nach ihm benannte **Euklidische Geometrie** der Ebene entwickelt, wie sie in der Schule gelehrt wurde und noch wird und das wohl noch für lange Zeit. Diese Lehrsätze sind Aussagen über Punkte, Geraden, Flächen und ähnliche Dinge, die seither als richtig erachtet und im Jahr 1781 von dem deutschen Philosophen Emanuel Kant (1724 – 1804), in seiner kritischen Philosophie, **a priori** (von vornherein, aus Vernunft durch logisches Schließen) für richtig erklärt wurden und nicht weiter zu hinterfragen sind.

So gibt es in der Euklidischen Geometrie zwei Aussagen, die für das weitere Verstehen eine wichtige Rolle spielen:

- Eine **Gerade** ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte (**P** und **Q**)
- Zu einer Geraden **g** gibt es durch einen beliebigen Punkt **P** neben ihr genau **eine Gerade h**, die zu der ersten **parallel** verläuft (Parallelenpostulat)



Grafiken: lernhelfer.de



Ursprüngliche Fassung Parallelpostulat*

Euklid konnte seine Aussagen nicht beweisen oder gar aus anderen grundlegenden Prinzipien herleiten. Eng verknüpft mit dem Parallelaxiom sind aber weitere Aussagen Euklids wie:

- Zu jeder ebenen Figur gibt es eine ähnliche Figur beliebigen Flächeninhalts
- Die Winkelsumme in einem Dreieck ist gleich zwei Rechten, sprich 180°
- Stufenwinkel an Parallelen sind einander kongruent, d. h. völlig übereinstimmend, deckungsgleich
- Durch drei nicht auf einer Geraden liegenden Punkten gibt es einen Kreis

Zum Ende des 18. Jahrhunderts kamen die Mathematiker zu der Erkenntnis, dass das Parallelaxiom nicht aus den anderen Axiomen Euklids ableitbar war, was bedeutet, das Parallelpostulat war für den Aufbau der Euklidischen Geometrie im Grunde die unverzichtbare Voraussetzung. Folgerichtig war dann auch der Versuch Geometrien aufzubauen, die auf einer dem Parallelaxiom widersprüchlichen Annahme beruhen, also seiner Negation.

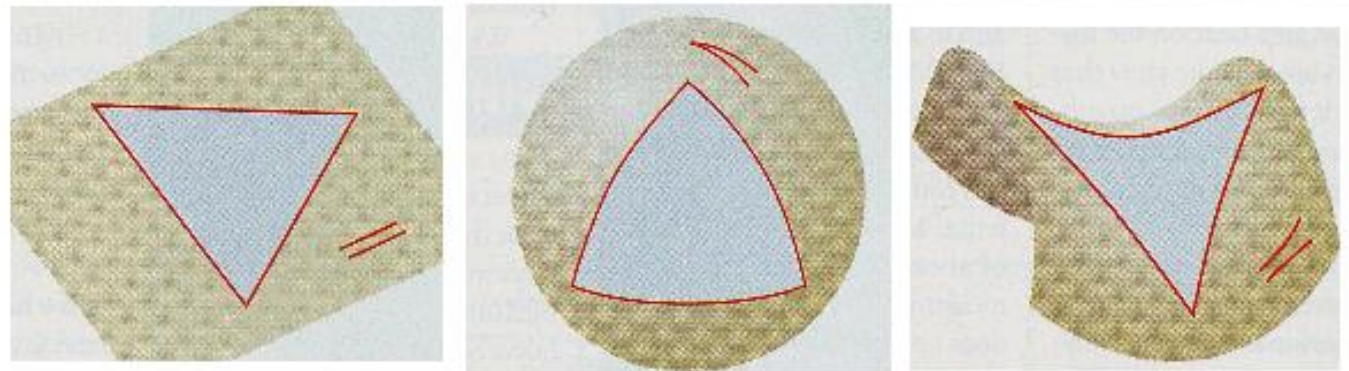
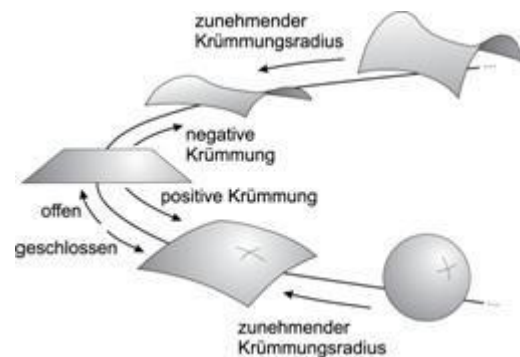
*) „... wenn eine gerade Linie beim Schnitt mit zwei geraden Linien bewirkt, dass wenn auf derselben Seite entstehende Winkel zusammen kleiner als zwei Rechte werden, dann die zwei geraden Linien bei Verlängerung ins Unendliche sich treffen auf der Seite, auf der die Winkel liegen, die zusammen kleiner als zwei Rechte sind.“

Einer der ersten, die diesen Schritt taten, war der deutsche Mathematiker Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855). Ausgehend von der Idee, dass es zu einer Geraden und einem nicht auf ihr gelegenen Punkt **mehr** als die eine Parallele gibt, kam er zu einer **neuen** widerspruchsfreien Geometrie. Er hat seine Ergebnisse nicht veröffentlicht. Das sollte dem Russen Nikolai Iwanowitsch Lobatschewski (1793 – 1856) und dem Ungarn Janos Bolyai (1802 – 1860) vorbehalten bleiben. Unabhängig voneinander entwickelten sie eine nichteuklidische Geometrie, die sogenannte **hyperbolische Geometrie**.

Euklids Elemente <https://digital.slub-dresden.de/werkansicht/dlf/6750/5> Text, 392 Seiten

Schließlich hat der deutsche Mathematiker Bernhard Riemann (1826 – 1866), ein Schüler Gauß', dann auch den zweiten möglichen Fall der Negation untersucht, nämlich, dass es durch einen Punkt P neben einer Geraden g keine Parallele zu ihr gibt. Heraus kam eine weitere nichteuklidische Geometrie, die als **elliptische Geometrie** bezeichnet wird.

Die nichteuklidischen Geometrien im Vergleich



Grafik: Holger Göbel ISBN 978-3-11-034426-4

Die Grafik oben zeigt den Übergang von einer geschlossenen Sphäre mit positiver Krümmung ($K = +1$) über die Ebene ($K = 0$) zum offenen Hyperboloiden mit negativer Krümmung ($K = -1$). Bei einer Ebene ist der Krümmungsradius unendlich.

Winkelsumme im Dreieck:

Grafik: Thur.de

Geometrie / Krümmungsparameter (K)

**euklidisch / $K = 0$
(Ebene Fläche)
nur eine Parallele
 180°**

**elliptisch / $K = +1$
(Hypersphäre, Kugelfläche)
keine Parallele
größer 180°**

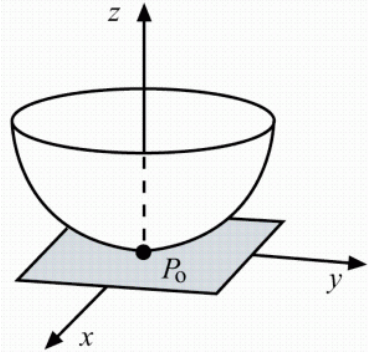
**hyperbolisch / $K = -1$
(Sattelfläche)
unendlich viele Parallelen
kleiner 180°**

Diese nichteuklidischen Geometrien sind in sich widerspruchsfrei, wobei sie allerdings keine Geometrien im Sinne unserer praktischen Erfahrungen im dreidimensionalen Anschauungsraum sind. Als zunächst rein mathematische Theorien entwickelt, erlangten sie mittlerweile jedoch eine große Bedeutung, sowohl in der Theoretischen Physik als auch in der **Kosmologie**, denn u. a. war bis vor wenigen Jahrzehnten auch noch offen, welche der Geometrien das Universum **im Großen** beschreiben. So lautete die Frage: Ist die Geometrie des Universums:

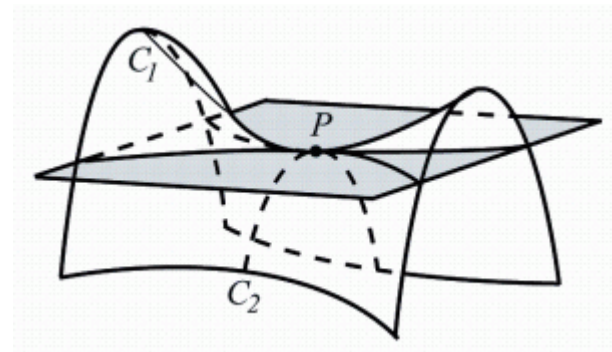
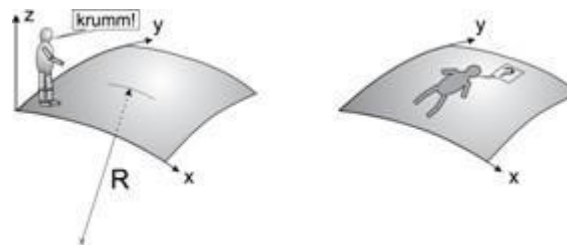
Euklidisch? Elliptisch? Hyperbolisch?

Von der dreidimensionalen Sicht aus ist auf den ersten Blick leicht einsehbar, warum es **eine, keine** oder **unendlich** viele Parallele in den verschiedenen Geometrien gibt, wie es die Bilder oben zeigen. Doch die Geometrie in einer Fläche hat nichts zu tun mit der Gestalt der Fläche wie sie einem Betrachter erscheint, der sie aus der zweidimensionalen Sichtweise anschaut.

Beispiel: Flächenwesen, das auf einer Kugeloberfläche lebt (Hypersphäre / elliptische Geometrie / $K = +1$ / Winkelsumme im Dreieck $> 180^\circ$). Wenn die Kugel sehr groß ist, dann wird das Flächenwesen die Krümmung seiner Welt zunächst nicht wahrnehmen, weil und das ist bewiesen, in der unmittelbaren Umgebung eines Punktes die zweidimensionale euklidische Geometrie zutrifft. Man kann sich das so vorstellen wie eine ebene Fläche, die tangential in dem Punkt P_0 an der Kugel anliegt, wobei die Verbindungslinie zum Kugelmittelpunkt senkrecht auf dieser Tangentenfläche steht, siehe **linke Abbildung**. Wie groß die Umgebung ist, in der die euklidische Geometrie gültig ist, hängt von der Größe der Kugel und damit von ihrem Radius ab.



Tangentialfläche an einer Kugel



Tangentialfläche an einem Sattelpunkt

Ein Beobachter im 3-dimensionalen Raum kann direkt erkennen ob eine 2-dimensionale Fläche gekrümmt ist. Umgekehrt ist das nicht so leicht möglich.

Grafiken: mathe.agra.de / Holger Göbel ISBN 978-3-11-034426-4

Nimmt man die Größe der Erde, so kann man die Stadt Frankfurt, auch noch das Bundesland Hessen, als eben betrachten und ihre Pläne ohne merkliche Verzerrung auf einer Karte abbilden, nicht jedoch Grönland oder Australien. Nun zeichnet das Flächenwesen, beginnend in P_0 , eine Gerade. Erläuterung: Eine Gerade hält ihre Richtung definitionsgemäß immer bei.

Wenn nun die Gerade länger und länger wird, dann kommt sie allmählich an den Rand des Gültigkeitsbereichs der Euklidischen Geometrie heran. Das Flächenwesen merkt das aber nicht, weil in der Umgebung der Nachbarpunkte, die nach und nach von der Geraden erreicht werden, auch wieder die Geometrie der Ebene gilt, jedoch mit - aus dreidimensionaler Sicht - geneigter Tangentenfläche. Halten wir aber - wieder aus dreidimensionaler Sicht - die Tangentenfläche fest, dann wirkt das so, als ob die Kugel auf der Tangentenfläche abrollt. Das bedeutet, dass die Kurve, die für das Flächenwesen eine Gerade ist, Teil des Großkreises ist. Zudem ist es egal, in welche Richtung sich das Flächenwesen "geradeaus" bewegt. Der Großkreis ist der größtmögliche Kreis auf einer Kugel. Für das Flächenwesen stellt er die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten als Gerade dar, während aus dreidimensionaler Sicht diese Verbindung Teil des Großkreises ist. Deshalb sind auch die Flug- und Schifffahrtsrouten nach Möglichkeit an Großkreisen ausgerichtet.

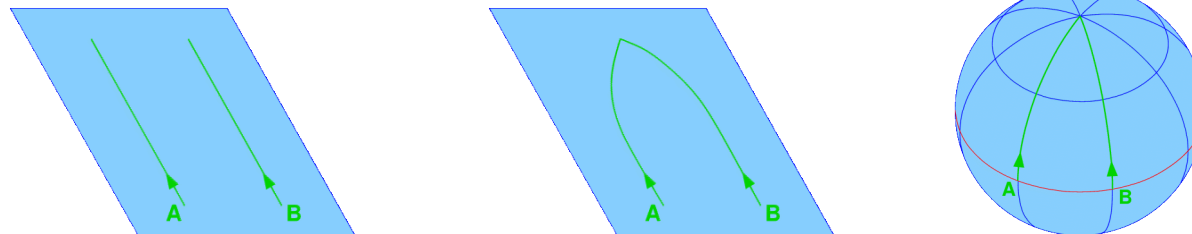
Metrik von Räumen konstanter Krümmung

Mathematisch versteht man unter Metrik die Art und Weise wie Abstände definiert werden bzw. wie die Form des Raumes selbst beschrieben wird.

Ausführungen basieren im Wesentlichen auf Einstein-online.info.

Nach der Newtonschen Gravitationstheorie bilden der absolute Raum und die absolute Zeit eine **starre** Hintergrundstruktur, sozusagen die Bühne in / auf der sich das Weltgeschehen abspielt. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein ist die Raumzeit **dynamisch**, d. h. sie wird durch die in ihr enthaltene **Materie = Energie** verzerrt / gekrümmt und beeinflusst dann ihrerseits, wie sich die Materie (Planet, Komet, Asteroid, Satellit, ...) bewegt. Diese Wechselwirkung zwischen Raumzeitstruktur und Materie ist Einsteins geometrische relativistische Struktur der Schwerkraft.

Der Kerngedanke besteht also darin, die Gravitation nicht mehr als Kraft aufzufassen, sondern als Eigenschaft der Geometrie von Raum und Zeit, sprich der Raumzeit. Mit Hilfe der folgenden vereinfachten Analogien, in der die Rolle der vierdimensionalen Raumzeit von einer zweidimensionalen Fläche übernommen wird, lassen sich einige Aspekte dieser Sichtweise veranschaulichen.



Grafik: Einstein-online.info

Man stelle sich einen dreidimensionalen leeren Raum als eine zweidimensionale ebene Fläche vor, z. B. ein Blatt Papier, wie im linken Bild. In diesem Raum schweben die Teilchen A und B, zwischen denen keinerlei Kräfte wirken sollen, auch keine Anziehung zwischen A und B (so kann man sich auch vorstellen, dass die Teilchen in einem großen räumlichen oder auch zeitlichen Abstand, also nacheinander, fliegen). Werden sie von **keiner** äußeren Kraft beeinflusst, dann bewegen sie sich auf den geradest möglichen Bahnen durch den Raum, also auf Geraden. Teilchen, deren Bahnen parallel verlaufen, werden dann niemals zueinander finden.

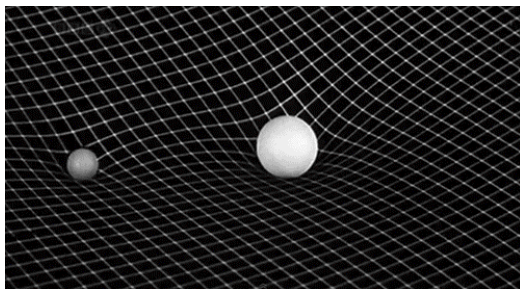
Wenn diese Teilchen nun von diesem Verhalten abweichen dann bedeutet das, aus Sicht der klassischen Physik, dass eine Kraft im Spiel ist. Kräfte beschleunigen Teilchen, was i. a. dazu führen wird, dass sie von ihren geradest möglichen, zunächst parallel verlaufenden, Bahnen abweichen und sich auf gebogenen Bahnen weiterbewegen, wie im mittleren Bild dargestellt. In der Newtonschen Gravitationstheorie ist die Gravitation eine Kraft, die solch einen Effekt hervorrufen kann. Wenn die Teilchen aufeinander zu beschleunigt werden und sich in einem Punkt treffen, dann könnte dies auch darauf zurückzuführen sein, dass sich just an diesem Punkt eine Masse befindet, die sie beide vermittels ihrer Schwerkraft anzieht.

Es gibt aber noch eine weitere Möglichkeit, warum die Bahnen der beiden Teilchen in einem Punkt zusammentreffen. So könnte es auch sein, dass sie sich nach wie vor auf geradest möglichen Bahnen bewegen, nur nicht auf einer Ebene, sondern auf einer gekrümmten Fläche. Die dritte Abbildung oben zeigt dies am Beispiel einer Kugel. In diesem Fall muss man keine Kraft annehmen um zu erklären, warum die Teilchenbahnen zueinander hingebogen werden. Der bloße Umstand, dass sich die Teilchen auf einer Kugel bewegen bewirkt, dass ihre geradest möglichen Bahnen konvergieren.

Die Einstein'sche Gravitationstheorie - die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) - ist das Analogon (gleichgearteter Fall) zu dieser zweiten Möglichkeit der Erklärung für das Zusammentreffen der beiden Teilchenbahnen. In Einsteins Theorie ist die Gravitation die Krümmung der Raumzeit. Teilchen und auch Himmelskörper (Galaxien, Sonnen, Planeten, Asteroiden, Kometen, ...), folgen nach wie vor den geradest möglichen Bahnen, den Geodäten, in dieser Raumzeit. Doch aufgrund ihrer Verzerrung / Krümmung werden sie, selbst auf diesen geradest möglichen Bahnen, relativ zueinander beschleunigt und das frei von Kräften und gerade so, als wären sie unter dem Einfluss dessen, was bei Newton die Schwerkraft ist. Wir bewegen uns mit der Erde auf einer leicht elliptischen Bahn um die Sonne und sind dennoch auf der geradest möglichen Bahn, der Geodäten, durch die gekrümmte Raumzeit unterwegs und merken dabei nichts von Beschleunigungs- / Verzögerungs-Kräften, weil wir uns, zusammen mit der Erde, im freien Fall um die Sonne bewegen. D. h.:

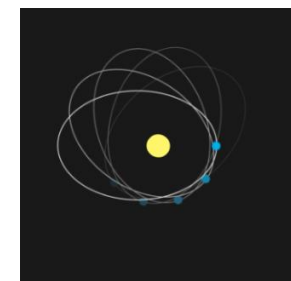
Im Universum spielt sich ein immerwährender Reigen ab, bei dem sich Materie und Raumzeit gegenseitig beeinflussen.

Eine gegebene Materieanordnung (... Galaxie, Sonne, Erde, Satellit, ..., Atom?, ...?) verzerrt die Geometrie der Raumzeit und das nicht nur über ihre Masse, sondern auch über Energie, Spannung und Druck. Die Geometrie der Raumzeit bestimmt, wie sich die Materie (Sonne, Erde, Satellit, ...) bewegt.



Grafik: metaphysicien.wordpress.com

Periheldrehung der Merkur-Bahn



Grafik: wikipedia.org

Der gemeinsame Drehpunkt Sonne / Planeten und Erde / Mond befindet sich jeweils etwas außerhalb des Sonnen- bzw. Erd-Mittelpunktes. Das ist auch bei Kepler und Newton so. Aber mit Kepler und Newton nicht zu erklären ist die Größe der Perihel-Drehung beim sonnennächsten Planeten Merkur

Nach deren Gesetzen müsste die Merkurbahn, bei Abwesenheit der anderen Planeten, geschlossen sein. Beobachtet wurde von Astronomen aber schon vor längerer Zeit, dass der sonnennächste Punkt der Ellipsenbahn, das Perihel, ganz langsam um die Sonne herum wandert, um 5,74 Bogensekunden pro Jahr. Davon ließen sich 5,31 Bogensekunden auf die Gravitationswirkung anderer Planeten zurückführen. Für die übrigen 0,43 Bogensekunden, dies entspricht einem Weg von **29 km** pro Jahr, gab es lange Zeit keine Erklärung. Erst Einstein konnte mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie diesen Wert erklären. Neben der Lichtablenkung und der Gravitations-Rotverschiebung gehört die Perihel-Drehung zu den **klassischen Tests** für die ART.

Merkurs Sonnentanz <https://www.youtube.com/watch?v=1akzasD1OsU> 2 min

Natürlich erfahren auch die anderen Planeten, die die Sonne umrunden, eine Drehung ihres Perihels. Weil aber der Merkur der Sonne, mit ihrer großen Masse, am nächsten steht, ist die Raumzeit hier auch entsprechend stark gekrümmt und so fiel bzw. fällt dieser Effekt auch ganz besonders auf, während er bei den anderen Planeten kaum bzw. nur durch akkurate und präzise Messungen zu bemerken ist. Mit anderen Worten:

Man muss genau hingucken!

Man kann sagen, dass die Krümmung des Raumes im Gravitationsfeld der Sonne dazu führt, dass der Umfang U einer kreisrunden oder elliptischen Bahn um ihr Zentrum kleiner ist als in gravitationsfreier Umgebung ($U' < U$), in der die Geometrie Euklids gilt, siehe Beispiel „Kinderkarussell“ Seite 32. D. h.: Raum-Zeit reagiert auf die Anwesenheit von Materie*. Von den Planeten des Sonnensystems trifft das im Besonderen auf die Bahn des sonnennächsten Planeten Merkur zu. Deshalb läuft die Perihel-Drehung hier auch am schnellsten ab. Als Einstein im Jahr 1915 mit seiner Theorie die Perihel-Drehung des Merkurs für die restlichen, bis dahin unerklärlichen, 0,43 Bogensekunden pro Jahr nachweisen konnte, war er "einige Tage außer sich vor Freude", wie er Freunden mitteilte.

Einstein einmal auf Fragen von Reportern nach einer einfachen Erklärung der Relativitätstheorie in einem Satz:

"Früher hat man geglaubt wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig;
nach der Relativitätstheorie verschwinden Raum und Zeit mit diesen Dingen."

Urknall, Weltall, ... Nr. 20, Dr. Josef M. Gassner, ..., Schwarzschildmetrik, 19 min
<https://www.youtube.com/watch?v=YIZlt5MPqw>

Energieerhaltung im expandierenden Universum, Prof. Dr. Matthias Bartelmann 36 min
<https://www.youtube.com/watch?v=MyOZbZ6nROQ>

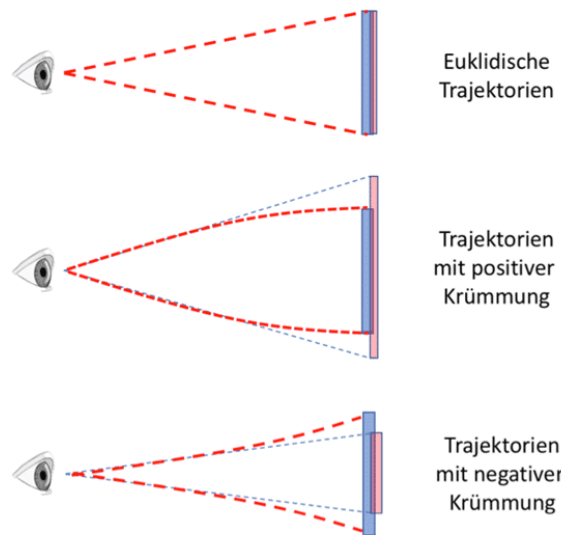
*) **Gedankenexperiment:** Wenn ich den Umfang U' der „schweren“ Erdkugel messe, dann kann ich ihren Radius mit der Formel $R' = U' / 2\pi$ ausrechnen. Wenn ich mir die Erde als eine massenlose Hülle denke, frei von Gravitation, dann vergrößert sich ihr Umfang und es gilt: $R = U / 2\pi$. Dann ist ihr Radius um 1,5 mm größer als der wirkliche Wert, den die Raumzeit-Krümmung bewirkt. Bei der Sonne beträgt dieser Effekt 500 m (siehe youtube Nr. 20, Dr. Gassner, ab 5 min).

4) Die Urknall-Theorie – Standard-Modell der Astrophysik

a) Das Universum ist flach!

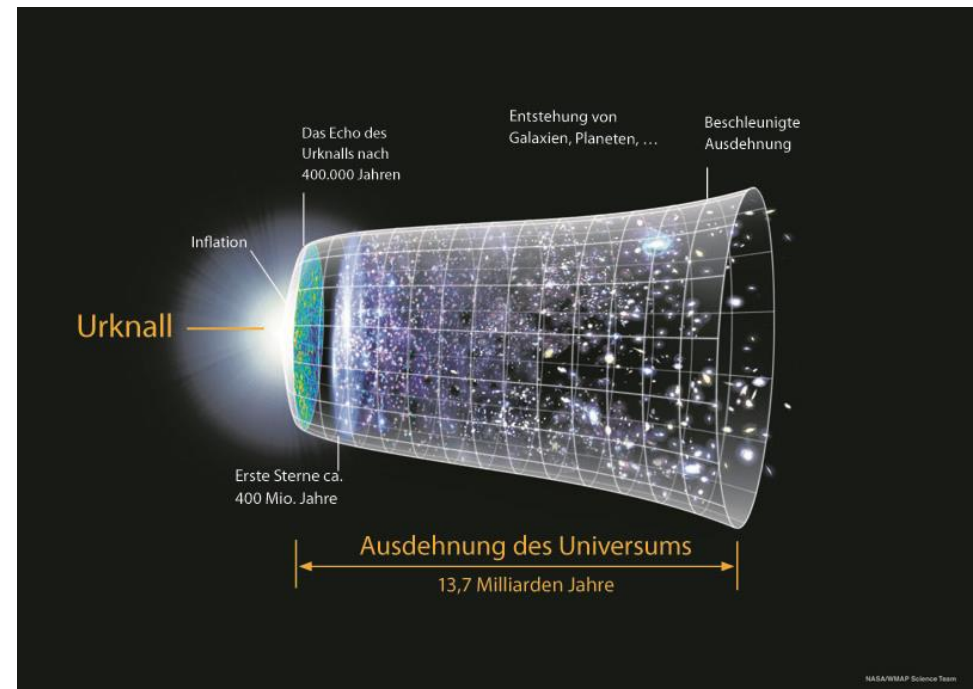
Ausführungen basieren auf dem gleichnamigen Aufsatz von **Raul Rojas** vom 25.02.2018 unter www.heise.de.

In den letzten Jahrzehnten haben die Astronominnen und Astronomen intensiv geprüft, ob wir in einem Universum leben, in dem sich die Lichtstrahlen geradeaus oder entlang einer Kurve bewegen. Die Beantwortung dieser Frage gibt Auskunft über die Geometrie des Universums im großen Maßstab.



↑ [Grafik: heise.de/tp/features/Das-universum-ist-flach-...](http://heise.de/tp/features/Das-universum-ist-flach-...)

[Grafik: mint-zirkel.de/2018/08/was-war-vor-dem-urknall/](http://mint-zirkel.de/2018/08/was-war-vor-dem-urknall/) →



Ein und dasselbe Objekt, wie z. B. eine entfernte Galaxie, kann unterschiedlich groß aussehen, je nachdem ob sich das Licht auf dem Weg von dort zu uns beugt oder nicht, siehe linkes Bild. Die Lichtstrahlen sind **rot gestrichelt** dargestellt. Die **blau punktierten** Linien schließen den Öffnungswinkel am Auge ein. Das anvisierte Objekt ist **blau** gefärbt. Die scheinbare (virtuelle) Größe des Objekts ist **rot** gefärbt.

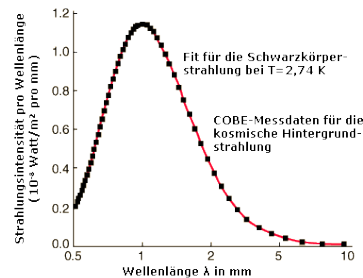
Mit dem Auge registrieren wir einen Öffnungswinkel, der zur Größe des Objekts proportional ist. Das obere Bild zeigt einen euklidischen Raum → keine Beugung des Lichts = gerade Trajektorien (Bahnkurven). Im mittleren Bild sind die Trajektorien positiv gekrümmt, also elliptisch und damit ist der Öffnungswinkel größer und das Objekt erscheint somit ausgedehnter als im euklidischen Raum. Im unteren Bild sind die Lichtstrahlen nach innen gebeugt (hyperbolisch) und der Öffnungswinkel ist kleiner als im euklidischen Raum, ergo scheint auch das betrachtete Objekt kleiner zu sein. So wird klar was gemeint ist wenn Astronominnen und Astronomen über **euklidische**, **elliptische** oder **hyperbolische** Geometrie in einem dreidimensionalen Raum reden (siehe eventuell nochmals S. 39 / 40).

Wie kann man die Geometrie des Universums überprüfen?

Eine Überprüfung könnte man mit einem Objekt bekannter Ausdehnung durchführen, allerdings in kosmischer Dimension, also Millionen Lichtjahre groß. Ein solches Objekt gibt es, in enorm weiter Entfernung, das als kosmischer Maßstab dienen kann und das ist unser "kosmologischer Standardmaßstab". Dabei geht es um nichts anderes als gewisse Muster im Universum selbst, als es noch sehr jung war und gerade sichtbar wurde.

Die Physikerinnen und Physiker gehen heute davon aus, dass das Universum aus einer **Singularität** von der Größe eines Staubkorns entstanden ist (siehe Excel-Tab. Sammelsurium Seite 10). Es war am Beginn extrem heiß (Temperatur $\approx 10^{32}$ K), bestand aus reiner Energie und wurde mit dem Urknall größer und kühler, so dass sich ein Teil der Energie sukzessive in Elementarteilchen (Materie \rightarrow Elektronen, Quarks \rightarrow Protonen, Neutronen) umwandeln konnte. Im frühen Universum konnten sich zunächst keine Atome bilden, es war noch zu viel Energie da und so lag ein Plasma vor (Protonen (+) und Elektronen (-)), in welchem die Lichtquanten ständig mit den Materieteilchen kollidierten. Erst im Verlauf weiterer Expansion und Abkühlung konnten sich erste Wasserstoffatome bilden, in dem die Protonen die Elektronen an sich binden konnten. Später kam Helium hinzu. Das Universum war zu dieser Zeit etwa 380.000 Jahre alt und 3000 °C heiß. Das plötzliche Verschwinden der freien Elektronen zerriss den thermischen Zusammenhalt zwischen Strahlung und Materie und die Urphotonen konnten dem Plasma entweichen (es existierte nicht mehr) und kollisionslos geradeaus fliegen. Die Astronominen und Astronomen nennen das Ereignis "**Rekombination* und Photonenentkopplung**". Das war der Moment, in dem das Universum transparent geworden ist und das **Licht** laufen lernte. Dieser Vorgang hat ein Selfie vom damaligen Geschehen in der heute messbaren Hintergrundstrahlung hinterlassen. Blickt man heute von der Erde aus in alle Richtungen, dann kann man im Hintergrund Photonen mit einer Frequenz im Mikrowellenbereich registrieren, die der Temperatur von 2,72548 K plus/minus 0,00057 K entspricht. Auf diesen Wert hat sich das Universum seit der Rekombination über den Zeitraum von etwa 13,8 Milliarden Jahren bis heute abgekühlt. Ein Photon erlebt das Universum seit seiner Expansion als Punkt.

Messung der Hintergrundstrahlung mit Planck-Weltraumteleskop



Grafik: hydrogen.physik.uni-wuppertal.de

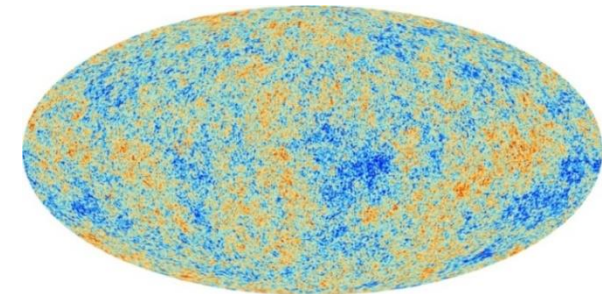


Bild: scinexx.de

Die Stärke der Mikrowellenhintergrundstrahlung **CMB (Cosmic Microwave Background)** ist sehr homogen. Die verschiedenen Farben im rechten Bild sind Falschfarben und stehen für geringste Temperaturunterschiede im Bereich von 1 zu 100.000 K. Und aus diesen geringen Unterschieden kann die frühe Geschichte des Universums abgelesen werden. Das Bild zeigt die Kugel des Himmels um uns herum, wobei der rechte Rand sich direkt am Rand der linken Seite fortsetzt. So lassen sich beide Seiten einer Kugel in einem zweidimensionalen Bild visualisieren.

*) **Steven Weinberg**, US-amerikanischer Physiker (1933 – 2021), Buch: "Die ersten drei Minuten", hielt den Begriff für völlig unangebracht, weil während der gesamten Geschichte des Universums, bis zu dem fraglichen Zeitpunkt, die Kerne und Elektronen noch nie zu Atomen kombiniert gewesen waren.

Wichtig bei der Hintergrundstrahlung ist, dass ihre Variation **nicht** rein zufällig ist. Man erkennt eine gewisse Struktur und Oszillation der Temperatur der Strahlung in unterschiedlichen Maßstäben. Physikerinnen und Physiker denken heute, dass diese Inhomogenität leichte Unterschiede in der Verteilung der Materie, sprich Dichteunterschiede / Fluktuationen, bei der Rekombination darstellen. Aus diesen Fluktuationen sind dann später durch Kondensation der Materie Galaxien entstanden.

Der CMB ist auch das kosmische Bezugssystem, gegen das sich die Erde mit 369 km/s (plus-minus 0,9 km/s) **absolut** bewegt. Diese Geschwindigkeit ist die Summe aus: Erdrotation am Äquator (0,5 km/s), Erdumlauf um die Sonne (30 km/s), Bewegung der Sonne um das galaktische Zentrum (220 km/s) und Bewegung der Milchstraße relativ zum lokalen Galaxienumfeld, gemessen über einen **Temperatur-Dipol*** im CMB.

Vor der Phase der Rekombination war das Universum im Plasmazustand. Die Photonen kollidierten permanent mit den Elektronen, es waren noch keine Wasserstoffatome da. Es wirkten zwei Kräfte gegeneinander: Die Gravitation, die zum Verklumpen der Massen beitrug und der Strahlungsdruck der hochenergetischen Strahlung im Plasma. Diese beiden Effekte, Verdichtung und Abstoßung, führten zur Entstehung von Stoßwellen in der Verteilung der vorhandenen Materie. Dies wird "Baryonen-Oszillation" im frühen Universum genannt. Man kann sich das vorstellen wie die Verdichtung von Luft in Schallwellen. Diese Stoßwellen waren Kugelschalen von Druck und Unterdruck, die sich im Zentrum der Welle nach außen fortpflanzten. Solchen Verdichtungen von Materie bei der Rekombination stand plötzlich kein Strahlungsdruck mehr entgegen, so dass nur die Gravitation wirksam blieb. Und eben da, wo sich Massen bereits verdichtet hatten, konnten sich Galaxien bilden, die man heute noch beobachten kann.

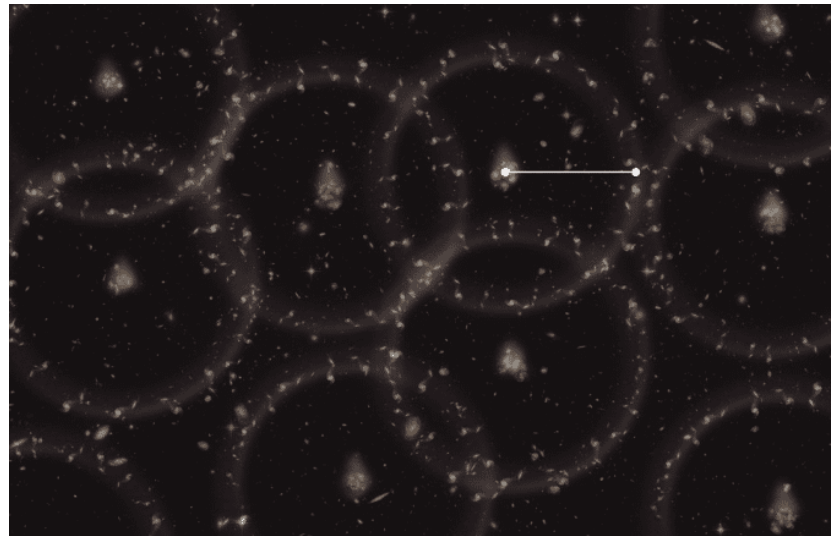


Abb. zeigt die Darstellung von Verdichtungsmustern in der Verteilung der Galaxien durch "Baryon Acoustic Oscillations", wie sie in dem "Sloan Digital Sky Survey" ermittelt werden. Bild: NASA (Zosia Rostomian (LBNL), SdSS-III, BOSS).

*) Würde man im CMB ruhen, wäre die Temperatur in alle Richtungen gleich; gemessen wird aber ein Dipol, d. h. in eine Richtung ist die Temperatur minimal heißer u. in Gegenrichtung minimal kälter. Die Anisotropie entsteht durch den Dopplereffekt und zeigt, dass wir uns durch den CMB durchbewegen, er ist also der **Bezugsrahmen**.

Die Abbildung zeigt, was man heute am Himmel erkennen sollte: Viele überlagerte Druckwellen von Materie. Im Zentrum und am Rande der Druckwelle kondensiert mehr Materie und gerade dort sollte ein Überschuss an Sternen und Galaxien zu finden sein, als anderswo im Raum. Um diese Annahme überprüfen zu können ist es notwendig, den Himmel zu kartieren, d. h. man braucht für Millionen von Galaxien deren 3D-Verteilung, um dann mit Hilfe von Computern nachzuprüfen, ob ein solches Muster von überlagerten Druckwellen wirklich zu finden ist. Dies ist bereits in verschiedenen Experimenten erfolgt u.a. mit dem US-Experiment "Bayron Oscillation Spectroscopic Survey" (BOSS). Kann man diese Druckwellen in der 3D-Verteilung der Galaxien finden, dann kann man den Radius der Druckwelle als Standardmaßstab für die Überprüfung der Geometrie des Universums festlegen. Die empirische Messung liefert die Astronomie (s. Bild vorige Seite), die Theorie liefert aber eine Längenabschätzung, die dann mit der Beobachtung verglichen werden kann.

Am Anfang war die Quantenfluktuation, Prof. Dr. Matthias Bartelmann 15 min
https://www.youtube.com/watch?v=ZmqfRXw16qQ&list=PLGSsc058UBt6K_3s-NOyGsqRlscDN4utt&index=12

Der Standardmaßstab

Die Physikerinnen und Physiker können die Zeitspanne vom Urknall bis zur Rekombination berechnen indem sie feststellen, ab welcher Ausdehnung und der entsprechenden Temperatur des Universums die Elementarteilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ Atome bilden konnten. Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ sind u. a. die Quarks, aus denen auch **Protonen** und **Neutronen** aufgebaut sind und die **Elektronen**. Diese Zeitspanne beträgt ca. **380.000 Jahre** und die Temperatur am Ende dieser Zeitspanne liegt bei ca. **3000 °C**. Bei dieser Temperatur „hüpfen“ die Elektronen in die Schalen der Wasserstoff- bzw. Helium-Atome, die ab den ersten drei Minuten nach dem Urknall bis zu diesem Zeitpunkt als Atom-Kerne existierten. Alsdann konnte berechnet werden, wie schnell die Druckwellen im damaligen Plasma sein konnten um daraus wiederum zu bestimmen, wie weit sich die Wellenfront in diesem Zeitabschnitt ausgedehnt hat, also den Radius der Druckwelle: **438.000 Lichtjahre**.

Seitdem hat sich das Universum bis zum jetzigen Zeitpunkt aber um den Faktor 1092 ausgedehnt, so dass diese Druckwellen heute Strukturen mit einem Radius von $438000 \times 1092 =$ ca. **478 Millionen Lichtjahre** bilden, deren Ursprung in der Abbildung auf der Seite 40 zu verstehen ist. Und dies entspricht nahezu dem, was die Astronominen und Astronomen in ihren Datenbanken und Galaxienkoordinaten nachgerechnet haben: **480 Millionen Lichtjahre**.

Im Bild auf Seite 38 sind die Öffnungswinkel für die verschiedenen Raum-Geometrien dargestellt. Je nach Winkel erscheinen die Gegenstände (Galaxien) größer (bei positiver Krümmung) oder kleiner (bei negativer Krümmung) als im Fall euklidischer Geometrie. Die Astronominen und Astronomen haben heute mit all ihren Experimenten den euklidischen Öffnungswinkel für die Größe des Maßstabs erhalten. Sie sagen:

Unser Universum ist innerhalb der Präzisionsgrenzen der Messinstrumente flach und somit euklidisch!

Das bedeutet dann, dass das meiste Licht, das heute als Mikrowellen-Hintergrundstrahlung bei uns ankommt, seit Milliarden von Jahren praktisch ohne Abweichung vom geraden euklidischen Pfad unterwegs ist. Natürlich ist der Raum nahe massiver Objekte, wie Sonnen, Schwarzen Löchern und Galaxien **lokal** gekrümmt, so dass vorbeifliegendes Licht auch abgelenkt wird. Im ganz großen Maßstab aber, wenn man den ganzen Kosmos betrachtet, ist der Welt-Raum **euklidisch**! Das Universum ist ein Patchwork aus einer euklidischen Umgebung und gekrümmten Räumen in der Nähe massiver Objekte. Das hat auch damit zu tun, dass das Universum im Grunde nur wenig Masse hat (1 Wasserstoffatom pro m^3). Das Universum ist deswegen auch sehr dunkel. Es ist so, als ob sich in einer Kugel mit dem Radius des Abstands Erde – Sonne (ca. 150 Millionen km) eine Lichtquelle von 40 Watt leuchtet.

Ein anderer Weg um den Standardmaßstab der Massen-Druckwellen zu erhalten ist, das Muster der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (s. Abb. S. 45), sprich die unterschiedlichen Wellenlängen / Frequenzen der Strahlung ($T = 2,175 \text{ K}$), den Werten zur Zeit der Rekombination ($T = 3000 \text{ °C}$) zuzuordnen. Die Spezialberechnung führt zum selben Resultat wie zuvor: Die in der Hintergrundstrahlung beobachteten „eingefrorenen“ Muster, mit den winzigen Temperaturunterschieden, haben die richtige Größe und sind weder zu klein noch zu groß, d. h. das Universum ist im großen Maßstab flach.

Wörtliche Wiedergabe Raul Rojas im Jahr 2018: „Für uns Erdlinge hat die Euklidizität des Universums den angenehmen Nebeneffekt, dass die Welt in ferner Zukunft nicht „über unseren Köpfen“ kollabieren wird (das sagt Einsteins Relativitätstheorie bei positiver Krümmung des Universums voraus). Unser flaches Universum bleibt stabil, aber nur, weil es sich für immer ausdehnen wird“.

Aus Spektrum.de im Jahr 1998, also 20 Jahre zuvor: Die **kritische Dichte** des Universums beträgt ca. $5 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$, das sind etwa 3 H-Atome pro m^3 . Das ist die mittlere Materie-Dichte die nötig ist, um durch ihr Gravitationspotential die Expansion des Universums soweit zu verlangsamen, dass es gerade nicht rekollabiert (Einstein-de-Sitter-Kosmos). Die beobachtete Dichte der leuchtenden Materie beträgt aber nur 1 % der kritischen Dichte, jedoch kann aus der Rotationsbewegung von Galaxien geschlossen werden, dass mehr als 90 % der im Universum vorhandenen Materie unsichtbar ist → **dunkle Materie**. Wegen der Unsicherheit über die Dichte der dunklen Materie kann derzeit nicht entschieden werden, ob die Dichte die kritische Dichte übersteigt oder nicht, d. h. das Universum **offen oder geschlossen** ist.

Im Unterschied zu elektromagnetischen Wellen (Licht) bewegen sich Gravitationswellen nicht im Raum, sondern sind Wellen von Raum und Zeit, sprich der Raumzeit. Also sind sie auch nicht absorbierbar und erlauben einen unverstellbaren Blick ins Universum, auf schwarze Löcher, Neutronensterne, Supernovae, ...und vielleicht eines Tages auch hinter diese ominöse Wand mit der Fläche der letzten Streuung. Es gibt Fachleute, die vergleichen die Bedeutung dieser ersten Detektion von Gravitationswellen am 14.09.2015 (siehe Seite 33) mit dem ersten Blick durch ein Fernrohr in den Himmel durch Galilei im Jahr 1609.

Einstein 1916 (nach ersten Überlegungen von Oliver Heaviside (1850 – 1925), britischer Mathematiker und Physiker und Henri Poincare (1854 – 1912), französischer Mathematiker und Physiker), siehe ggf. nochmals Seite 33.

Beschleunigte Massen lösen Gravitationswellen in der Raumzeit aus, die

- räumliche Abstände senkrecht zu ihrer Laufrichtung strecken und stauchen
- und sich mit Lichtgeschwindigkeit von ihrem Entstehungsort fortbewegen

<https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#/media/Datei:Gravwav.gif> 1 min

Im Jahr 2023 wurde auch ein Nachweis für den **Gravitationswellenhintergrund** erbracht. Mehrere internationale Pulsar-Timing-Netzwerke, darunter das North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav) und das European Pulsar Timing Array (EPTA), haben überzeugende Hinweise auf einen Gravitationswellenhintergrund im Nanohertzbereich veröffentlicht (**Quelle: ChatGPT**).

Bislang gibt es noch keine direkte Entdeckung des Gravitationswellenechos von dem **energiereichsten Ereignis des Universums**, dem Urknall; es sind Experimente in Arbeit (laut ChatGPT), um davon Spuren zu finden, was sich hinter der Wand mit der Fläche der letzten Streuung verbirgt.

b) Reise durch das für uns sichtbare Universum

Ausführungen basieren auf dem Buch "Das Universum in deiner Hand" von Christophe Galfard (praktisch partielle komprimierte Nacherzählung).

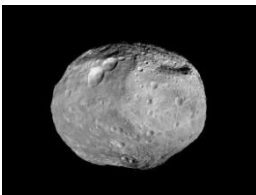
Um mehr über das Universum zu erkunden, reisen wir durch es hindurch.



Wir starten als „Geistwesen“ von der Erde aus und steuern direkt den Mond an, verweilen hier kurz und betrachten etwas melancholisch unseren Heimatplaneten. Ein Lichtsignal, das von der Erde nach hier abgesandt wird, braucht für die 384.000 km lange Distanz 1,28 Sekunden. Für Geistwesen gibt es aber keine Zeit: „Ein Tag ist (bei dem Herrn) wie 1000 Jahre und 1000 Jahre wie ein Tag“ → Apostel Petrus im zweiten seiner Briefe. Ein letzter Blick zur Erde und weiter geht's, längs der inneren Planeten Venus und Merkur, zur Sonne. Ihr Licht benötigt 8,32 Minuten bis zur Erde; das entspricht der Entfernung von 150 Millionen km, genau 149.597.827 km. Diese Distanz wird **Astronomische Einheit AE** (engl. **AU** → unit) genannt. Wir halten inne und beobachten, wie sich vor einem praktisch unveränderlichen Hintergrund aus weit entfernten Fix-Sternen acht helle Lichtpunkte bewegen. Es sind die Planeten der Sonne, die ihren Heimatstern auf leicht elliptischen Bahnen umrunden. Alle Planeten sind von der Erde aus zu sehen.

Bild: lexikon.astronomie.info/erde ← Erde über dem Mondhorizont (Foto von Apollo 12 (14. - 24.11.1969).

Wir reisen weiter und erreichen, jenseits der Mars-Bahn, den Asteroidengürtel. Asteroiden sind der Bauschutt von der Entstehung der Gesteinsplaneten, kleinere, kartoffelförmig aussehende Felsbrocken bis zu Zwergplaneten von Mondgröße. Der Radius ihrer Umlaufbahnen um die Sonne beläuft sich auf 2,0 bis 3,5 AE und endet an der Bahn Jupiters. Auch wenn hier viele Felsbrocken herumgeistern ist ihr Abstand untereinander doch so groß, dass ein Zusammenstoß zwischen ihnen eher unwahrscheinlich ist. Asteroideneinschläge auf der Erde sind daher auch selten. Auf der Weiterreise kreuzen wir noch die Bahnen der Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun; das Licht ist bis nach hier schon 4,2 Stunden unterwegs. Wir tauchen nun in den Kuipergürtel ein, der sich ca. 30 bis 50 AE jenseits der Neptun-Bahn erstreckt und ebenso ein Produkt der Entstehung des Sonnensystems ist und aus schmutzigen Schneebällen aller Art und Größen besteht: Eis, gefrorene Gase, Staub und Geröll. Auch der 2006 zum Zwergplaneten herabgestufte Pluto ist Teil des Systems. Von Zeit zu Zeit gerät, auf Grund von Kollisionen, mal ein Schneeball aus der Spur und zieht als Komet seine Bahn um die Sonne, die von hier aus gesehen auch nur ein heller Stern unter Sternen ist. Alle Planeten, Zwergplaneten, Asteroiden und Kometen, an denen wir vorbeigezogen sind, liegen mehr oder weniger auf einer Scheibe, der Akkretionsscheibe (lateinisch: *acretio* = Anwachsen, Zunehmen), mit der Sonne im Zentrum.



Asteroid Vesta | Hauptgürtelasteroid Aufnahme
Raumsonde Dawn am 24.06.2011 Abmessungen:
573 x 557 x 446 km | $v = 19,34$ km/s

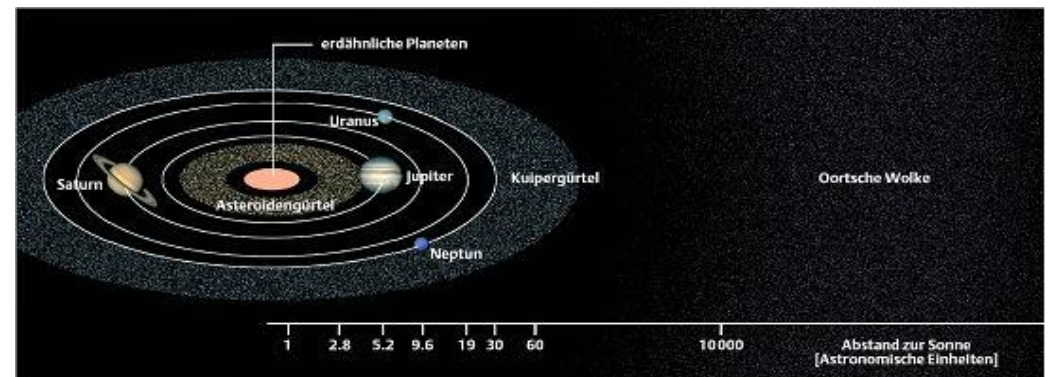
Foto: wikipedia.org



Komet "Hale Bobb"
Frühjahr 1997

Foto: www.steffen-lebach.de

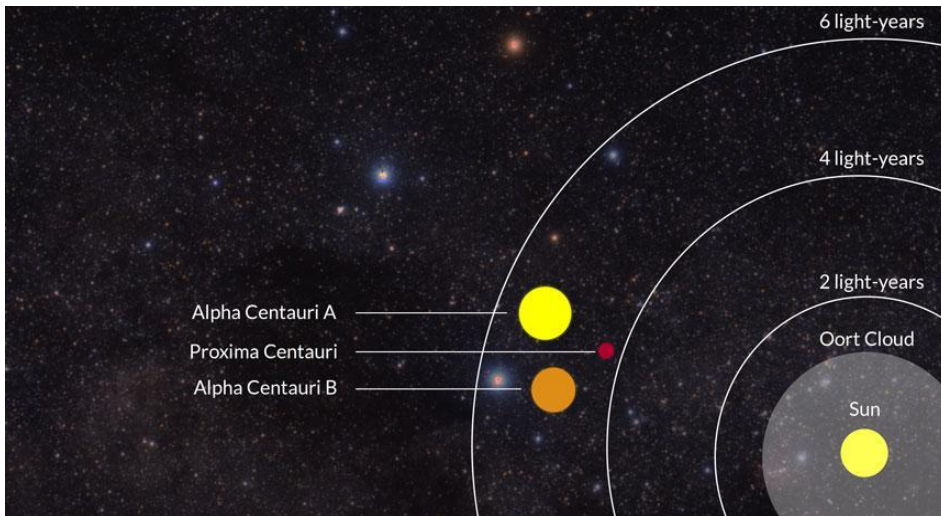
**Grafik: 62. Erich-Regner-Vortrag
(Dr. Thomas Müller, Garching)**



Wir schweben weiter und gelangen in eine Wolke aus Milliarden und Aber-Milliarden von potentiellen Kometen, Gesteins-, Staub- und Eiskörpern von unterschiedlicher Größe, die **Oortsche Wolke**. Sie wurde 1950 von dem niederländischen Astronom Jan Hendrik Oort (1900 – 1992) als Ursprungsort der **langperiodischen Kometen** postuliert. Die Existenz der Wolke ist wohl noch nicht nachgewiesen (wikipedia.org und ChatGPT). Der Theorie nach umhüllt sie die gesamten Zonen unseres Sonnensystems kugelschalenförmig im Abstand von 1,6 Lichtjahren und markiert somit die Grenze der Einflussosphäre unseres Heimatsterns, die alle Mitglieder unserer kosmischen Familie enthält, einer Familie die **Sonnensystem** genannt wird.

Größenvergleich von Objekten des Sonnensystems <https://www.youtube.com/watch?v=CbDLGfMOPoc> 3 min

Nach Durchqueren der Oortschen Wolke verlassen wir unser Sonnensystem. An dieser unscharfen Linie beobachten wir noch, dass einige Kometen die Umlaufbahn wechseln, d. h. aus einer weiten Bahn um unsere Sonne wird eine weite Bahn um unseren nächsten Nachbarstern. Das ist der rote Zwerg Proxima Centauri. Dies zeigt uns, dass wir soeben im Begriff sind unsere nahe Heimat zu verlassen. Wir nehmen Kurs auf das Dreifachsternsystem mit *Alpha Centauri A*, *Alpha Centauri B* und *Proxima Centauri* und steuern den roten Zwerg direkt an.



Proxima Centauri ist 4,2 Lichtjahre fern von der Sonne und hat nur ein Siebtel ihres Umfangs und ihrer Masse. Daher ist der Gravitationsdruck nicht so hoch und die Kernfusion verläuft langsamer, so dass dem Stern ein langes Leben blüht, 12 Billionen Jahre laut Prof. H. Lesch. Die Oberflächentemperatur beträgt nur 2000 K, die Sonne ist an die 6000 K heiß.

Wir nähern uns Proxima Centauri und stellen fest, dass er auch einen Planeten hat, genannt Proxima B, aufgespürt 2016, der ihn im Zyklus von 11,5 Tagen umrundet und ihm immer die gleiche Seite zeigt. Also ist er synchronisiert, wie auch unser Mond. Aufgrund der langen Lebensdauer des Sterns könnte auf Proxima B einst Leben existiert haben. Es fällt uns aber nichts auf, was konkret darauf hindeutet.

Grafik: www.science.org

Plötzlich kommt es zu einer gigantischen Veränderung der Helligkeit und wir erkennen, wie Proxima Centauri gewaltige Mengen glühend heißer Materie ausstößt. Das Ereignis ist die Folge starker Magnetfelder des Sterns und war nicht vorhersehbar. Es ist wie bei der Sonne, wenn sich heftigere Eruptionen ereignen, die auch plötzlich entstehen (Polarlicht).

Proxima Centauri ist der Stern, der nach der Sonne, der Erde am nächsten ist und trotzdem haben wir das Gefühl, schon ziemlich weit weg zu sein von unserem Heimatplaneten und suchen nach Orientierung. Wo ist die Milchstraße? Von Frankfurt aus ist sie, bei sternerklarer Nacht und Stromausfall, als ein diffuses Lichtband am dunklen Firmament auszumachen. Wir schauen uns nach ihr um. Hier zeigt sie sich uns als ein verkanteter Ring, bei dem einige Bereiche heller sind als andere. Von der Erde aus sieht die Milchstraße deshalb wie ein Streifen aus, weil die Erde unter unseren Füßen einen großen Teil von ihr verdeckt. Ohne noch weiter darüber nachzudenken steuern wir gradewegs den hellsten Bereich der Milchstraße an, den wir im Sternbild Schütze ausmachen. Der Weg führt genau ins Zentrum unserer Galaxis. Dort, in einer Ansammlung von rund 300 Milliarden Sternen, muss was Besonderes sein.

In gedankenschnelle geht es an Zig-Millionen Sternen vorbei. Einige von ihnen sind sehr viel größer als die Sonne und werden daher auch eher sterben müssen als sie und andere, wie auch Proxima Centauri, sind dagegen sehr klein und werden unvorstellbar lange leuchten.



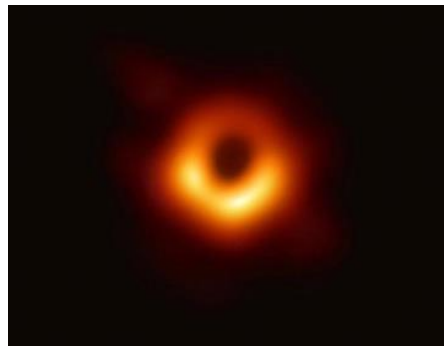
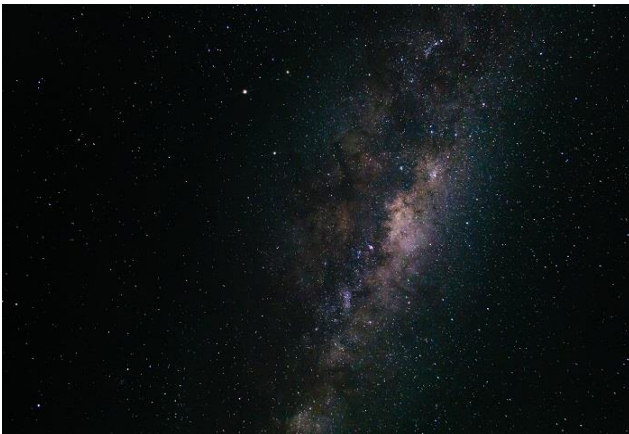
Die Reise führt uns durch stellare Kreißsäle und Kinderstuben, Staubwolken, die aus Überresten hunderter explodierter Sterne bestehen und durch stellare Friedhöfe, die darauf warten zu Kinderstuben zu werden. Die Sonne ist vermutlich ein Stern der 3. Generation. Etwa 26.000 Lichtjahre von der Erde entfernt, sind wir dem galaktischen Zentrum jetzt nah gekommen. Die Sterndichte ist hier am höchsten. Vor uns erblicken wir einen sich drehenden farbenprächtigen Ring, der aus Gas und Milliarden von Fels- und Eisbrocken, ja sogar auch Sternen besteht, die sich allesamt in einer dicken, Donut-förmigen Konstellation hellen energiereichen Lichts bewegen, der Akkretionsscheibe*. Alles bewegt sich schnell, auch die Sterne. Ein Stern, S4711**, bringt es auf 86 Millionen km/h (24.000 km/s). Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben das aus dem Umlauf des Sterns ums galaktische Zentrum ermittelt, wofür er 7,6 Jahre braucht. Um ein Schwerfeld zu erzeugen das verhindert, dass S4711 ins Weltall hinaus geschleudert wird, wegen der hohen Zentrifugalkraft, ist ein Objekt von über vier Millionen Sonnenmassen nötig, ein Schwarzes Loch von 25 Millionen km Durchmesser.

← [Bild: de.wikipedia.org](https://de.wikipedia.org)

*) <https://www.swr.de/wissen/1000-antworten/warum-dreht-sich-im-universum-alles-100.html> Prof. H. Lesch 4 min.

**) <https://www.galileo.tv/weltall/86-mio-km-h-forscher-entdecken-schnellsten-stern-der-galaxie/>

↑ **Orionnebel** Nächstgelegenes Sternentstehungsgebiet / Entfernung: 1350 Lichtjahre / Durchmesser: 24 Lichtjahre / 700 bis 2100 Sonnenmassen → Kreißsaal und Kinderstube für Sterne



Wir können noch so genau hinschauen und sehen nichts!
Warum? Weil das Objekt ein **Schwarzes Loch** ist!
Wie kann man dann überhaupt etwas erfahren?

→ [Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße 4 min](https://www.youtube.com/watch?v=EiqBe1TuirE)
<https://www.youtube.com/watch?v=EiqBe1TuirE>

← [Foto: focus.de](https://focus.de) Das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie **Messier 87** ist 55 Mio. Lichtjahre fern, hat die Masse von 6,5 Mrd. Sonnenmassen und ist so groß wie unser Sonnensystem.

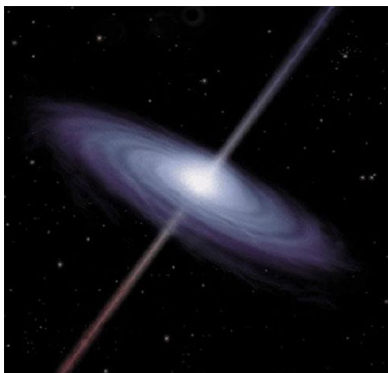
← [Foto www.hobbeasy.de](https://www.hobbeasy.de) Das Zentrum der Milchstraße liegt im Sternbild Schütze. Der direkte Blick ist uns verwehrt, weil das für uns sichtbare Licht zu stark abgeschwächt wird.

Das supermassereiche schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße wird Sagittarius A* genannt, weil es in Sternbild Schütze (lat.: Sagittarius) zu finden ist.

Von der Erde aus ist von Sagittarius A* nichts zu sehen, weil Sterne und Unmengen von Gas und Staub, die sich zwischen ihm und der Erde befinden, den Blick darauf verwehren. Jedoch werden mit Spezial-Teleskopen, die für Menschen unsichtbares Licht, wie Radio-, Infrarot-, UV- oder Röntgenstrahlen erfassen können, Untersuchungen durchgeführt. Die Aufnahmen kann man sichtbar machen, so wie bei der Röntgenaufnahme einer Knochenfraktur oder Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera. Bei der Analyse wurden auch energiereiche Eruptionen von Licht entdeckt, die von einem winzigen Ort innerhalb des Rings ausgehen. Wir sind direkt vor Ort und fragen uns, was der Auslöser dieser Eruptionen ist. Wir starren auf den Staub und die Partikel und die kleinen Gesteinsbrocken, aus denen der Ring besteht und die sich sehr schnell um das Zentrum bewegen. Durch Reibungsprozesse verlieren sie Energie und werden dadurch langsamer, so dass immer mal ein gewisser Teil nach innen wandert und in Sagittarius A* verschwindet.

Plötzlich taucht ein großer Asteroid auf, der mit einer Million km/h an uns vorbei in den Ring saust. Wir sehen genau hin und beobachten, wie er infolge der Reibung verglüht, wie das mit Meteoriten* in der Erdatmosphäre auch geschieht, die dann als Meteore (Sternschnuppen) aufleuchten. Dann erscheint sogar ein Stern, der in den Donut eintaucht. Wird auch er verglühen? Nach einer halben Umrundung taucht er dann an der Innenseite des Rings wieder auf, so wie Asteroiden auch bis zur Erdoberfläche durchkommen können und nicht komplett verglühen. Aber dieser Stern ist jetzt seltsam entstellt und taucht weiter hinab aufs Zentrum zu und scheint dabei unter großen Spannungen zu stehen, denn planetengroße Stücke werden jetzt aus ihm heraus gerissen. Ursache ist die Schwerkraft, die so nah am schwarzen Loch extrem ansteigt und an ihm zerrt, ihn verformt und immer weiter in die Tiefe zieht.

Wir sind zwar ätherisch, **also reiner Geist**, doch so dicht am schwarzen Loch können auch wir uns der Schwerkraft nicht mehr entziehen und fallen auch in den Ring aus erhitzter Materie. Mit Milliarden und Aber-Milliarden Tonnen Plasma stürzen wir weiter in die Tiefe und so bleiben wir dem Stern auf den Fersen und können sein Schicksal weiter verfolgen. Dann beobachten wir, wie der stürzende und jetzt völlig in Stücke gerissene Stern in einer gleißenden Schwinge aus weiß glühendem Plasma zerplatzt und sich auf das unsichtbare schwarze Loch zuschraubt. Wir bleiben dran und immer schneller geht es hinab, bis auf einmal eine ungeheure Kraft die Schwinge samt uns wieder hinaus wirbelt. Was ist passiert? Was von dem Stern übrig geblieben ist, ein Anteil seiner Materie, wurde in kürzester Zeit in reine Energie umgewandelt, nach Einsteins berühmter Formel $E = m \cdot c^2$. Dabei wurde die Materie in zwei Strahlen der energiereichsten Form des Lichts, Röntgen- und Gammastrahlung, umgewandelt. Der eine Strahl schießt "hinauf", der andere "hinab", wie die Lichter zweier Leuchtfeuer. Wir werden von einem Strahl mit nach "oben" getragen und es geht vorbei an Millionen von Sternen. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Menge der Sterne ab, an denen wir vorbei ziehen und bald sehen wir keine mehr vor uns. In weiter Entfernung leuchten zwar noch einige Lichtkleckse, es sind Kugelsternhaufen, aber sie sind viel weiter weg als das, was wir bisher gesehen haben.



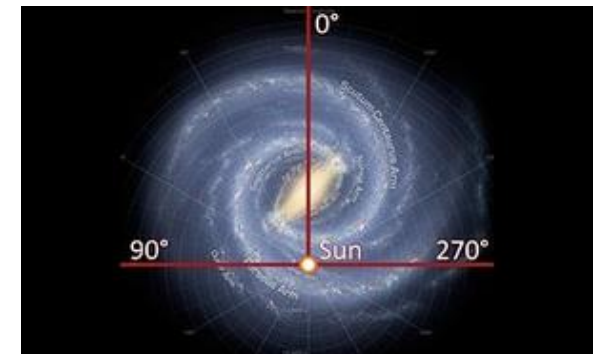
Grafik: A. Kamajian / NASA

Shanita Andrews, Baltimore, 21.08.2009

Der Eindruck des Künstlers von einem supermassiven Schwarzen Loch hebt die Akkretionsscheibe aus Gas und Sternen hervor, die um das Schwarze Loch herumwirbeln und die Materiestrahlen, wie sie entlang der "Stangen" ausgeworfen werden.

Grafik: Weltraum-aktuell.de | Milchstraße

*) Meteoriten sind größer als interplanetare Staubkörner aber kleiner als Asteroiden. Asteroiden sind Gesteinsbrocken in erdähnlichen Umlaufbahnen.



Wieder suchen wir nach Orientierung. Der Ring der Milchstraße, so wie er sich uns von Proxima Centauri aus gezeigt hatte, leicht verkantet, ist von hier nicht zu sehen. Wir schauen nach "unten" und dann liegt sie vor uns, die Milchstraße, unsere Heimatgalaxie. Von unserer Position aus, rund 50.000 Lichtjahre direkt über dem galaktischen Zentrum, erkennen wir unter uns eine Scheibe aus Gas, Staub und Sternen. Die Scheibe misst 100.000 Lichtjahre im Durchmesser und ist 3.000 Lichtjahre dick. Wollten wir von hier die Erde anrufen, müssten wir mehr als 100.000 Jahre auf die Antwort warten.

Unter uns drehen sich, durch die Schwerkraft aufeinander bezogen, 300 Milliarden Sterne. Vier helle Spiralarme wirbeln sich um das Zentrum unserer Galaxis. Dieses Zentrum ist eine noch hellere Aufwölbung, 13.000 Lichtjahre dick, ein sog. Bulge aus Gas, Staub und Sternen, der uns die Sicht auf alles nimmt, was in seinem Inneren liegt. Das ist das schwarze Loch mit dem heißen Donat drum herum. Nur der Strahl aus in Energie umgewandelter Materie den es ausstößt, wenn was Großes hineinfällt und mit dem wir „hoch“ in unsere Aussichtsposition gelangt sind, ist für uns von dort sichtbar.

300 Milliarden Sterne, das ist schwer zu begreifen! Eine würfelförmige Box von einem Meter Kantenlänge, also ein Kubikmeter, gefüllt mit grobkörnigem Sand, enthält etwa eine Milliarde Sandkörner. Füllen wir nun 300 Boxen, dann haben wir so viele Sandkörner, wie Sterne in der Milchstraße sind. Wir transportieren die Boxen nach London auf den Trafalgar Square*, leeren sie dort als flache runde Form aus, Radius 50 Meter, die den gesamten Platz bedeckt und ordnen den Sand von der Mitte aus zu vier Spiralarmen an. Nun stellen wir uns auf der 51 m hohen Säule des Nelson-Denkmal neben den Admiral und schauen auf den Platz hinab. Was wir sehen, würde sich ausmachen wie die 300 Milliarden Sterne der Milchstraße von unserer momentanen Position aus als Geistwesen, rund 50.000 Lichtjahre entfernt vom galaktischen Zentrum. Und wenn ein Sandkorn **gelb** markiert wäre, als Kennzeichnung für die **Sonne**, so können wir vielleicht erahnen wie schwer es sein wird, die Sonne überhaupt zu entdecken. Dennoch haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Laufe der Jahre die Sterne der Milchstraße kartographiert und daher eine recht genaue Vorstellung davon, wo Sonne und Erde liegen. Das ist etwa mittig zwischen dem Zentrum und der Peripherie der Galaxis-Scheibe. Die Sonne umrundet dieses Zentrum in einer Entfernung von ca. 26.000 Lichtjahren mit einer Geschwindigkeit von rund 250 km/s und benötigt für einen Umlauf etwa 225 Millionen Jahre. Dieser Zeitraum ist als ein **galaktisches Jahr** definiert. Ferner oszilliert das Sonnensystem alle 30 bis 45 Millionen Jahre vertikal zur Scheibe zwischen plus-minus 250 Lichtjahren.

<https://www.city-walks.info/London/Trafalgar-Square.html>



Wir schauen uns um und entdecken einige leuchtende Kleckse, die entlegene Bereiche des Universums erhellen. Einzelne Sterne können es nicht sein, denn sie erscheinen zu verschwommen. Sind das auch Galaxien? Ja! Kann man sie von der Erde aus mit dem bloßen Auge sehen? Nein**! Wenn wir von der Erde aus, mit dem unbewaffneten Auge, in den sternklaren Nachthimmel blicken, sehen wir, je nach Standort, 3000 bis 6000 Sterne der Milchstraße. Auch die, die weit entfernt sind und das diffuse helle Band am Nachthimmel hervorrufen, gehören zu ihr. Diese Sterne sind nur zu weit weg, um einzeln erkennbar zu sein. Von verschiedenen Orten der Erde aus betrachtet sieht der Nachthimmel verschieden aus. Das kommt daher, weil die Erdachse so geneigt ist, dass man von der südlichen Hemisphäre aus immer zum galaktischen Zentrum hin blickt, wo viele Sterne zu sehen sind und sich das Band der Milchstraße deutlich am Nachthimmel abzeichnet. Beim Blick von der Nordhalbkugel schaut man vom galaktischen Zentrum weg in die Richtung, in der es viel weniger Sterne gibt und sich der Nordsternhimmel daher eher fad zeigt.

← [Bild scinexx.de](http://Bild.scinexx.de) **Andromeda-Galaxie M31** (31. Eintrag im Messier-Katalog (franz. Astronom (1730 – 1817))).

*) Seeschlacht von Trafalgar, 21.10.1805 zwischen britischer und französisch-spanischer Flotte.

**) Außer Andromeda und große und kleine Magellansche Wolke.

Als wir uns weiter umschaun und noch über die weit entfernten verschwommenen Lichtkleckse nachdenken, taucht plötzlich eine nah gelegene Galaxie in unser Blickfeld ein, es ist **Andromeda**, unsere galaktische Nachbarin (nicht verwechseln mit dem Sternbild Andromeda). Von der Erde aus betrachtet bedeckt die Andromeda-Galaxie einen Bereich des Nachthimmels, der etwa sechsmal so groß ist wie der Vollmond. Sie ist aber so weit entfernt von uns, dass nur ihr Bulge mit dem bloßem Auge schwach zu erkennen ist. Zum ersten Mal erwähnt wurde der Bulge Ende des ersten Jahrtausends durch den persischen Astronom Abd al Rahman al-Sufi, der ihn als schwache Lichtwolke beschrieb; er kannte natürlich keine Galaxien. Deren Existenz wurde erst in den 1920er Jahren nachgewiesen, durch den estnischen Astronomen Ernst Öpik und seinen amerikanischen Kollegen Edwin Hubble.

Der Andromedanebel, wie die Galaxie historisch auch genannt wird, ist 2,5 Millionen Lichtjahre weit weg von der Milchstraße und hat einen Durchmesser von 140.000 Lichtjahren. Sie ist Heimat für eine Billion Sterne und das schwarze Loch in ihrem Zentrum zählt 140 Millionen Sonnenmassen. Wenn Wicker die Milchstraße wäre, mit grob 1 km Durchmesser, dann läge das Zentrum unserer Nachbarin Andromeda 25 km entfernt in unmittelbarer Nähe z. B. der Eissporthalle in Frankfurt a. M. oder der Mathildenhöhe in Darmstadt und würde ein Gebiet umfassen von 1,4 km im Durchmesser. Andromeda ist der nächstliegende kosmische Beweis dafür, dass die Milchstraße nicht das ganze Universum darstellt. Schauen wir ganz genau hin dann stellen wir fest, dass das Licht, das von Andromeda zu uns gelangt, etwas in den **blauen** Spektralbereich verschoben ist was bedeutet, dass sich die beiden Galaxien aufeinander zu bewegen, derzeit mit 115 km/s \approx 10.000.000 km/d. In vermutlich vier Milliarden Jahren werden die beiden Galaxien zusammenkommen und sich zu einer elliptischen Supergalaxie vereinigen, was noch einmal drei Milliarden Jahre dauern wird. **Siehe Excel-Tab. Sammelsurium Seite 8.**

Simulation Kollision Milchstraße – Andromeda <https://www.youtube.com/watch?v=wHAHc8wujsc> 2 min

Bis es soweit ist, wird die Sonne schon in ihre Expansionsphase zum Roten Riesen eingetreten sein und auf der Erde wird es kein Leben mehr geben, jedenfalls nicht so, wie wir es kennen. Auf Grund von Beobachtungen und Modellrechnungen erwarten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, dass die Wahrscheinlichkeit für Sternenkollisionen bei Galaxien-Fusionen sehr gering ist. Aber wir wollen nicht weiter darüber nachdenken, denn es trifft uns sowieso nicht und so setzen wir unsere Reise fort. Weit sind wir noch nicht gekommen als uns auffällt, dass die Milchstraße Teil einer kleinen Gruppe von 54 Galaxien ist, die natürlich auch durch die Schwerkraft miteinander verbunden sind. Diese Galaxien werden als die **Lokale Gruppe** bezeichnet. Ihr Durchmesser beträgt 8,4 Millionen Lichtjahre und ihre Königin ist Andromeda. Weiter geht es und jenseits der lokalen Gruppe stoßen wir auf weitere Gruppen, die größer sind und von denen einige mehrere 100 Galaxien umfassen. Diese Ansammlungen werden als **Galaxienhaufen** bezeichnet. Die Reise führt auch vorbei an **Superhaufen**, mit Zehntausenden leuchtender Spiralen und weiteren Arten von Galaxien. Diese Superhaufen bilden irrsinnig große Strukturen und jetzt wird uns so langsam klar, dass wir die relative Größe im großen System der Dinge einmal mehr neu bestimmen müssen.

Wir halten inne und drehen uns um unsere virtuelle Achse und beobachten in alle Richtungen, um auf der Suche nach dem Ende dieses gewaltigen Raumes so viel Licht wie möglich einzufangen. Es gibt weder „oben“ noch „unten“, weder „rechts“ noch „links“. Wir sind jetzt eine Milliarde Lichtjahre fern von der Erde und sehen Milliarden und Aber-Milliarden von leuchtenden Galaxien in einer geheimnisvoll großen Dunkelheit leuchten, gepackt zu Gruppen, Haufen und Superhaufen, die nah und fern um uns herum durch Entfernungen getrennt sind, die noch größer sind als die, die wir bisher durchschritten haben.



Keine Sterne, sondern Galaxien erstrahlen hier im Galaxien-Superhaufen Abell 1689 Die Milchstraße gehört zum Virgo-Superhaufen. Die Aufnahme wurde mit dem Hubble-Teleskop gemacht. Galaxien sind gesellige Wesen und nicht die Nähe macht sie zu einer Gruppe, sondern die gravitative Wechselwirkung. Galaxien bewegen sich umeinander oder aufeinander zu und verschmelzen auch miteinander, während das Universum sich als Ganzes ausdehnt.

Vermutlich gab es anfangs tausende von Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe, die sich Andromeda und die Milchstraße peu à peu einverleibt haben. Auch die Gruppen und Haufen sind miteinander in Wechselwirkung und werden zu Superhaufen, mit filamentartigen Strukturen, die man sich wie einen Naturschwamm vorstellen kann.

Bild: www.br-online.de

Was wir von hier aus sehen und das was wir noch sehen werden auf unserer Weiterreise ist das, was die Menschheit vom Universum **zu wissen glaubt**. Wir reisen durch ein Universum, wie es sich der menschliche Geist vorstellt, so dass durch diese überwältigende Größe das wohl begrenzte Fassungsvermögen des menschlichen Gehirns nicht überbeansprucht wird. Und so lassen wir unsere Gedanken weiter schweifen, vorbei an Milliarden weiterer Galaxien. Hier und da sehen wir wie Galaxien miteinander verschmelzen und wie Sterne als Supernovae explodieren und Milliarden ihrer Geschwister, für die Dauer von Tagen und Wochen, hell überstrahlen*. Und es dreht sich alles um alles im Universum.

Ohne zurückzuschauen geht es weiter. Wir sind 10 Milliarden Lichtjahre weit weg von der Erde und schweben weiter: 11-, 12-, 13 Milliarden Lichtjahre. Nun legen wir doch einen Stopp ein, um Ausschau zu halten nach dem Ende des Universums. Vergeblich! Kein Ende in Sicht. Was aber deutlich auffällt: Die Anzahl der Galaxien nimmt ab, doch die Sterne, aus denen sie bestehen, sind größer, viel größer, einige mehrere hundertmal so groß wie die mittelgroßen Sterne der heutigen Milchstraße. 13,5 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sind dann so gut wie keine Sterne mehr zu sehen, geschweige denn Galaxien. Und so fliegen wir weiter in Erwartung ewiger Dunkelheit und kommen unverhofft in einen Bereich, in dem sich Licht nicht mehr ausbreiten kann. Vor uns scheint sich eine Wand in Raum und Zeit aufzutun Wir kommen da nicht weiter!

Sind wir am Ende des Universums angekommen? → Nein!

*) Da meint: Die abgegebene Energie pro Sekunde, das ist die Leuchtkraft L , ist größer als die Summe der Leuchtkräfte aller Sterne der Galaxie. Typisch große Galaxien, wie die Milchstraße, haben Gesamt-Leuchtkräfte von $L_G \sim 10^{10}$ bis $10^{11} L_\odot$; Supernovae vom Typ 2 oder 1a haben 10^9 bis $10^{10} L_\odot$ oder auch mal mehr (ChatGPT).

Jenseits dieser Wand existiert eine gewaltige Energie von so hoher Dichte, dass sich Licht nicht ausbreiten kann. Es gibt Licht hinter der Wand vor uns, aber es kann seinen Ort nicht verlassen. Wir haben den entlegensten Ort erreicht, von dem wir von der Erde aus elektromagnetisch (also mit Teleskopen) Beobachtungen machen können. Es ist der Ort in Raum und Zeit, an dem unser Universum lichtdurchlässig wurde. Wiederholung von Seite 39:

Von dem Zeitpunkt an konnten die Urphotonen dem Plasma entweichen und **kollisionslos** „geradeaus“ fliegen. Die Astronomen nennen dieses Ereignis **"Rekombination und Photonenentkopplung"**. Dies ist der Moment, in dem das Universum transparent geworden ist und das **Licht** laufen lernte*. Die Fläche dieser Wand wird auch treffend als die

"Fläche der letzten Streuung"

bezeichnet; denn ab hier fand keine Streuung der Lichtquanten (Photonen) mit den Materieteilchen (Plasma aus Wasserstoff- und Heliumkernen sowie Elektronen) mehr statt, weil vorher kein Raum zur Verfügung stand, in den sich Licht hätte ausbreiten können.

**Kein Licht von jenseits dieses Ortes und kein Licht von vor diesem Zeitpunkt wird die Erde jemals direkt erreichen.
Kein Licht von „davor“ kann jemals mit Teleskopen von der Erde aus eingefangen werden.**

Rekapitulation:

Wir sind auf der Erde gestartet, **von hier**. Nach kurzem Weilen auf dem Mond sind wir an den Planeten Merkur und Venus längs zur Sonne gereist und haben Ausschau nach ihren acht Planeten gehalten. Wir haben unseren nächsten Nachbarn Proxima Centauri besucht und sind von dort bis nah an das Zentrum unserer Galaxis, der Milchstraße, vorgestoßen. Mit dem hellen Gammastrahl, der sich beim Fallen des namenlosen Sterns in das schwarze Loch unseres galaktischen Zentrums formiert hatte, hatten wir uns "hinauf" katapultieren lassen und "von oben" auf die 300 Milliarden Sterne der Milchstraße "herunter" geschaut, neben Admiral Nelson stehend, auf der 51 m hohen Säule seines Denkmals. Wir erinnern uns an die Aussicht auf die imposante Andromeda-Galaxie und das Erspähen der gut 50 Zwerggalaxien, die mit ihr und der Milchstraße die Lokale Gruppe bilden. Weiter ging es Galaxien- und Superhaufen vorbei, bis wir 13 Milliarden Lichtjahre fern der Erde merkten, dass die Anzahl der Galaxien deutlich geringer wurde und nach 13,5 Milliarden Lichtjahren keine mehr da waren. Am Ende wurden wir, 13,8 Milliarden Lichtjahre weit weg von der Erde, von dieser ominösen Wand gestoppt.

**Egal welche Richtung wir eingeschlagen hätten bei unserer Reise durch das Universum,
wir wären immer an dieser „Wand mit der Fläche der letzten Streuung“ gestrandet.**

Das sieht ja so aus, als ob die Erde im Zentrum einer riesigen Sphäre liegt, die von dieser undurchdringlichen Wand begrenzt wird und innerhalb der sich das Universum befindet. So drängt sich die Frage auf: Ist die Erde also doch der Mittelpunkt der Welt?

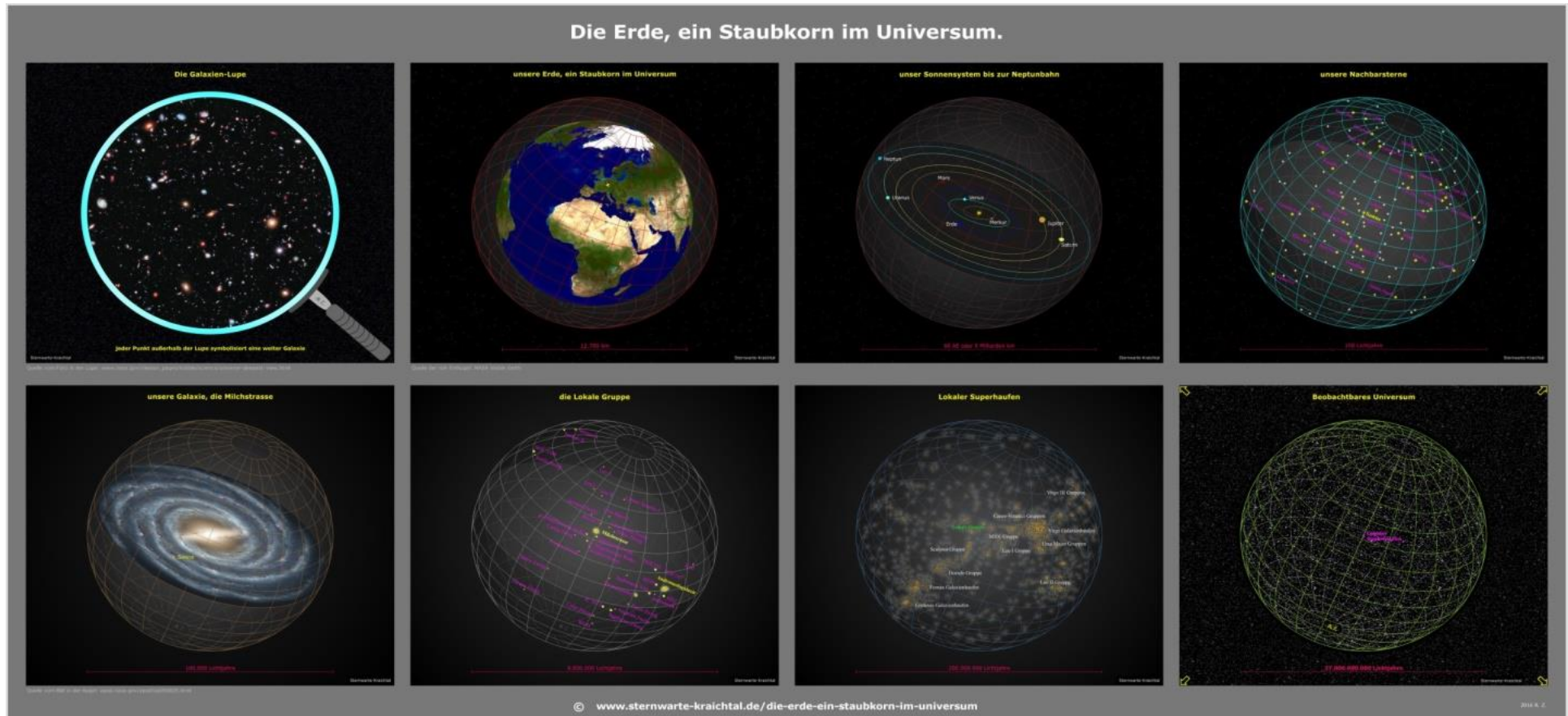
Ja!

Die Erde ist Mittelpunkt des für uns sichtbaren Universums, so wie es für die Menschheit durch Beobachtung mit Teleskopen zugänglich ist.

*) ALS DAS LICHT LAUFEN LERNTE, Buch von Daniela Leitner.

Die Galaxienlupe

<https://www.sternwarte-kraichtal.de/die-erde-ein-staubkorn-im-universum.html>



1 → Galaxienlupe / 2 → Erde (12750 km) / 3 → Sonnensystem (60 AE; 8,4 Ly) / 4 → Nachbarsterne (100 Ly) / 5 → Milchstraße (100.000 Ly) / 6 → Lokale Gruppe (8.000.000 Ly) / 7 → Lokaler Superhaufen (200.000.000 Ly) / 8 → Beobachtbares Universum (> 90.000.000.000 Ly)

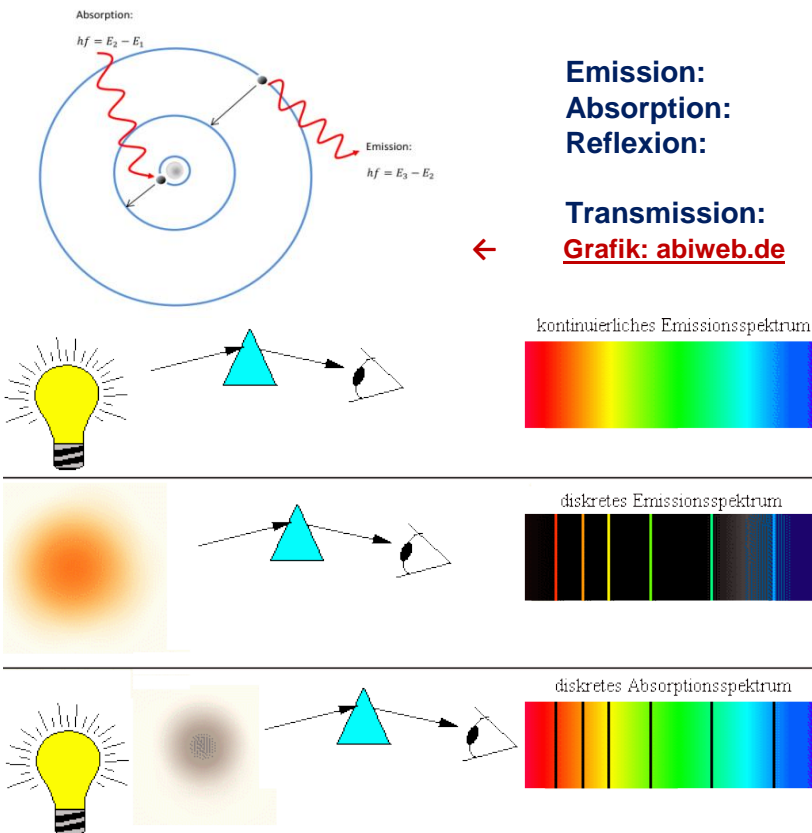
Illustration: Wenn die Sonne so groß ist wie ein Sandkorn und in der Mitte eines runden Tisches von 2 m Durchmesser liegt, dann befindet sich die Erde 2 cm neben ihr und ist nur noch unter einem Mikroskop erkennbar. Unser Sonnensystem füllt die Tischplatte komplett aus und das am nächsten gelegene Dreifach-Sonnensystem Alpha-Centauri ist 12 km weit weg. Es ist also erstaunlich viel Platz zwischen den Sternen einer Galaxie!

Größenvergleich Sterne, Galaxien, ... <https://www.youtube.com/watch?v=GoW8Tf7hTGA> 7 min

Hubble Ultra Deep Field <https://www.youtube.com/watch?v=WRHIGuoH6ic> 2,5 min

Allmählich wird klar, wie auf den vorigen Seiten schon angedeutet, dass wir überhaupt nicht gereist sind. Wir haben uns, mit unseren Augen, nichts weiter angesehen als ein 3-D-Standbild des Universums und zwar soweit es der Menschheit bekannt ist. Dieses 3-D-Standbild ist eine Reproduktion, also eine Montage aller Bilder, die Teleskope vom Universum gemacht haben. Wir waren keine Geistwesen! Klar ist, unsere vermeintliche Reise durch den Raum war aber eine Reise durch die Zeit, genauer, ein Trip in die Vergangenheit. Das Licht von den kosmischen Objekten Mond, Planeten, Sonne, Sterne, Galaxien, ..., bis zu den ersten Sonnen, das all die Teleskope auf der Erde und im Erdorbit (Hubble, Webb...) eingesammelt haben, ist ja nicht nach Null Sekunden auf der Erde angekommen; gegebenenfalls war es über sehr lange Zeiträume und folglich auch sehr weite Distanzen unterwegs, wie es die Galaxienlupe auf der vorigen Seite veranschaulicht.

Die Fläche der letzten Streuung ist aber nicht das Ende der Geschichte. Denn jenseits dieser Fläche gibt es noch mindestens zwei weitere Flächen vor Wänden. Hinter der ersten Fläche liegt der Urknall, hinter der zweiten Fläche verbirgt sich das, was den Urknall einst verursachte. Alles, was wir über die fernen (und nahen) Bereiche des Universums wissen, das wissen wir von dem Licht, das uns von dort erreicht. Und dieses Licht, die elektromagnetischen Wellen bzw. die Lichtquanten / Photonen, sind in ständiger Wechselwirkung mit Materie. **Siehe Excel-Tabelle Atomphysik.**



Emission:
Absorption:
Reflexion:

Transmission:
Grafik: abiweb.de

Materie kann auf vier verschiedene Arten mit Licht in Verbindung treten:

- Ein passendes Lichtquant wird emittiert (ausgesendet) → Energie-Erniedrigung.
- Ein passendes Lichtquant wird absorbiert (aufgenommen) → Energie-Erhöhung.
- Gerichtete Abstrahlung unter einem festen Winkel, wie bei einem Spiegel oder wahllos, dann spricht man von Streuung.
- Lichtquanten passieren die Elektronen der Materie, sie erscheint durchsichtig.

Das Spektrum ist der Fingerabdruck eines Atoms / Moleküls

Als Spektrum (lat. spectrum = Erscheinung) bezeichnet man in der Physik die Gesamtheit der elektromagnetischen Wellen eines Wellenlängen- bzw. Frequenzbereiches, z. B. sichtbares Licht von $\lambda = 400 \text{ nm}$ bis 700 nm bzw. von $f = 7,50 \cdot 10^{14}$ bis $4,28 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Es ist zu unterscheiden zwischen Emissions- und Absorptionsspektren.

Heiße Körper, wie eine Glühlampe oder auch die Sonne, senden ein **kontinuierliches Emissionsspektrum** aus, das wir als weißes Licht kennen und auch als Regenbogen.

Atome und Moleküle eines verdünnten Gases emittieren dem gegenüber ein **diskretes Emissionsspektrum**, das auch als Linienspektrum bezeichnet wird. Diese Linien sind charakteristisch für das jeweilige Atom / Molekül.

Durchstrahlt man mit weißem Licht nicht zu heiße Körper, Atome oder Moleküle, so kann es sein, dass im an sich kontinuierlichen Spektrum des weißen Lichts nach der Durchstrahlung einzelne Linien oder auch ganze Bereiche fehlen. In diesem Fall handelt es sich um ein **diskretes Absorptionsspektrum**.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler brauchen also „nur“ festzustellen:

- welche Wellenlängen in einem diskreten **Emissions**-Spektrum **da sind** (bunte Emissionslinien) **oder**
- welche Wellenlängen in einem diskreten **Absorptions**-Spektrum **fehlen** (schwarze Absorptionslinien) um sagen zu können, welche Atome und Moleküle in der Lichtquelle, z. B. in einem Stern oder einer Gaswolke vorhanden sind (Licht wird emittiert) bzw. welche Atome und Moleküle einer Lichtquelle im Weg stehen (Licht wird absorbiert).

Und alle Beobachtungen mit Teleskopen sagen:

Alle kosmischen Objekte, die am Nachthimmel zu sehen sind, bestehen aus den gleichen Atomen wie die Sonne, die Erde und auch die Lebewesen auf der Erde: 92 natürliche chemische Elemente. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Naturgesetze überall im Universum dieselben sind und das wird als das **Erste kosmologische Prinzip** bezeichnet.

Mehr noch:

Je ferner die Lichtquellen sind, z. B. die Cepheiden, umso stärker ist die Rotverschiebung und zwar unabhängig von der Richtung, aus der die Teleskope das Licht einsammeln.

Grund für die beobachtete Farbverschiebung nach **rot** ist die Expansion des Universums. Wird Licht von einer fernen Galaxie emittiert, dann kommt es nach einer bestimmten Laufzeit auf der Erde an. Hat sich das Universum in dieser Zeit, sagen wir um 10 %, ausgedehnt, dann hat sich auch die Wellenlänge des Lichts in diesem Zeitraum um 10 % vergrößert, d. h. **blau** wird zu **grün** / **grün** wird zu **gelb** / **gelb** wird zu **rot** / usw. Je größer die Entfernung ist, die das Licht zurückgelegt hat, umso größer ist auch die Rotverschiebung, die es erfahren hat, bevor es die Erde erreichte. Ein aus sehr weiter Entfernung ausgesendeter **blauer** Lichtstrahl ist somit erst nach und nach **grün**, dann **gelb**, dann **rot** und dann infrarot und somit für unser Auge unsichtbar geworden. Aus 13,8 Milliarden km Entfernung erreicht uns jetzt die Mikrowellenhintergrundstrahlung von der Wand mit der Fläche der letzten Streuung.

Das bedeutet, dass die Distanz zwischen der Erde und fernen Galaxien permanent größer wird. Das Weltall dehnt sich aus zwischen den Galaxien. Es ist also nicht statisch, sondern verändert sich mit der Zeit. Es ist aber nicht so, dass sich die schon fernen Galaxien weiter von uns weg bewegen, sondern die Distanz wächst, die uns von den schon fernen Galaxien trennt. Die Leere des Raumes wird gedehnt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nennen das die **Expansion des Universums** und meinen damit, dass das Universum aus sich herausexpandiert. Mit der weiteren und seit rund fünf Milliarden Jahren beschleunigten* Ausdehnung wird das Licht immer langwelliger und in sehr ferner Zukunft nicht mehr zu messen sein, für intelligente Lebewesen.

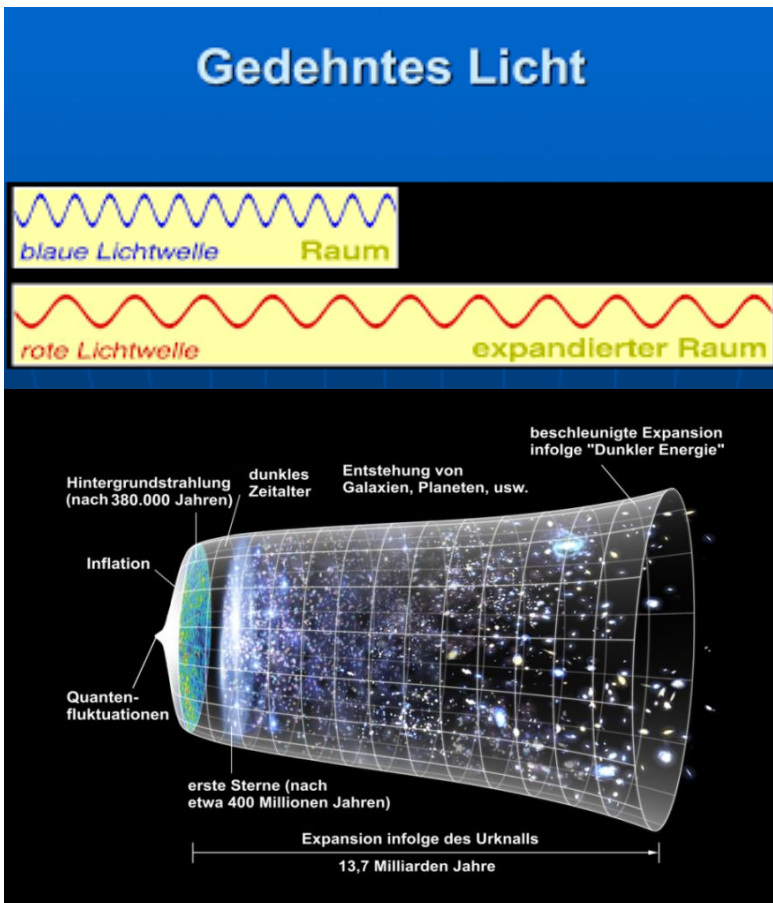


Bild oben: greiterweb.de

Bild: wikipedia.org

Wiederholung: Egal von welchem Punkt von der Erde aus wir ins Weltall schauen, ob von Sidney oder Frankfurt a. M., von Ecuador oder der Antarktis, immer sehen wir die fernen Galaxien mit der Farbverschiebung nach **rot** und je weiter sie von uns entfernt sind, um so langwelliger ist ihr Licht, bzw. gedehnter ist der Raum zwischen den fernen Galaxien.

Was ist daraus zu schließen?

Wenn sich in weiter Ferne alles von der Erde entfernt, bedeutet das dann, dass wir, wieder mal, der Mittelpunkt des Universums sind? Die große Mehrheit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler geht derzeit davon aus, dass die Position der Erde im Universum **nicht privilegiert** ist. Wir sind aber im Zentrum des für uns **sichtbaren** und somit **beobachtbaren** Universums, wie schon erwähnt auf Seite 49. Und dasselbe gilt für jeden Ort des Universums:

Jeder ist im Zentrum des von seinem Standpunkt aus sichtbaren Universums!

Diese Beobachtungen und Überlegungen führten, neben dem ersten, zu zwei weiteren kosmologischen Prinzipien*

1. kosmologisches Prinzip → **Alle Naturgesetze sind überall dieselben!**
2. kosmologisches Prinzip → **Es gibt nirgends im Weltall eine privilegierte Position!**
3. kosmologisches Prinzip → **Jeder Beobachter im Weltall sieht in alle Richtungen das Gleiche, ferne Galaxien, die sich weiter von ihm entfernen!**

Das dritte kosmologische Prinzip gilt also nicht für Objekte, die sich in unserer Nähe befinden, wie die Satelliten im Erdorbit, den Mond, die Sonne, die Sterne der Milchstraße und auch nicht für die Galaxien der lokalen Gruppe, denn Andromeda und Milchstraße bewegen sich ja aufeinander zu. Das dritte kosmologische Prinzip gilt für das Universum im größtmöglichen Maßstab und es besagt, dass das Weltall immer nahezu gleich aussieht, egal von wo aus man in welche Richtung Ausschau hält. In der Kosmologie sind Galaxien von der Größe der Milchstraße auch nur „**Punkteilchen**“!

Aber wie ist das zu verstehen?

Wir haben doch das Universum „bereist“ und dabei gesehen, dass es nicht überall so aussah wie von der Erde aus, z. B. als wir in einer Entfernung von 13,5 Milliarden Lichtjahren kaum noch Sterne, geschweige denn Galaxien, ausmachen konnten.

Wir müssen uns im Klaren darüber sein dass das, was wir am Nachthimmel sehen (Mond, Planeten, Sterne, Galaxien, ...), nicht dem entspricht, was es selbst jetzt ist, sondern es entspricht einem Abschnitt seiner Vergangenheit → Mond: gut eine Sekunde / Planeten: von Minuten bis zu Stunden / Sterne: Jahre, Jahrzehnte, Jahrhunderte, Und in unserem Fall, einer von der Erde aus betrachteten Vergangenheit, weil wir auf der Erde sind. Kleiner Scherz am Rande: Astronominen und Astronomen sind demnach auch immer Historikerinnen und Historiker (Prof. H. Lesch). Auch Beobachter auf Planeten in Sonnensystemen weit entfernter Galaxien sähen ihr Universum im größtmöglichen Maßstab so wie wir von der Erde aus → farbverschoben nach **rot**. Und auch sie wären umgeben von der Gesamtheit der Informationen die sie aus ihrer Vergangenheit erreichen. Auch sie sähen in 13,5 Milliarden Lichtjahren Entfernung kaum noch Sterne, geschweige denn Galaxien. Auch sie hätten ihre Wand mit der Fläche der letzten Streuung.

*) Kosmologie ist die Wissenschaft, die Ursprung, Entwicklung und Struktur des Universums erforscht.

Um das Große und Ganze des Universums zu verstehen müsste man alle Vergangenheiten aller Punkte des Universums zusammensetzen. Einer dieser Punkte wäre z. B. die Erde, andere Punkte wären die Planeten x, y, z in den Sonnensystem u, v, w. Und während benachbarte Orte (Erde – Proxima B) natürlich Vergangenheiten mit großen Schnittmengen haben, so haben die Vergangenheiten von weiter entfernten Orten (Erde – bevölkerter Planet in einem Sonnensystem des Formax-Galaxienhaufens) geringere Schnittmengen und je nach Entfernung sogar überhaupt keine. Dennoch sollten alle Orte als gleichrangig angesehen werden, denn das besagt das dritte kosmologische Prinzip. Das bedeutet, wie oben angeführt, schlicht und einfach:

Es gibt keinen Mittelpunkt des Universums. Jeder Beobachter ist Mittelpunkt seines sichtbaren Universums!

Mit dem Licht, das ihn erreicht - aus der Vergangenheit - kann er sein Universum erforschen. Und er kann deshalb so weit ins Universum schauen, weil da nichts ist, was das Licht verschluckt → mittlere Dichte Milchstraße: 1 Teilchen pro cm^3 / mittlere Dichte Universum: 1 Teilchen pro m^3 .

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben herausgefunden, wie schon erwähnt, dass sich die Distanzen zwischen **weit entfernten** Galaxien fortwährend vergrößern. Diese Expansion des Raumes hat Edwin Hubble im Jahr 1929 entdeckt und das Gesetz, das die Expansion beschreibt, ist die nach ihm so genannte **Hubble-Konstante** (siehe Excel-Tab. Sammelsurium Seite 9).

Hubble kann, angesichts dieser Entdeckung, als einer der Väter der beobachtenden Kosmologie bezeichnet werden. Seine Entdeckungen wären, nach heutigen Maßstäben, des Nobelpreises würdig gewesen. Aber er hat den Preis nie erhalten, weil zur damaligen Zeit die Beobachtung von Sternen, samt dem Versuch Schlüsse daraus zu ziehen, nicht als Teil der Physik angesehen wurde. Das hat sich seit Hubbles Tod geändert und seither sind schon viele Astronominnen und Astronomen mit dem Nobelpreis geehrt worden.

Hubbles, auf Beobachtungen basierende Konstante, besagt, dass der Abstand zwischen der Erde und den **sehr weit** entfernten Galaxien immer größer wird. Das meint, dass der Abstand selbst, also der Raum zwischen den Galaxien, expandiert (wie die Rosinen in einem Rosinenbrot) und sich dadurch die Galaxien immer weiter voneinander entfernen. Der Stoff aus dem das Universum besteht (Vakuumenergie und virtuelle Quantenteilchen) dehnt sich aus und muss daher mal kleiner gewesen sein. Und das kann bewiesen werden. Und diese Wand mit der Fläche der letzten Streuung, an der wir bei unserer vermeintlichen Reise in die Vergangenheit gestoppt wurden, birgt den Schlüssel zum Verstehen dieser Gegebenheit. Später mehr dazu!

Visualisierung der Reise	https://www.youtube.com/watch?v=rHYEJO23hIQ	4 min
Kosmos im Maßstab 1:1.000.000.000.000	https://www.youtube.com/watch?v=LR7A2OgC1hU	12 min
Wir groß ist das Universum?	https://www.youtube.com/watch?v=FmUBRo5yAEY	15 min
Warum wird es nachts dunkel?	https://www.youtube.com/watch?v=yS1kQGqjY6I	10 min

Fiktionen zur Schwerkraft

Alles unterliegt der Schwerkraft und alles erzeugt die Schwerkraft!

Du begibst dich noch einmal in den „gravitationsfreien“ Weltraum. Diesmal nicht als Geistwesen, sondern als Raumfahrer in einem Raumanzug. Mit allem Drum und Dran wiegst du $m_1 = 100 \text{ kg}$ und schwebst in unendlicher Dunkelheit, die mit Lichtpunkten gespickt ist. In deiner weit ausgestreckten Hand hältst du einen $m_2 = 150 \text{ g}$ schweren Apfel der tiefgefroren ist, wegen der Umgebungstemperatur von rund -270 °C . Du lässt den Apfel los und er bleibt anfangs an der Stelle an der du ihn losgelassen hast, so einen Meter von dir weg. Nach einer gewissen „langen“ Zeit stellst du fest, dass dein Apfel ein winziges Stück auf dich zugekommen ist. Du denkst an Newton: „Ein Apfel fällt vom Baum“. Wolltest du den Apfel loswerden, dann müsstest du ihn von dir weg stoßen, eine Winzigkeit mehr als mit der Fluchtgeschwindigkeit von $v_F = 4,7167 \cdot 10^{-9} \text{ km/s}$, denn sonst zieht die Schwerkraft $F_1 = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ N}$ ihn immer wieder zu dir hin, wie auch seine Schwerkraft $F_2 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ N}$ dich zu ihm zieht. Aber du willst den Apfel behalten.

Dann saust plötzlich ein Asteroid von der Größe des Himalaya´ längs und erfasst dich, samt dem vor dir schwebenden Apfel, mit seiner Schwerkraft und zieht euch an sich und ihr setzt gleichzeitig und auch einigermaßen sanft, auf seiner Oberfläche auf. Dir fällt Galilei ein: „**Alle Körper fallen gleich schnell!**“. Nach dem Schreck machst du es dir bequem auf dem Felsbrocken und genießt den Blick ins tiefe Weltall und gibst dich vollkommener Entspannung hin.

Dann nimmst du wahr, dass der Felsbrocken, auf dem es dir gerade so gut geht, nicht mehr „geradeaus“ fliegt, sondern seine Bahn sich in die Richtung eines vagabundierenden Planeten krümmt, der sich im Nirgendwo des Raumes verloren hat und auf der wohl vergeblichen Suche nach einem neuen Heimatstern ist. Als dein Asteroid Fahrt aufnimmt und sich dem Planeten immer schneller nähert, kriegst du es mit der Angst zu tun, denn du befürchtest, dass der Asteroid, samt dir und dem Apfel, auf ihn hinab stürzen könnte. Deshalb stößt du dich, den Apfel aber zurücklassend, so fest du nur kannst von dem Asteroiden ab und versuchst, unter zusätzlichen Kraulbewegungen, der Gefahrenzone zu entkommen. Nach einem Moment erkennst du, dass dein Manöver müßig war, denn der Asteroid befindet sich, entgegen deiner ursprünglichen Annahme und Befürchtung, doch nicht auf Kollisionskurs.

Was dir auch klar wird: Du kannst dich zwar von einem Asteroiden abstoßen; aber schwimmen im All? Das geht nicht! Und so saust du im Gefälle der Schwerkraft des Planeten immer schneller zu ihm hinab, verfehlt aber zum Glück seine Oberfläche um einige tausend Kilometer und statt auf ihm aufzuschlagen bewegst du dich an ihm entlang, um dann gemeinsam mit dem Asteroiden wieder ins All geschleudert zu werden und das mit einer höheren Geschwindigkeit als zuvor, also vor dem Fallen zum Planeten. Grund: Der Asteroid und du habt dem Planeten kinetische Energie entzogen (swing by*).

Minuten später, der Planet entschwindet unaufhaltsam in den Weiten des Weltraums, landest du wieder auf deinem Asteroiden und siehe da, der Apfel liegt noch genau da, wo du ihn vor deinem vermeintlich rettenden Sprung hast liegen lassen. Daran erkennst du, dass der Asteroid dich und den Apfel zu jedem Zeitpunkt mit seiner Schwerkraft an sich gebunden hat und bist ein wenig erstaunt darüber, dass du dich genauso schnell im Schwerkraftgefälle des Planeten bewegt hast wie der Asteroid von der Größe des Himalaya´. Du denkst an Galilei → „**Alle Körper fallen gleich schnell!**“ und spürst auf einmal:

Der Schwerkraft unterliegen bedeutet die **Gefälle** hinab zu gleiten, die **Materie** und **Energie** in der **Raumzeit** hervorrufen!

Prof. H. Lesch <https://www.youtube.com/watch?v=omg9MmhZG-U> 3 min

*) Swing-by kann sowohl beschleunigen als auch abbremsen, je nachdem von welcher Seite und in welchem Winkel unserer hier Asteroid am Planeten vorbeifliegt. Das Ganze ist reiner Impulsaustausch im Schwerfeld des Planeten. Nützlich ist der Effekt bei Missionen von Sonden im All zudem, weil so auch Treibstoff gespart wird.

Dieser Gedanke muss sich erst einmal setzen! So nimmst du Platz auf deinem Asteroiden, blickst in die Weiten des Alls hinaus und konzentriert dich auf das, was diese Aussage meint. In deiner Gedankenwelt siehst du überall Asteroiden, Sterne mit Planeten und Galaxien, um die herum Krümmungen sind. Das erkennst du daran, dass Strahlen von hellen fernen Lichtquellen in Gefällen oder Steigungen entlang dieser Krümmungen zu gleiten scheinen. Damit wird dir auch klar, dass Licht, wie Materie auch, sich im Weltraum nicht immer geradlinig fortbewegt. Und je schwerer, also je mehr Masse / Materie ein Objekt hat und je dichter es ist und je näher ein Lichtstrahl oder Asteroid an ihm vorbei führt, umso stärker ist auch die Ablenkung, die der Lichtstrahl oder der Materiebrocken erfährt (**Sammelsurium Seite 4**). Und während du auf dem Asteroiden sitzt und das alles so siehst, gleitest auch du ein Gefälle hinab. Beim Asteroiden wird es von ihm selbst, nämlich von seiner Masse über die Krümmung der Raumzeit erzeugt. Wenn du nicht das Gefühl hast zu fallen und somit nicht schwerelos zu sein, dann liegt das an der harten Felsoberfläche, die dich daran hindert weiter zu fallen, genauso, wie es auf der Erde der Fall ist. Und jetzt fällt dir die Begebenheit mit dem Apfel wieder ein, den du, im Weltall schwebend, vor dich gehalten und losgelassen hattest und der sich dann auf dich zu bewegt hat, wenn auch **sehr, sehr langsam**. Er wurde gar nicht von deiner Schwerkraft zu dir hingezogen, sondern ist im Gefälle der Krümmung der Raumzeit, die du mit deiner Masse bewirkt hattest, auf dich gefallen, wenn auch mit **sehr, sehr geringer** Fallbeschleunigung.

John A. Wheeler, US-amerikanischer Physiker (1911 – 2008), der 1967 auch den Begriff "Schwarzes Loch" eingeführt hat, erklärt:

„Die Masse (auch du) greift die Raumzeit, indem sie deren Krümmung bestimmt, und die Raumzeit greift die Masse (auch deinen Apfel), indem sie deren Bewegung bestimmt.“

Dieser Satz beschreibt treffend die Struktur der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Der erste Satzteil steht für eine Feldgleichung (linke Seite der Einsteingleichung, s. S. 26) und besagt:
Quelle des Gravitationsfeldes ist die Masse oder die Masse erzeugt ein Gravitationsfeld und das ist die gekrümmte Raumzeit.

Der zweite Satzteil steht für eine Bewegungsgleichung (rechte Seite der Einsteingleichung, s. S. 26) und besagt:
Wenn man weiß, wie die Raumzeit gekrümmt ist, dann weiß man auch wie sich die Masse bewegt.

Als du schon die Rückkehr zur Erde beschließt fällt dir auf, dass sich unweit ein Loch von einem Meter Durchmesser auftut. Du siehst nach und erkennst, dass es geradewegs durch den Mittelpunkt des „kreisrunden“ Asteroiden führt und du so auch Sterne auf der gegenüberliegenden Seite sehen kannst. Du beugst dich vor, zu spät, schon bist du hinein gefallen. Harmonisch schwingst du nun, mit der Periodendauer **T = 1 Stunde, 24 Minuten und 23 Sekunden**, von der einen zu der anderen Seite des Asteroiden. Von Beschleunigungskräften merkst du nichts, weil du im freien Fall bist. Die Periodendauer kommt dir irgendwie bekannt vor. Ja, sie ist gerade so, als würdest du von Deutschland durch den Schwerpunkt der Erde nach Neuseeland fallen. Das sagt dir, der Asteroid hat die gleiche „homogene“ Dichte wie die Erde: **5508 kg/m³ (siehe Excel-Tab. Kepler und Newton Seite 5)**.

Nach einigen Perioden greifst du mit ausgestreckten Händen den Rand des Lochs, um dich rauszuziehen und endlich die Heimreise anzutreten. Der Apfel soll bleiben und so lässt du in das Loch fallen und siehe da, er schwingt mit der gleichen Periodendauer wie du zuvor. Und wieder denkst du an Galilei: **„Alle Körper fallen (auch schwingend, oszillierend, pendelnd, ...) gleich schnell!“**.

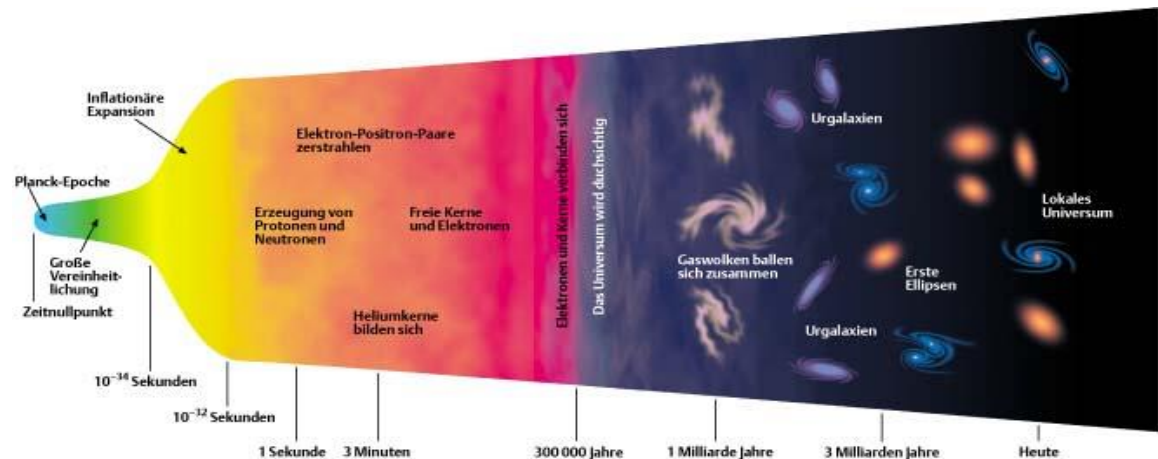
Resümee der Reise durch das für uns sichtbare Universum

Wir denken nach über unsere Reise durchs Universum, die wir als vermeintliche Geistwesen gemacht hatten. Es war eine Reise in die Vergangenheit. Der Ort, an dem die Reise abrupt endete, war die Wand mit der Fläche der letzten Streuung. Sie markiert das Ende des für uns sichtbaren Universums. Bis dahin und nicht weiter können wir, von der Erde aus, **elektromagnetisch** ins All schauen, so wie intelligente Kreaturen auf Planeten anderer Sonnensysteme dies auch können bzw. könnten. Kein Licht und somit keine Information **von jenseits** dieser Wand und **vor diesem Zeitpunkt** werden die Erde und Planeten anderer Sonnensysteme je erreichen*. Erinnert sei an die drei kosmologischen Prinzipien, siehe Seite 52.

Das von der Erde und Planeten anderer Sterne aus sichtbare Universum ist eine Kugel mit einem Radius von 13,8 Milliarden Lichtjahren.**

Wenn uns Licht von Sternen aus den Tiefen des Weltraums erreicht, dann sehen wir diese Sterne so, wie sie vor Milliarden Jahren aussahen, weil wir immer nur in die Vergangenheit schauen können, aber niemals dorthin reisen können. Und dieses Licht ist derzeit die einzige Informationsquelle, die uns aus den Weiten des Weltraums zur Verfügung steht. Hubble hat 1929, wie schon erörtert, entdeckt, dass Licht von fernen Galaxien ins **Rote** verschoben ist, was als Beweis dafür gilt, dass sich das Universum ausdehnt. Und wenn sich das Universum ausdehnt, dann muss es früher kleiner gewesen sein. Und wenn es mal kleiner war, dann muss es auch dichter gewesen sein. Und wenn die Dichte höher war, dann muss auch die Schwerkraft / Gravitation, sprich die Krümmung der Raumzeit, stärker gewesen sein, denn die gesamte Materie (= Energie) des Universums musste ja in einem kleineren Volumen enthalten gewesen sein. So sagen es jedenfalls die Gleichungen Albert Einsteins. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist immerhin die tragende Theorie des Kosmos (siehe auch Excel-Tab. ART). Sehr hohe Dichte impliziert, dass es sehr viel Reibung und andere Phänomene gegeben haben muss, im jungen Universum. Ergo muss es auch sehr heiß gewesen sein. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehen heute von einer Start-Temperatur von ungefähr $1,0 \cdot 10^{32}$ K aus (siehe Excel-Tab. „Sammelsurium“ Seite 10 v. 15).

Die Dichte war erst so hoch, dass sich kein Licht ausbreiten konnte. Mit Abkühlung auf $T = 3000$ K war die Dichte gering genug und die Lichtquanten konnten „davonlaufen“. Startfläche war die Wand mit der Fläche der letzten Streuung. Mithin ist diese Wand auch die Grenzschranke des für uns elektromagnetisch sichtbaren Universums, wie oben schon angeführt.



[Grafik; mrd-of-galaxie.npage.de](http://mrd-of-galaxie.npage.de)

*) Eventuell können Gravitationswellen einst Informationen liefern.

**) Zur Illustration stelle man sich das Universum als Oberfläche eines Ozeans vor, auf der die Erde als Modell in der Größe eines Sitzballs schwimmt. Der Horizont umgrenzt dann den von der Erde aus sichtbaren Teil der Ozeanoberfläche. Bewohner anderer Planeten haben auch ihren Horizont. Und wenn die Entfernungen nicht zu groß sind, dann gibt es auch sichtbare Bereiche mit Überschneidungen.

Apropos:

**Die Wand mit der Fläche der letzten Streuung, wie wir sie derzeit von der Erde aus sehen, ist sehr kalt.
Ihre Temperatur beträgt nur noch 2,72548 K bzw. -270,27452 °C.**

Die Temperatur, die geherrscht haben muss als das Universum 380.000 Jahre nach dem Urknall sichtbar geworden war, wurde nach Berechnungen, die die US-amerikanischen Physiker George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman um das Jahr 1948 angestellt hatten, auf ca. 3000 °C vorhergesagt und sollte, gemäß ihren Prognosen, bis in die heutige Zeit auf -260 bis -270 °C bzw. 3 bis 13 K abgesunken sein*.

Im Jahr 1965 wurde der kosmische Mikrowellenhintergrund, so die offizielle Bezeichnung, von den US-amerikanischen Physikern Arno Penzias und Woodrow Wilson, **rein zufällig**, entdeckt. Beim Installieren einer Horn-Antenne zum Empfang von Radiowellen, die von einem Ballonsatelliten in Richtung Erde reflektiert werden sollten, fiel ihnen ein Rauschen auf, das von **überall** her kam; es kam aus dem Weltall. Es war ein Signal mit einer Temperatur von 2,72548 K und war ein Schnappschuss von einem rund 13,8 Milliarden Jahre zurückliegenden Augenblick. Damals war das Universum sehr viel kleiner und daher so dicht mit Materie und Energie gepackt, dass sich das Licht darin nicht ausbreiten konnte, weil es ständig zu Streuungen der Lichtwellen / Photonen mit den bereits schon komplett in den ersten drei Minuten entstandenen Wasserstoff- und Heliumkernen sowie den Elektronen kam. Mit der zunehmenden Expansion verringerte sich die Dichte und infolgedessen die Temperatur in einem Maße, dass sich ab einer Temperatur von ca. 3000 °C Lichtwellen / Photonen ausbreiten konnten:

... und es ward Licht. ...

wie im **ERSTEN BUCH MOSE (GENESIS)** geschrieben steht.

Und warum Mikrowellenhintergrund? Das zu der Zeit der letzten Streuung ausgesandte Licht war zwar gut sichtbar, allerdings war niemand da, der es hätte sehen können, mit seinen Augen (**Gott?**). Es gab zu dieser Zeit quasi nur die Elemente Wasserstoff (75 %) und Helium (25 %). Die weiteren 90 der gesamt 92 natürlichen chemischen Elemente mussten ja noch „**erschaffen**“ werden, damit Lebewesen entstehen konnten die Licht sehen können. Das Licht hatte auch verschiedene Farben und somit verschiedene Wellenlängen und Frequenzen sprich Energien $E = h \cdot f$ (s. **Excel-Tab. Atomphysik S. 3**).

Wir können dieses Licht mit den Augen heute allerdings nicht mehr sehen, weil es im Zuge der Expansion des Universums über die lange Zeitspanne von 13,8 Milliarden Jahren zu sehr gedehnt wurde. Wie auf Seite 51 schon beschrieben, wurden aus der **tiefblauen** Farbe des Lichts zunächst **mittelblau**, dann **grün**, dann **gelb**, dann **orange**, dann **rot** und dann, unsichtbar für unsere Augen, infrarot und dann Radio- und jetzt Mikrowellenstrahlung. Daher kommt die Benennung Mikrowellenhintergrund. In diesem Stadium befinden wir uns jetzt. Was einst als heißes Licht von 3000 °C sichtbar gewesen wäre, wenn denn jemand hätte da sein können und schauen (**Gott?**), ist heute, wegen der Expansion des Universums, zu kaltem und so für uns unsichtbarem Mikrowellen-Licht geworden, mit einer Temperatur von 2,72548 K / -270,27425 °C.

*) Zur Veranschaulichung stelle man sich einen Backofen vor, den man anheizt und dadurch die Luft in seinem Inneren erwärmt. Vergrößert man nun das Volumen des Backofens auf die Größe eines Hauses, dann fällt die Temperatur proportional zum Volumen ab → Gasgesetze.

Was war denn einst jenseits der Wand mit der Fläche der letzten Streuung?

Informationen erhalten wir keine; aber die Naturgesetze sagen:

Hinter dieser Wand begann einst der Urknall!

Nicht direkt dahinter, sondern er ist ca. 380.000 Jahre vor dem ersten Tag der Lichtdurchlässigkeit des Universums erfolgt. Die Theorie geht davon aus, dass das, was sich einst hinter der Fläche befand, ein Gemisch war aus Materie, Energie, Licht und Krümmung, die immer dichter, heißer und extremer war, je weiter man in die Vergangenheit zurück geht oder anders formuliert, je näher man dem Urknall kommt. Sehr nah am Urknall versagt die Theorie Einsteins. Raum und Zeit sind dann so in sich eingerollt, dass Einsteins Gleichungen das Geschehen nicht mehr erklären können. Die Physikerinnen und Physiker sind an einem Punkt angekommen, an dem sie nichts Sinnvolles mehr sagen können. Und dieser Punkt kann als Augenblick der Geburt von Raum und Zeit, so wie wir diese Phänomene kennen, angesehen werden. Man kann auch sagen:

Vor dem Urknall war die Energie = Materie quasi ohne Raumzeit
(siehe Excel-Tab. Sammelsurium S. 10 ff).

Resümee:

- Das Universum ist eine Verbindung aus Raum und Zeit. Diese Verbindung wird Raumzeit genannt. Die Raumzeit wird geformt von dem was sie enthält, **Materie = Energie** und gibt über ihre Form die Bewegung für das vor, was sie enthält (Galaxien, Sonnen, Planeten, Astronauten, Äpfel, ..., Licht, also elektromagnetische Wellen). Die Raumzeit ist über alle Maßen weiträumig, man kann sie nicht vollständig sehen und weder ihre Form noch Ausdehnung kennen.
- Das für uns sichtbare Universum ist zwar sehr groß, aber das war es nicht immer.
- Das Universum hat eine Geschichte und mit höchster Wahrscheinlichkeit einen Anfang, der 13,8 Milliarden Jahre zurück liegt und hinter einer lichtundurchlässigen Fläche verborgen ist, die man als „Fläche der letzten Streuung“ charakterisieren kann.
- Das Universum hat sich stetig ausgedehnt und ist von Minute zu Minute größer geworden und tut das noch.

c) Reise an den Ursprung von Raum und Zeit

Ausführungen basieren auf dem Buch "Das Universum in deiner Hand" von Christophe Galfard (praktisch eine komprimierte Nacherzählung).

Wieder sind wir Geistwesen und verlassen die Erde und beziehen Position hoch über ihr, aber nicht zu weit weg, sagen wir 408 km, wie die Internationale Raumstation ISS, damit wir alles noch im Auge behalten können. Hier starten wir unsere Reise. Wenn wir normal, also körperlich, zu einem Stern reisen wollten, dann wären wir, je nach seiner Entfernung, eine mehr oder weniger lange Zeit unterwegs. Zum nächsten Nachbarstern Proxima Centauri wären das mindestens 4,2 Jahre, wenn wir mit Lichtgeschwindigkeit reisen könnten. Hätten wir ihn schließlich erreicht, dann wäre er nicht mehr derselbe, da er sich im Verlauf unserer Reisezeit weiterentwickelt hätte. Bei Reisen zu ferneren Sternen, in weit entfernten Galaxien, ist der Unterschied daher noch viel größer. Hinzu kommt, dass sich das Universum permanent ausdehnt, wie dies Hubble im Jahr 1929 festgestellt hat, was bedeutet, dass die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, sprich die gleichmäßige Temperatur des Universums von derzeit 2,72548 K, weiter abgenommen hätte. Und damit wäre die Wand mit der Fläche der letzten Streuung, also die Grenze des für uns beobachtbaren Universums, noch weiter entfernt. Das bedeutet dann:

Wenn man normal unterwegs ist, egal mit welcher Geschwindigkeit kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, kann man die Vergangenheit **niemals** erreichen.

Wie können wir dann aber in die Vergangenheit reisen?

Indem wir an Ort und Stelle verbleiben und die Raumzeit in Gedanken rückwärts laufen lassen und uns so in die Vergangenheit simulieren.

Ohne unseren Standort über der Erde zu verlassen, auf die wir jetzt entspannt hinunter blicken, beginnen wir unsere Reise, die uns rückwärts durch die Geschichte des Universums führt. Schon sind die ersten 7 Millionen Jahre in die Vergangenheit zurückgelegt und die Erde unter uns hat sich verändert. Es sind keine Städte, keine Straßen und keine blinkenden Lichter zu sehen. Die ersten Menschen beginnen gerade sich von den Affen zu unterscheiden. Wir schauen ins Weltall und stellen nichts besonders fest. Aber dennoch, für unsere Sinne unmerklich, hat sich etwas getan. Die Wand mit der Fläche der letzten Streuung und damit die Grenze des von uns aus sichtbaren Universums, ist etwas näher gerückt und die kosmische Hintergrundstrahlung minimal wärmer geworden. Aber 7 Millionen Jahre sind nicht viel, gerade mal 0,05 %, bezogen auf die 13,8 Milliarden Jahre alte Geschichte des Universums.

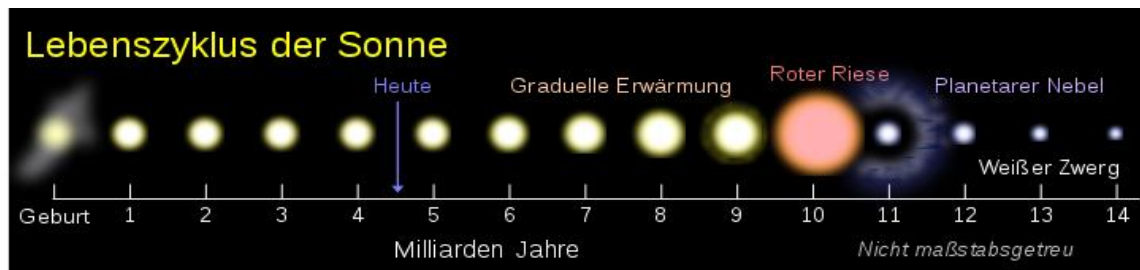
Die Zeit geht weiter zurück auf 65 Millionen Jahre. Soeben sind die Dinosaurier ausgerottet worden, eine Folge des Asteroideneinschlags auf der Yucatan-Halbinsel im Golf von Mexiko. Überlebt haben den Treffer auch Arten kleinerer Säugetiere. Aus einigen von ihnen ist im Zuge der Evolution auch der Mensch hervorgegangen: ... **SCHUF DEN MENSCHEN ... ALS MANN UND FRAU ...** (GENESIS, erstes Buch Mose)*. Beim Blick ins Weltall sehen wir immer noch keine nennenswerten Unterschiede zu vorher, obwohl die Hintergrundstrahlung weiter zugenommen hat. Auch 65 Millionen Jahre sind immer noch wenig (0,5 %) im kosmischen Zeit-Maßstab.

Wir reisen weiter und katapultieren uns nun vier Milliarden Jahre zurück in der Zeit. Die glühende Erde wurde soeben von einem mehr als marsgroßen Planeten gerammt und aus den dabei herausgeschleuderten Bruchstücken beginnt sich unser Mond zu formen (jedenfalls sagt das eine Theorie). Die Hintergrundstrahlung hat spürbar zugenommen und die Wand mit der Fläche der letzten Streuung ist deutlich näher gerückt. Das sichtbare Universum hatte zu dieser Zeit 70 % seiner heutigen Ausdehnung.

*) Heute können die Menschen darauf hoffen, dass ein gefährlich nahe kommender Asteroid frühzeitig entdeckt und von seinem Kurs abgelenkt werden kann.

Wir setzen unsere Reise fort und gehen noch ein paar Milliarden Jahre zurück in der Zeit. Das für uns sichtbare Universum ist jetzt nur halb so groß wie heute. Erde und Sonne gibt es noch nicht. Stattdessen sehen wir, wie Sterne am Ende ihres Lebens den überwiegenden Teil ihrer Materie in gewaltigen Explosionen ins Weltall stoßen und verteilen. In ein paar 100 Millionen Jahren werden sich Brocken und Staub und Gas in einer großen Wolke, die eine Dichte von 100 bis 1000 Teilchen pro cm^3 und eine Ausdehnung von 20 bis 50 Lichtjahren aufweisen wird, sammeln. Durch Gravitationswirkung wird, neben weiteren Sternen, an der Stelle der Wolke, an der wir jetzt sind, auch **unser Stern, die Sonne**, entstehen und mit der Fusion von Wasserstoff zu Helium beginnen und aufleuchten. Auch alle Planeten des Sonnensystems werden praktisch zeitgleich aus dem Material der Wolke durch den Einfluss der Schwerkraft gebildet. **Siehe Excel-Tabelle „Astronomie“.**

Die Wasserstoff-Fusion ist der kosmische Fundamentalprozess im Universum!

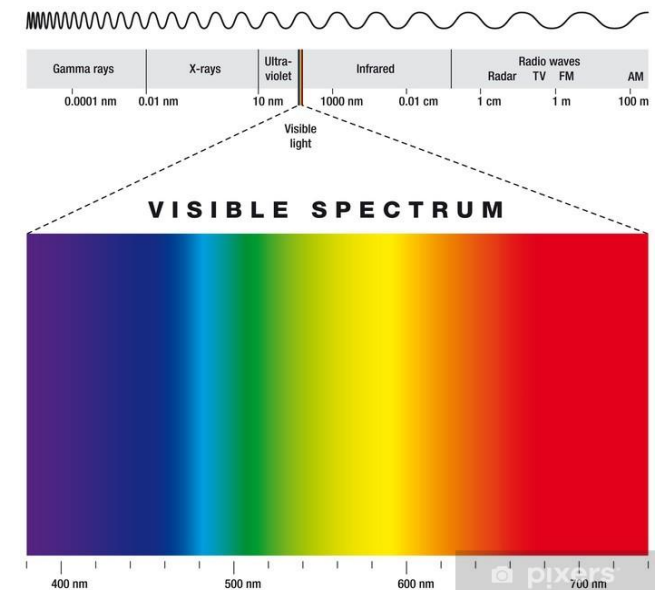


Es geht weiter zurück und wir stehen fünf Milliarden Jahre vor der Geburt der Erde oder, wenn man so will, 9,5 Milliarden Jahre vor unserer eigenen Geburt. Das sichtbare Universum hat nicht mal mehr 25 % der Größe von heute. Die Wand mit der Fläche der letzten Streuung ist noch näher herangerückt. Zwischen uns und der Wand bilden sich Galaxien rings um gewaltige schwarze Löcher, die ab und an mit großer Gewalt kollidieren.

Grafik: de.wikipedia.org

Weiter geht's rückwärts in der Zeit, bis 13,7 Milliarden Jahre. Wir sind aber noch an dem Ort, an dem unsere Erde einst sein wird bzw. jetzt ist. Doch das für uns sichtbare Universum, hat nur noch 0,5 % der heutigen Größe. Die Wand mit der Fläche der letzten Streuung ist bis auf 100 Millionen Lichtjahre näher gerückt. Und anders als bei der ersten Reise ins Zentrum des Universums, als wir 13,7 Milliarden Jahre in die Vergangenheit zurück geschaut hatten und es mit 2,72548 K bzw. $-270,45\text{ }^\circ\text{C}$ sehr kalt war, ist es jetzt heiß. Die ersten Sterne sind noch nicht aufgeflammt und die Materie vor unseren Augen hat noch keine Kernfusion durchlaufen, so dass wir ringsum von den kleinsten existierenden Atomen umgeben sind, Wasserstoff (75 %) und Helium (25 %) und Spuren von Lithium.

Die kosmische Hintergrundstrahlung von heute $T = 2,72548\text{ K}$, mit Wellenlängen im Bereich von Mikrowellen und von daher für uns unsichtbar, umfasst nun auch den für uns sichtbaren Anteil von 400 - 700 Nanometer Wellenlänge, so dass für uns alles hell erleuchtet ist. Wir sehen jetzt das Licht, das das Universum ursprünglich ausfüllte, ein Licht, das erst viel später, nach Milliarden Jahren kosmischer Expansion, zur Mikrowellenstrahlung wurde.



Kurz vor der Wand mit der Fläche der letzten Streuung

Wir begeben uns weitere 100 Millionen Jahre zurück in der Zeit und befinden uns jetzt 13,8 Milliarden Jahre in der Vergangenheit und nur noch eine Lichtminute entfernt von dieser ominösen Wand. Licht, das an dieser Stelle in unsere Augen gelangt, ist erst vor 60 Sekunden sichtbar geworden. Somit hat das für uns sichtbare Universum eine Tiefe bzw. einen Radius von einer Lichtminute. Die Temperatur beträgt ca. 3000 °C bzw. 3273 K (siehe auch Grafik unten rechts).

Hinter der Wand mit der Fläche der letzten Streuung

Wir drehen die Zeit eine Minute zurück und die Fläche der letzten Streuung befindet sich jetzt direkt vor uns. Nur noch einen Schritt und wir befinden uns jenseits der Wand und haben das Unsichtbare erreicht. Es gibt kein für uns sichtbares Universum mehr. Wir sind in einem Teil des Universums angelangt, der niemals bei Licht angeschaut werden kann. Wir sehen auch nichts, denn Licht dringt nicht bis hierher vor, es gibt einfach zu viel Energie.

Noch 380.000 Jahre bis zum Urknall

Wir befinden uns im Äther-Modus und sind Geistwesen und bemerken, dass das Universum hinter der Wand mit der Fläche der letzten Streuung, d. h. das Universum jenseits des für uns sichtbaren Universums, groß ist und seit mindestens 380.000 Jahren existiert. Die Umgebungstemperatur liegt bei rund 5000 °C. Wir konzentrieren uns auf das was uns umgibt und das sind Elektronen, die eines Tages, im Verlauf weiterer Expansion des Universums, gemeinsam mit losen Atomkernen (Protonen, Neutronen) zu Wasserstoff- und Heliumatomen werden.

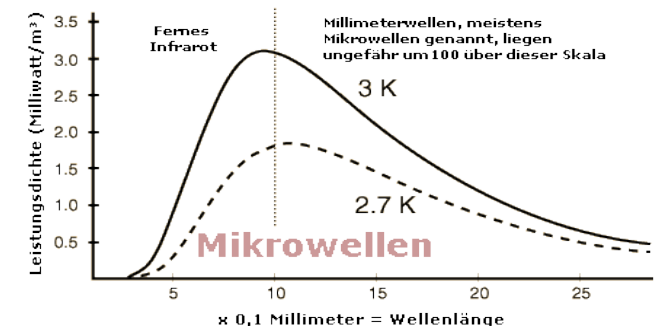
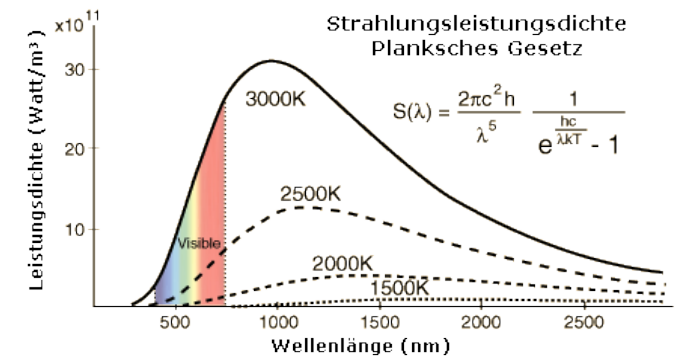
Die Elektronen schwirren hier allein umher und sind den Photonen, das sind die Lichtquanten, bei Ihrer Entstehung behilflich. Denn als Folge von Zusammenstößen untereinander bewegt sich solch ein Elektron beschleunigt oder verzögert und ändert auch dauernd seine Richtung was dazu führt, dass zwangsläufig ein elektromagnetisches Feld aufgebaut wird, welches zugleich zu schwingen beginnt und dadurch zeitgleich ein Photon entsteht:

Ein Lichtquant ist geboren!

Ein Photon kann sich auch selbst zur Geburt verhelfen. Dies geschieht dann, wenn es auf ein Elektron prallt und diesem einen Schubs gibt. Das Elektron wird beschleunigt und beschleunigte Ladungen erzeugen elektromagnetische Wellen:

Ein Lichtquant ist geboren!

Photonen stoßen also auch dauernd mit Elektronen zusammen und so erschafft sich das Licht selbst, durch permanente Interaktion mit Materie. Nur loslaufen und sichtbar werden kann es erst, wenn das Universum seine Energie durch die weitere Expansion von 5000 °C auf 3000 °C herunter gefahren hat. Aus hiesiger Sicht wird das Universum jenseits der Wand mit der Fläche der letzten Streuung dann durchsichtig werden, da dort die Energie- bzw. Materiedichte so gering ist, dass die Lichtquanten ihre Reise in die Weiten des Weltalls antreten können und schließlich auch nach einer Laufzeit von etwa 13,8 Milliarden Jahren die Erde „jetzt“ erreichen.



Die Zeit geht weiter rückwärts, zehntausende Jahre: Wir sind umgeben von einer noch dichteren Teilchenfülle, einer Mischung aus allen Anregungen der Quantenfelder, ihren Elementarteilchen und Austauscheteilchen. Laufend stoßen sie aneinander und können sich nicht lange unabhängig bewegen. Da ist so viel Energie im Spiel, das sie ständig auftauchen, kollidieren und verschwinden. Und je weiter wir in der Zeit zurückgehen, umso mehr schrumpft das Universum und umso größer werden Energiedichte und Temperatur und umso heftiger werden die Reaktionen.

Noch drei Minuten bis zum Urknall

Das Universum ist kleiner und dichter geworden. Druck und Temperatur und die Effekte der Schwerkraft, also die Krümmung der Raumzeit, nehmen mehr und mehr zu und steigen ins Unermessliche als wir 380.000 Jahre vor dem Zeitpunkt, an dem das Universum durchsichtig wurde, angekommen sind. Mit einem Teleskop von der Erde aus gesehen befinden wir uns 380.000 Jahre jenseits der Wand mit der Fläche der letzten Streuung, die die Grenze des für uns sichtbaren Universums markiert. Oder umgekehrt: Uns trennen nur noch drei Minuten von dem, was man die Geburt von Raum und Zeit nennen könnte. In dieser Phase sind **alle** Wasserstoffatome entstanden, die es je gab, sowie der größte Teil der heute gegenwärtigen Heliumatome und auch eine geringe Menge Lithium7-Atome. Zustandsform ist das Plasma. **Alle** anderen der insgesamt 92 natürlichen Elemente des Universums wurden später in Sternen erbrütet* und werden es immer noch und weiterhin, für lange Zeit, aber nicht unendlich lange.

Die Zeit geht weiter zurück. Die Energie steigt jetzt so enorm, dass die Atomkerne aufbrechen und sich Protonen und Neutronen frei bewegen können. Mit weiter rückwärts laufender Zeit und Verkleinerung des Universums und damit einhergehender Erhöhung der Energiedichte verwandeln sich die Protonen in Neutronen und verschwinden so aus dem Universum. Angestoßen wird der Vorgang von den eigenen Austauscheteilchen der Quarks, den **Gluonen**, die Träger der starken Wechselwirkung / Kernkraft sind (siehe Tab. Atomphysik S. 12 v. 13). Die Temperatur liegt hier bei 100 Milliarden Grad, überall.

Noch eine Sekunde bis zum Urknall

Und weiter geht es rückwärts. Mit jedem weiteren Bruchteil einer Sekunde wandeln sich nun die uns nun umgebenden Lichtpartikel in Paare aus **Materie und Antimaterie**, überall. Von dem einen scheint es genau so viel zu geben wie von dem anderen. Dass es heute nur Materie gibt liegt wohl daran, dass das Gleichgewicht irgendwie gestört wurde. Wie ist aber noch unklar und wird im LHC im CERN erforscht. Alles rings rum ist mit unfassbar hoher Energie angefüllt, einer Energie, die das Universum in eine Kugel von 100 Lichtjahren Durchmesser presst. Solch eine Sphäre, mit der heutigen Erde im Mittelpunkt, enthält ca. 5000 Sterne, siehe Bild Nr. 4 auf Seite 49. Damals enthielt sie die Energie um hunderte Milliarden Galaxien mit je hunderten Milliarden von Sternen entstehen zu lassen.

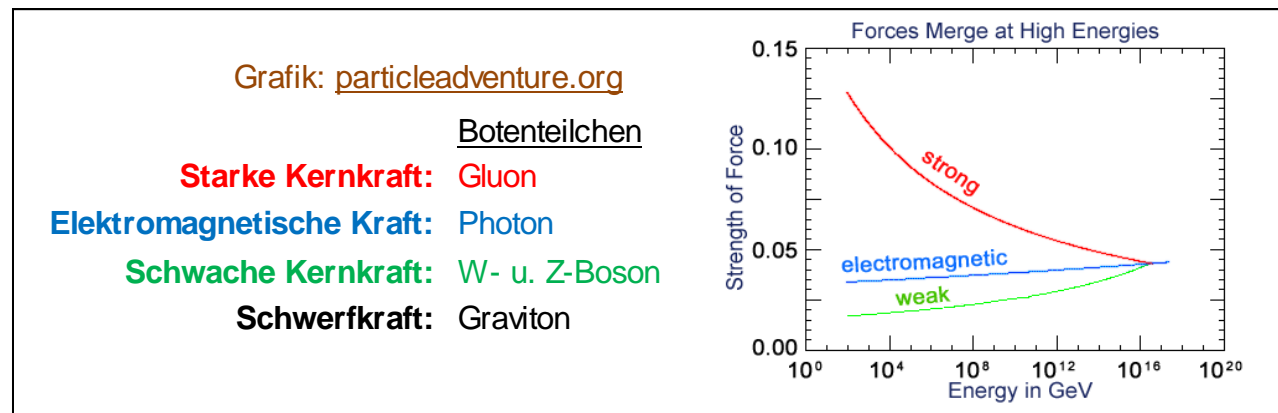
Noch eine millionstel Sekunde bis zum Urknall

Die Zeit schrumpft weiter und wir sind eine Millionstel Sekunde vom endgültigen Ziel entfernt. Die Temperatur ist auf eine Billiarde (10^{15}) Grad gestiegen. Die Neutronen fallen auseinander und die Quarks reagieren mit ihren Gegenstücken und verwandeln sich in reine Energie ($E = m \cdot c^2$). Der Unterschied zwischen Materie, Licht und Energie ist komplett überflüssig geworden. Die schwache Wechselwirkung bzw. schwache Kernkraft ist aktiv und es tauchen die zugehörigen Austauscheteilchen auf, die W- u. Z-Bosonen, während die starke Wechselwirkung bzw. starke Kernkraft mit Quarks und Antiquarks samt ihren Botenteilchen, den Gluonen und auch das Higgs-Feld mit den Higgs-Teilchen verschwinden. Dieses Teilchen wurde von dem schottischen Physiker Peter Higgs, geb. 1929, postuliert und im Juli 2012 am LHC im CERN nachgewiesen (siehe Seite 77).

*) Die ersten Sterne, die sich nach dem dunklen Zeitalter formten, bestanden aus 75 % H, 25 % He. Sonne heute: 71,6 % H, 27 % He, 1,4 % alles andere.

Das Universum ist 100 Trillionen ($100 \cdot 10^{18}$) Grad heiß und 10^{-30} Sekunden nach dem angenommenen Zeitnullpunkt eine Kugel mit 10 m Durchmesser, die sich noch weiter zusammenzieht und 10^{27} Grad heiß ist. Die Felder der Grundkräfte, die sämtliche Materie ausmachen, vereinen sich gemäß GUT (**Grand Unified Theory**) zu einem großen vereinheitlichten Feld. Die Schwerkraft liegt außerhalb dieser Vereinigung (siehe Bild auf Seite 61). Ab 10^{-30} Sekunden nach dem Urknall ist die Entwicklung der grundlegenden Struktur des Universums mit den herkömmlichen Gesetzen der Physik - Newtons Gravitation, Einsteins Relativitätstheorie, Quantentheorie, ... - erklärbar.

Das Ziel ist fast erreicht.



→ Siehe Excel-Tab. Atomphysik Seite 13

Wir haben den Augenblick erreicht, in dem die Energie des großen vereinten Feldes (GUT) sich in (Kraft-)Teilchen verwandelt. Obwohl die experimentelle Physik diesen Punkt nie erreicht hat, rechnet der Computer weiter und so setzen wir die Reise fort und die Zeit geht weiter zurück. Plötzlich verschwindet sämtliche Energie und Materie und alles kühlt sich rasant ab. Die Energie verwandelt sich in ein anderes, uns unbekanntes Feld und dieses Feld heißt **Inflationsfeld**. Es wird angenommen, dass es für die Expansion des Universums verantwortlich ist. Auf einmal beschleunigen sich die Dinge und das Universum kollabiert in wahnsinnigem Tempo auf eine Größe, die Milliarden mal kleiner ist als ein Proton. Diesen Vorgang bezeichnet die Wissenschaft als die **kosmologische Inflation**, die wir aktuell, aus Sicht unserer Reiserichtung, als Deflation vernehmen. Diese Expansion kann **überlichtschnell** sein, da sich nichts bewegt und nur der Raum wächst (s. S. 65). Nach der Theorie dehnte sich das Universum so in der Zeitspanne 10^{-36} bis 10^{-32} Sekunden nach dem Urknall um den Faktor mindestens 10^{30} aus (entspricht der Ausdehnung eines Atoms (10^{-10} m) auf mehrere Lichtjahre), was bedeutet, Quantenfluktuationen wurden in dieser Phase auf die Größe von Lichtjahren aufgebläht. Es entstanden Bereiche unterschiedlicher Dichte, die sich noch heute im Mikrowellenhintergrund abbilden. Hinter ihm ist keine Materie, nichts mehr. Alle bekannten Felder sind weg. Die Naturgesetze, die bis hier zur Anwendung kamen, gibt es nicht. Irgendwo hier sollen die drei Kräfte bzw. Kraftfelder, die später einmal alle bekannte Materie und Antimaterie des Universums ausmachen, mit der Schwerkraft zusammengekommen sein. Der Anfang des Universums war eine hochsymmetrische Energiefülle, die Physikerinnen und Physiker sprechen von einem **Quantenvakuum**. Dieses Vakuum enthielt nur Energie, aus der später Teilchen und Antiteilchen wurden.

Die Reise ist zu Ende.

Gerne würden wir weiter zurückreisen in die Zeit vor dem Urknall, um so auch noch zu dem Zeitpunkt vor der Geburt des Universums zurück zu spulen. Aber das geht nicht, denn die bisher verwendeten Begriffe von Raum und Zeit sind nicht mehr anwendbar. Raumzeitkrümmung und Quanteneffekte sind zu stark. Ohne Raum, ohne Zeit und somit ohne Raumzeit ergibt das Reisen keinen Sinn. Wir haben den Anfang nicht erreicht. Und wir haben auch keine Vorstellung davon, wie man dorthin gelangen könnte.

Mit dem Urknall sind die für uns gültigen Naturgesetze erst entstanden.

Wir haben uns auf der Reise immer innerhalb unseres Universums bewegt und könnten nun auf den Gedanken kommen, mal von außen darauf zu schauen. Auch das geht nicht, denn wir haben eine weitere Grenze erreicht, eine Fläche ganz anderer Art als die Fläche der letzten Streuung, die das für uns sichtbare Universum umschließt. Diese neue Grenze kann kein Licht durchbrechen. Hinter ihr liegt der Bereich der Quantengravitation, in der alle bekannten Felder der Natur zu einem einzigen verbunden sein **könnten**.

Das Universum ist an diesem Punkt zu einem Rätsel geworden!

Hinter die Wand mit der Fläche der letzten Streuung und damit hinter die Grenzen des für uns sichtbaren Universums, kann man mit Teleskopen nicht schauen. In Teilchenbeschleunigern lassen sich aber Bedingungen für Druck und Temperatur nachstellen, wie sie einst hinter dieser Fläche geherrscht haben müssen wenn man unterstellt, dass die Physikalischen Gesetze gültig sind. Und so ist es der Wissenschaft gelungen neue Modelle und Gesetze zu ersinnen, mit denen sich der Ablauf des Geschehens bei der Entstehung und weiteren Entwicklung des Universums plausibel darstellen lässt.

Mit Hilfe von Gravitationswellen, das sind Verformungen der Raumzeit, die Einstein 1916 vorhergesagt hatte und die im September 2015 direkt gemessen wurden (siehe Seite 28), erhoffen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch Signale und damit Informationen von jenseits der Wand mit der Fläche der letzten Streuung zu erhalten. Aber Informationen von jenseits der Wand der Quantengravitation zu erhalten, also der Planck-Epoche (siehe auch Excel-Tab. Sammelsurium Seite 10), ist nach heutigem Ermessen unmöglich. Wenn gesagt wird, das Universum ist 13,8 Milliarden Jahre alt dann ist damit gemeint, dass 13,8 Milliarden Jahre vergangen sind, seit Raum und Zeit, wie wir sie kennen, sinnvoll zu denken sind oder anders formuliert, seit die Raumzeit Sinn ergibt. Dieser Zeitnullpunkt liegt von uns aus gesehen etwa 380.000 Jahre hinter der Wand mit der Fläche der letzten Streuung bzw. 380.000 Jahre bevor die kosmische Hintergrundstrahlung das Weltall ausfüllte und trat 10^{-30} Sekunden **vor dem Urknall** ein. Von daher lässt sich sagen, dass eine gewisse Zeitspanne zwischen der Entstehung von Raum und Zeit und dem Urknall vergangen ist. Das heißt aber nicht, dass unser Universum an diesem Punkt begonnen hat oder dass es das einzige existierende Universum ist oder das einzige, das je existieren wird.

<https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/kurzer-ueberblick-was-ist-teilchenphysik>

Auf den verschiedenen Reisen durch den Kosmos haben wir das sehr **Große** und das sehr **Kleine** kennengelernt. Wir haben gesehen und auch gespürt, wie das Geschehen in großen Strukturen (Satelliten, Monde, Planeten, Sonnen, Galaxien, ...) von der allgemeinen Relativitätstheorie bestimmt wird. Im Kleinsten (Moleküle, Atome, Elementarteilchen, ...) bestimmen die Quantengesetze die Natur und grenzen sie so von unserer Alltagswirklichkeit ab. Auch erinnern wir uns daran, dass Newtons Gesetze scheiterten wenn die Gravitation sehr stark war → Periheldrehung der Merkurbahn! Erst mit Einsteins ART konnten die bis dahin unerklärlichen 0,43 Bogensekunden pro 100 Jahre bei der Periheldrehung des Planeten nachgewiesen werden.

Feststellung: Die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenfeldtheorie sind (noch?) nicht miteinander in Einklang zu bringen!

Im sehr Kleinen bleiben noch Rätsel offen! Und im sehr Großen? Auch! Nachdem was wir über Newtons Schwerkraft wissen ist klar, dass ein Planet, der die Sonne umrundet, dies nicht mit beliebiger Geschwindigkeit tun kann. Ein zu schneller Planet würde aus dem Sonnensystem geschleudert, ein zu langsamer Planet sich der Sonne annähern und schließlich in sie hinein stützen. Der Geschwindigkeit muss also stimmen! Das gilt auch für den Mond und die Satelliten, die sich um die Erde bewegen. [Siehe. Excel-Tab. Kepler - Newton S. 4 v. 4.](#)

Frage: Gilt Einsteins Theorie der Raumzeitkrümmung auch für die 300 Milliarden Sonnen der Milchstraße? Nein! Und darüber hinaus? Nein!

d) Dunkle Materie

Die Rotationskurven von Galaxien lassen sich mittels Dopplereffekt sehr genau vermessen. Bei einer rechts drehenden Spirale geht der linke Teil von uns weg (**Rotverschiebung**) und der rechte kommt auf uns zu (**Blauverschiebung**). In der Tat haben zwei Sterne, die im gleichen Abstand ein galaktisches Zentrum umrunden, auch dieselbe Geschwindigkeit. Langsame Sterne bewegen sich am Rand, schnelle Sterne nah am Zentrum der Galaxie. Ein Stern am Rand der Milchstraße benötigt 250 Millionen Jahre für eine Umrundung: die Sonne ist näher am Zentrum und braucht 225 Millionen Jahre. Dieser Zeitraum ist als **galaktisches Jahr** definiert. Dabei beträgt ihre Geschwindigkeit 250 km/s, es ist auch von 270 km/s die Rede.

Wir erinnern uns an den Stern S4711 (Seite 44), der mit einer Geschwindigkeit von 24.000 km/s in der Nähe des galaktischen Zentrums unterwegs war (und / oder noch ist?). Schon Anfang der 1930er Jahre waren die Geschwindigkeiten bekannt, mit denen Sterne das Zentrum der Milchstraße umrunden. Der niederländische Astronom Jan Hendrik Oort hat sie gemessen. Er hat auch rechnerisch überprüft, nachdem er zunächst abgeschätzt hatte wieviel Materie die Milchstraße enthält, ob die ermittelten Messwerte mit den Gleichungen Newtons und Einsteins zusammen passen. Die Frage lautet daher: Sind die Geschwindigkeiten so, dass Sterne, die näher am Zentrum der Milchstraße sind, nicht in dieses hinein fallen bzw. Sterne, die sich weiter weg, bis hin am Rand unserer Galaxie bewegen, nicht ins All hinaus geschleudert werden?

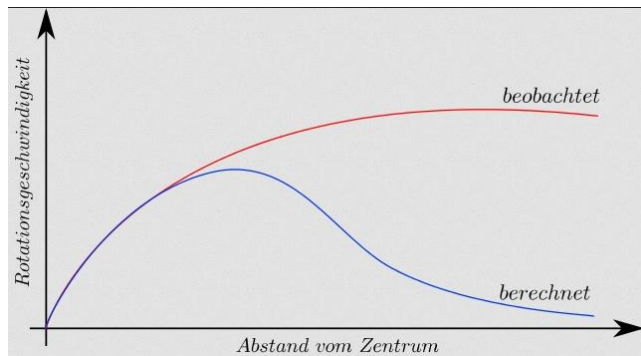
Antwort: Die Rechnung ging nicht auf, wie es die Grafik unten zeigt. Es war bei weitem nicht genug Materie vorhanden, um ein Hinausschleudern von Sternen in den Weltraum zu verhindern. Es ist fünfmal mehr Materie erforderlich, als für uns sichtbar ist. Ein Schätzfehler in dieser Größenordnung war auszuschließen und so postulierte Oort die Existenz von dunkler, gemeint ist nicht sichtbarer Materie, die nur indirekt sichtbar ist über ihre gravitative bzw. raumzeitkrümmende Wirkung, so seine gewagte These! Danach krümmt **Dunkle Materie** die Raumzeit genauso wie herkömmliche Materie. Sie kann aber nicht aus denselben Bausteinen (Elementarteilchen mit Spin $\frac{1}{2}$) bestehen, denn sonst könnte man sie sehen.

Was ist mit anderen Galaxien und deren Bewegungen untereinander?

Wie der Schweizer Astronom Fritz Zwicky, rund ein Jahr nach Oorts These durch Beobachtung herausgefunden hatte bewegen sich Galaxien derart schnell untereinander (z. B. Andromeda - Milchstraße), dass auch hier die beachtliche Menge an dunkler Materie vorausgesetzt werden muss, damit der gravitative Zusammenhalt gegeben ist. Dunkle Materie ist keine Materie, auch keine Antimaterie, sondern etwas anderes und keiner weiß eigentlich was.

Seit den 1930er Jahren wurden zahlreiche Tests unternommen, die zu demselben Ergebnis kamen: Es gibt dunkle Materie! Überall wo Materie ist, ist diese von dunkler Materie umgeben. Auf jedes Kilogramm baryonische Materie, also Protonen, Neutronen und Elektronen, kommen fünf Kilogramm dunkle Materie aus „wer weiß was“. So könnte es sein, dass die ART Einsteins in dieser Größenordnung nicht aufgeht, genau wie Newtons Theorie nah bei der Sonne nicht gelten kann, wie es die Periheldrehung es Merkur zeigt.

**Dunkle Materie bringt die Berechnung
in Einklang mit der Beobachtung.**



Grafik: wikipedia



Jan Hendrik Oort (1900 – 1992)



Fritz Zwicky (1898 -1974)

Das alles bedeutet, dass es in den Galaxien mehr Masse gibt als es scheint und die dunkle Materie mitbestimmt, wie sich Körper im Universum bewegen.

Die folgenden Aussagen entstammen Vortrags-Folien von Dr. R. Göhring, Physikalischer Verein Frankfurt:

Die **hypothetischen** Teilchen der dunklen Materie sollten, aufgrund ihrer hohen Masse, in der Quark-Ära entstanden sein. Wenn man auch (noch?) nicht weiß welcher Art sie sind, existiert schon ein Name für sie: **WIMP = Weakly Interacting Massive Particles = schwach wechselwirkende schwere Teilchen.**

Eigenschaften:

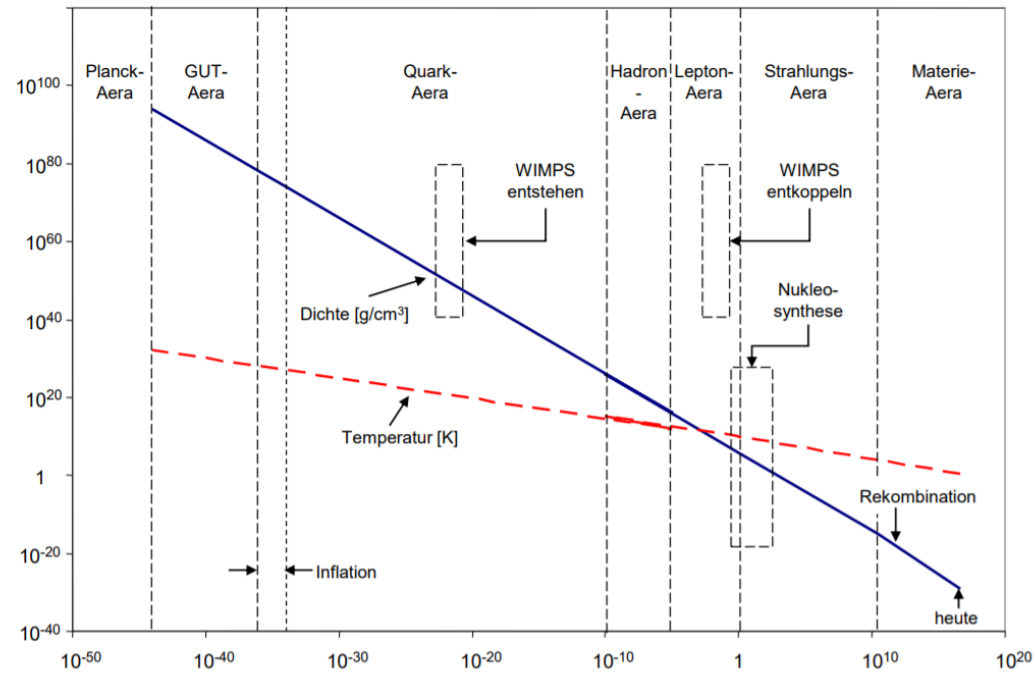
- Zeigen keine Wechselwirkung mit Materie oder Licht, d. h. Teilchen haben keine Ladung und folglich dringt Licht durch dunkle Materie hindurch.
- Wirken ausschließlich gravitativ.
- Haben eine sehr hohe Masse und sind deshalb noch nicht in Beschleuniger-Experimenten entdeckt worden.

Kandidaten sind eventuell Teilchen der Supersymmetrie. Die Entkopplung von der Strahlung erfolgte in der Leptonen-Ära bei einem Welt-Alter von einer Sekunde, **siehe DIAGRAMM auf der nächsten Seite 76.**

DIAGRAMM
Von der Planck-Ära in die Materie-Ära
Vortrags-Folie von Dr. R. Göhring
(Physikalischer Verein)



Temperatur- und Dichteverlauf



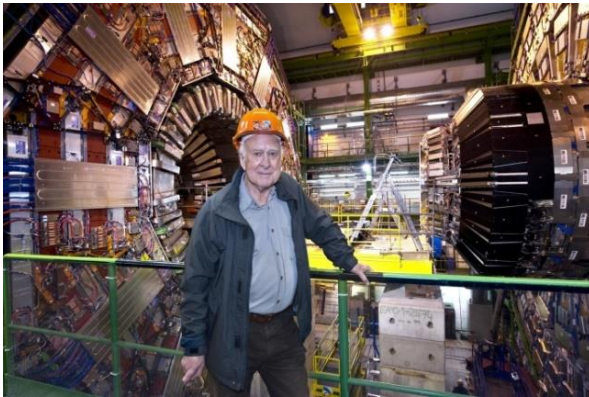
Ruhe-Masse von Elementarteilchen

Wie kommen die Elementarteilchen, aus denen die baryonische Materie aufgebaut ist (Up- / Down-Quarks, Elektronen, ...) zu ihren Massen?

Ausführungen basieren auf <https://www.weltmaschine.de/physik/higgs/>

Um das zu erklären haben der Theoretische Physiker Peter Higgs aus Schottland und andere Physiker*, Anfang der 1960er Jahre eine Theorie entwickelt, nach der das Universum mit einem quantisierten Teilchenfeld ausgefüllt ist, dass später **Higgs-Feld** genannt wurde. Dieses Feld kann man sich als einen "Quantensirup" vorstellen. Dieser Sirup bremst die durch ihn fliegenden Teilchen, sie werden langsamer und zwar gerade so, als erhielten sie eine Masse. Je stärker ein Teilchen auf das Higgsfeld reagiert, also je langsamer es sich bewegt, umso mehr Masse hat es und umso leichter kann es das Higgsfeld in Schwingungen versetzen. Diese Wirbel im Quantensirup äußern sich physikalisch in der Erzeugung von **Higgs-Teilchen/-Bosonen**. Teilchen die keine Ruhemasse haben, wie die Photonen, zeigen folglich keine Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld. Das Higgsfeld ist skalar, hat also keine Richtung. Das Higgs-Boson vermittelt auf diese Weise eine Kraft, die der Ruhemasse der Elementarteilchen proportional ist. Die Theorie vom Higgs-Boson wird auch als **Higgs-Mechanismus** bezeichnet.

Das **Standardmodell der Teilchenphysik** (siehe Excel-Tab. Atomphysik S. 9) ist sehr erfolgreich. Seit Einführung ist es an allen Teilchenbeschleunigern der Welt auf das Äußerste getestet worden. Fazit: Es beschreibt die elementaren Bestandteile der Materie und ihre Wechselwirkungen, sprich die Kräfte, die zwischen ihnen wirken, exzellent. Jedoch ist es nur zusammen mit dem Higgs-Teilchen mathematisch konsistent und so galt es, dieses zu entdecken.



Peter Higgs (geb. 1929)

im April 2008 am CMS-Detektor im CERN

Am 4. Juli 2012 gaben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am CERN die Entdeckung eines neuen Elementarteilchens bei etwa 126 Gigaelektronenvolt Masse bekannt. Es ist damit so schwer wie das Atom Cäsium 133. Im Nachhinein konnte bestätigt werden, dass es sich um das vorhergesagte Higgs-Teilchen handelt. Das Top-Quark zeigt mit einer Ruhemasse von 171,2 GeV die stärkste Wechselwirkung mit dem Higgs-Teilchen, das Elektron-Neutrino die geringste, mit $< 2,2$ eV.

Erklärung Higgsfeld durch Prof. H. Lesch https://www.youtube.com/watch?v=ACD_qndPwws 13 min.

Vom Higgsfeld zum ... Josef M. Gassner <https://www.youtube.com/watch?v=9CvJYmvdec4> 25 min

Mit der Abkühlung des Universums auf die Temperatur von 10^{16} K war der Vorgang binnen 10^{-6} Sekunden nach dem Urknall abgeschlossen und vom Higgsfeld war nichts mehr zu spüren, laut Prof. H. Lesch, denn die Elementarteilchen waren von da an im Besitz ihrer Ruhemasse.

Zwar kann man vom Higgsfeld nichts spüren, aber es ist immer da und man kann es nicht aus dem Universum heraus nehmen und wäre auch da, wenn alle Elementarteilchen nicht da wären. Das ist seine Besonderheit. Es ist ein universelles Feld, also überall im Universum vorhanden und kann an Hand seiner Selbst-Wechselwirkung (Higgs-Bosonen verursachen Wirbel im Higgsfeld) entdeckt werden, wie am 4. Juli 2012 erstmalig geschehen. Und dazu hat es dieser riesigen Teilchenbeschleunigeranlage im CERN bedurft.

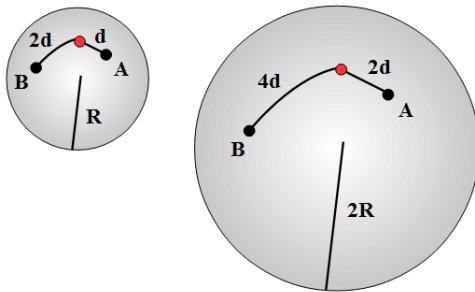
*) Nobelpreis 2013 an Peter Higgs (Vereinigtes Königreich) und François Englert (Belgien); Robert Brout (Belgien), war Mitautor der Arbeit Englerts, verstarb aber 2011.

e) Dunkle Energie

Neben der dunklen Materie, die im Übergewicht 5:1 vorhanden ist, haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch die Existenz dunkler Energie vorhergesagt. Auslöser dieser Hypothese waren Beobachtungen über die Ausdehnung des Universums, also wie sich **alle** Galaxien voneinander weg bewegen, so wie Rosinen in einem aufgehenden Rosinenbrot (siehe Seite 47). Die hier beobachteten Galaxien bewegten sich aber nicht so, wie es nach den Gesetzen über Newtons Schwerkraft und Einsteins allgemeiner Relativität zu erwarten gewesen wäre.

Dass sich ferne Galaxien von uns weg bewegen hat Edwin Hubble gegen Ende der 1920er Jahre als erster mit seinem Teleskop beobachtet und dabei festgestellt, dass sich das Universum permanent ausdehnt. Er nutzte die Farb-(**Rot-**)Verschiebung von Lichtquellen, die von **Cepheiden** in weit entfernten Galaxien ausgehen, um auf ihre Geschwindigkeit zu schließen (**Entfernungsbestimmung mit Cepheiden siehe Excel-Tabelle Astronomie Seite 9**). Dabei stellte er fest, dass das Tempo, mit dem sich die Galaxien von uns weg bewegen, proportional zur Entfernung von uns ist. Und das bedeutet, dass eine Galaxie, die doppelt so weit von uns entfernt ist wie eine andere, sich auch doppelt so schnell von uns weg bewegt wie die andere. Diese Beziehung wird inzwischen als das Hubble-Gesetz bezeichnet (**siehe auch Excel-Tabelle Sammelsurium Seite 9**).

Grafik und Text: Wikibooks.org/wiki

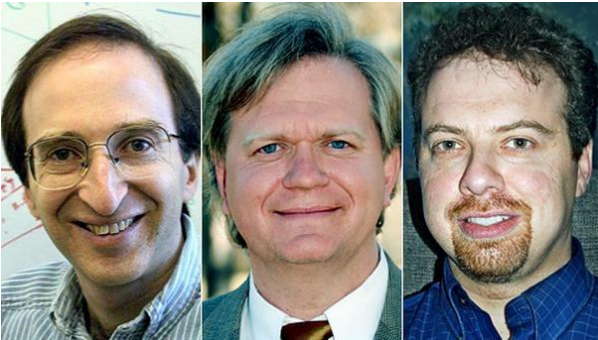


Das Bild zeigt die Ausdehnung des Universums am Modell einer aufblasbaren Kugelfläche. Wird die Kugel in der Zeit t auf das doppelte ihrer ursprünglichen Größe aufgeblasen ($R \rightarrow 2R$), verdoppeln sich auch die Entfernungen der Punkte A und B zum Beobachter ($d \rightarrow 2d$ und $2d \rightarrow 4d$). Punkt A bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v = d/t$ und der doppelt so weit entfernte Punkt B mit doppelter Geschwindigkeit $v = 2d/t$ vom Beobachter weg. Zunächst scheint die Zunahme dieser Radialgeschwindigkeit mit der Entfernung im Widerspruch zur Relativitätstheorie zu stehen, nach der sich nichts schneller als das Licht bewegen kann. Auch unter Beachtung der Zeitabhängigkeit der Hubble-Konstante treten ab einer gewissen Entfernung Geschwindigkeiten auf, die die Lichtgeschwindigkeit übersteigen würden. **Ausweg:** Die „Flucht“ der Galaxien weg vom Beobachter, auf Grund der Expansion des

Universums, stellt keine Bewegung von einem Raumpunkt zum nächsten dar; sondern es ist der Raum selbst, der sich ausdehnt. Die Punkte A und B verharren auf ihren Plätzen, d.h. ihre Längen- und Breitengrade ändern sich nicht. Die Lichtgeschwindigkeit ist nur Obergrenze, wenn A und B zu ändern Längen-/Breitengraden wanderten. Fazit: **Pausenlos entsteht neuer Raum im Universum!**

Cepheiden mit absoluten Helligkeiten $M = -1$ bis -7 mag sind geeignet, um als **Standardkerze** für die Bestimmung von Distanzen im Bereich unserer Nachbargalaxien und der Lokalen Gruppe zu fungieren. Entfernungsbestimmungen entfernterer Galaxien erfolgen mit **Supernovae Typ 1a** als Standardkerze. Eine Supernova vom Typ 1a ist **viel heller** als alles andere, so dass man sie mit Teleskopen, im Unterschied zu den Cepheiden, auch in noch viel weiter entfernten Galaxien, von mehr als 10 Milliarden Lichtjahren, entdecken kann (**siehe Excel-Tabelle Astronomie Seite 10**). Die absolute Helligkeit streut nur gering und beträgt $M = -19,7$ mag. Mit diesem Wert können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dann auf die Entfernung der Galaxie schließen und abschätzen, wie schnell sie sich von uns weg bewegt.

Im Jahr 1998 veröffentlichten zwei voneinander unabhängige Forschergruppen ihre Ergebnisse zu diesen fernen Supernovae.



Saul Perlmutter Brian Schmidt Adam Riess

[Bild: br.de/themen/wissen/nobelpreis-2011...](http://br.de/themen/wissen/nobelpreis-2011...)

Eine Studie wurde unter Leitung des US-Astrophysikers Saul Perlmutter erstellt, eine zweite unter den US-Astrophysikern Brian Schmidt und Adam Riess. Beide Teams kamen zum gleichen Resultat: Die Ausdehnung des Universums hat sich vor etwa fünf Milliarden Jahren, nach über acht Milliarden Jahren normalen Verhaltens, auf einmal beschleunigt. Das war zunächst ein Schock für die Wissenschaft, denn im Großen steht hinter allem Einsteins allgemeine Relativität. Und so wie Newtons Schwerkraft erlaubt auch Einsteins Raumkrümmung Dingen nur sich gegenseitig anzuziehen. Und so müsste, auf lange Sicht, dann alles im Universum, ob Materie, Energie, Antimaterie oder dunkle Materie, die Ausdehnung des Universums verlangsamen. Die Beobachtungen der Forscher erbrachten aber genau das Gegenteil. Für ihre Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums erhielten sie 2011 den Nobelpreis.

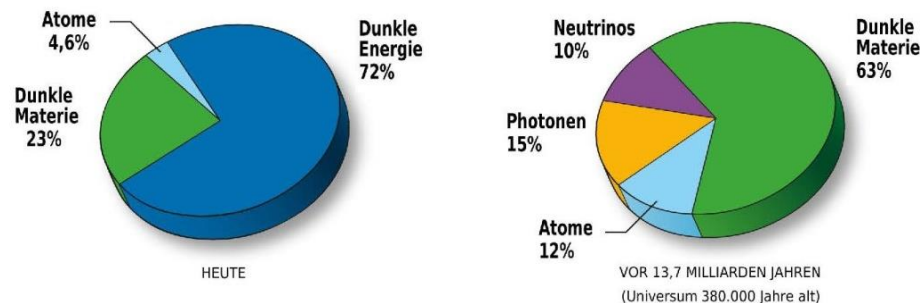
Der Weg aus diesem Dilemma bestand nun darin, etwas radikal Neues einzuführen, mit dem man diese Beschleunigung erklären konnte. Dieses neue „Etwas“ müsste das gesamte Universum ausfüllen und **anti-gravitativ** wirken, d. h. Materie und Energie abstoßen statt anziehen. Aus irgendeinem Grund hat diese neue Kraft vor etwa fünf Milliarden Jahren die anziehenden Kräfte überflügelt. Davor war ihre Wirkung gleich null. Und diese verwunderliche **Anti-Schwerkraft** wird als **Dunkle Energie** bezeichnet und sie ist zuständig für die beschleunigte Ausdehnung des Universums. Um ihre beobachteten Auswirkungen erklären zu können muss es schon eine ganze Menge von ihr geben. Nach aktuellen Schätzungen dreimal so viel wie dunkle Materie und fünfzehnmal so viel wie baryonische (gewöhnliche) Materie*.

Nach Schätzungen der NASA sind die Anteile wie folgt:

- Dunkle Energie: 72 % (68,5) ()-Werte aus Vortrag Prof. Udo Deiss vom
- Dunkle Materie: 23 % (26,5) 15.05.2020 Astronomie am Freitag im Life-
- Baryonische Materie* plus Licht: 4,6 % (5,0) stream d. Phys. Vereins.

Alles, was wir bisher auf unseren Reisen gesehen haben entspricht also nur 4,6 % (5,0) von dem, was das Universum als Ganzes ausmacht.

*) Die Werte zusammengenommen ergeben nicht ganz 100 %, da es immer noch Unsicherheiten bei den erhaltenen Zahlen gibt. Quelle Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP).

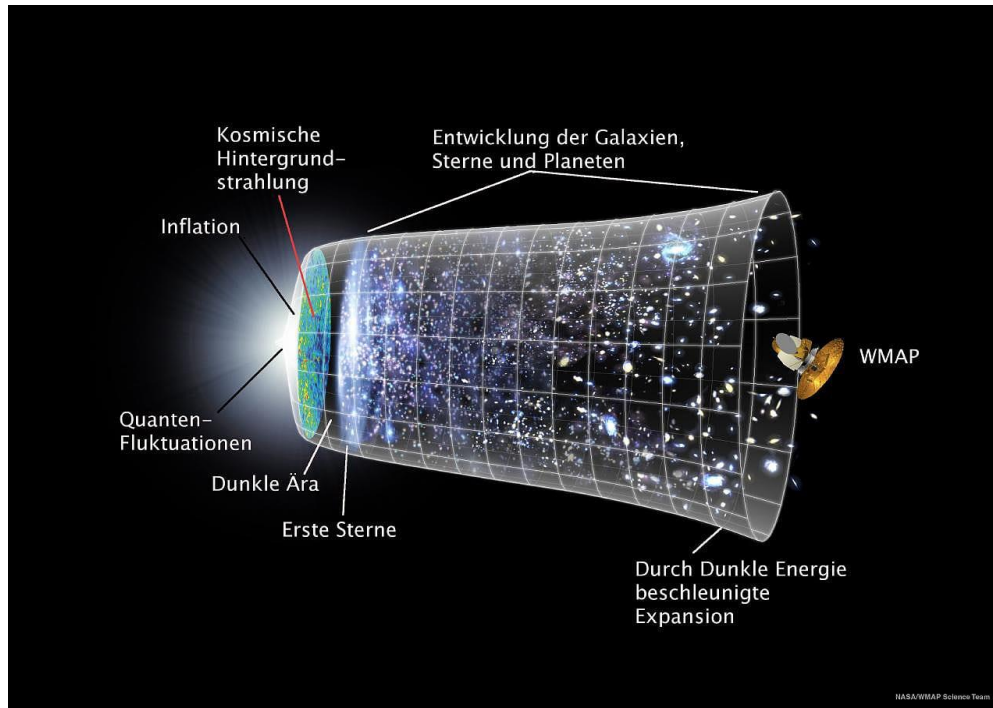


[Grafik: hs.uni-hamburg.de](http://hs.uni-hamburg.de)

Materie- bzw. Energie-Anteil des Universums zum jetzigen Zeitpunkt (links) und zur Zeit der Entkopplung (rechts), etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall (Beobachtungen der WMAP-Mission u.a., NASA / WMAP Science Team).

*) Heute besteht die baryonische Materie zu rund 98 % aus Wasserstoff- und Helium-Atomen; anfangs, vor 13,8 Milliarden Jahren, waren es fast 100 %. Die schwereren Atome wie Stickstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, ..., entstanden und entstehen in den Sternen durch **Kernfusionsreaktionen**. Siehe hierzu [Excel-Tab Astronomie](#).

Anmerkung: Auf die Existenz dunkler Energie war Einstein bereits 1917 gestoßen als er mit der allgemeinen Relativitätstheorie herausgefunden hatte, dass jede Form von Materie den sie umgebenden Raum verbiegt und der Raum demnach nicht starr und unveränderlich sein kann. Er konnte sich jedoch nicht mit dem Gedanken anfreunden, dass sich das Universum permanent verändert und entwickelt und auch einen Anfang hatte, wie es die Lösungen



seiner Feldgleichungen ergaben. So kann sich die Raumzeit verändern und das tut sie auch. Um dennoch ein statisches Universum zu bewahren hat er in die Gleichungen eine „Korrektur“ eingefügt, die er als Kosmologische Konstante Λ (Lambda) bezeichnete und die die Berechnungen dennoch **nicht** außer Kraft setzten.

Die Gleichungen Einsteins sagen aus, dass der lokale Energieinhalt des Universums absolut äquivalent zu seiner lokalen Geometrie ist. Wenn sich eines der beiden verändern kann, dann kann (muss!) es auch das andere. Energie umfasst generell alles, was Schwerkraftwirkung hat. Welche sind Materie, Licht, Antimaterie, dunkle Materie,

Die von Einstein zugefügte Konstante Λ kann, je nach Wert, anziehend oder abstoßend wirken. Physikalisch entsprach sie einer Energie, die das Universum ganz erfüllt und statisch werden lässt, denn ein dynamisches Universum kam den Menschen einst nicht in den Sinn. Doch 1927 forderte der Belgier Georges Lemaitre (1894 – 1966), katholischer Priester und Physiker, auf Basis seiner Rechnungen, dass das Universum expandieren müsste und ersann 1931 die Idee von einem „**Ur-Atom**“ als Ursprung.

Grafik: [spektrum.de/news/das-beschleunigte-universum/1124665](https://www.spektrum.de/news/das-beschleunigte-universum/1124665)

Und gut zehn Jahre nach Einführung von Λ (Lambda) machte Hubbles Entdeckung von 1929, dass sich die sehr fernen Galaxien von uns weg bewegen, die Expansion des Universums zu einer experimentellen Tatsache. Das statische Universum war passe! So tilgte Einstein die kosmologische Konstante aus seiner Feldgleichung und nannte deren Einfügung „die größte Eselei meines Lebens“. Und jetzt, mehr als 100 Jahre später, sieht vieles danach aus, als könnte Einsteins Λ eine Schlüsselrolle spielen bei der Beantwortung der Frage was diese dunkle Energie ist, die für die beschleunigte Expansion des Universums sorgt. Die Konzeption der dunklen Energie hat die kosmologische Sicht verändert. Bis dahin ging man von zwei möglichen Entwicklungen für das Universum aus, abhängig von seinem materiellen Inhalt. Gibt es zu viel Materie, gewinnt die Schwerkraft die Oberhand und das Universum zieht sich eines schönen Tages zusammen, in einem „Big Crunch“. Gib es zu wenig Materie, strebt alles immer weiter auseinander. Die Einführung der dunklen Energie spricht eher für die zweite Möglichkeit. Und wenn keine weiteren Überraschungen vor den Teleskopen der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auftauchen, wird das Antischwerkraftfeld wohl dafür sorgen, dass sich das Universum allzeit ins Unendliche ausdehnt, in eine kalte kosmische Zukunft, den „Big Freeze“.

5) Die Welt des sehr Kleinen – Standard-Modell der Teilchenphysik

Unsere Reise als vermeintliche „Geistwesen“ zum Ursprung von Raum und Zeit, führte uns von der Welt des **sehr Großen** in die Welt des **sehr Kleinen**, nah an den Urknall. Nun geht es zurück ins **Hier** und **Jetzt**, als Resümee. **Geleitend zu den einzelnen Reise-Etappen siehe auch das Diagramm Seite 76.**

- a) **Planck-Ära:** Das Universum ist am Beginn, zum Zeitpunkt $t \approx 5,4 \cdot 10^{-44}$ Sekunden, ein Punkt von hochsymmetrischer Energiefülle im Zustand der Planckwelt: Radius $\approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ m / Dichte $\approx 3 \cdot 10^{95}$ kg/m³ / Temperatur $\approx 1,4 \cdot 10^{32}$ K (**Excel-Tab. Sammelsurium S. 10**). Hier sind, zugleich mit der Schwerkraft, die Kraftfelder der starken und schwachen Kernkraft und der elektromagnetischen Kraft vereint: GUT Grand Unified Theory (**s. S. 72**).
- b) **GUT-Ära:** Ab dem v. g. Augenblick dehnt sich das Universum aus und es entstehen Raum und Zeit, genannt Raumzeit, als Entität. Im Zuge der Expansion sinkt die Temperatur und die vereinheitlichten Kräfte nach der GUT trennen sich. Diese Separation wird **Symmetriebrechung** genannt.
- c) **Kosmologische Inflation:** Im Zeitfenster $10^{-36} - 10^{-32}$ Sekunden läuft die kosmologische Inflation ab. Das Universum dehnt sich um mindestens Faktor 10^{30} aus und schwillt so etwa von der Größe eines Atoms (10^{-10} m) auf mehrere Lichtjahre an. <https://www.youtube.com/watch?v=NHr6iMfvZb0>
- d) **Quark-Ära:** Von 10^{-32} bis 10^{-10} Sekunden bilden sich die Quarks und ihre Antiteilchen: Bausteine der Protonen und Neutronen, genannt Hadronen.
- e) **Hadron-Ära:** Im Zeitraum 10^{-10} bis 10^{-5} Sekunden entstehen aus Quarks und Antiquarks Protonen, Neutronen und ihre Antiteilchen, die sich direkt wieder vernichten, entstehen und sich direkt wieder vernichten, ..., d. h. Materie / Antimaterie verwandeln sich in Energie und wieder zurück. Dabei entsteht Vernichtungsstrahlung (**s. S. 24**). Am Ende gewinnen Teilchen die Oberhand, die Antiteilchen verschwinden und zurück bleibt die Materie.
- f) **Leptonen-Ära:** In der Zeit 10^{-5} bis eine Sekunde entstehen Leptonen und ihre Antiteilchen und somit auch Elektronen / Positronen. Es bilden sich Kerne aus Wasserstoff (75 %), Helium (25 %) und in Spuren Lithium. Nach zwei Minuten ist es mit 10^{11} K zu kalt für die Bildung weiterer Elemente.
- g) **Strahlungs-Ära:** Elektronen interagieren ständig mit Photonen, dabei entsteht Licht, das aber nicht fliehen kann, weil die Dichte noch zu hoch ist.
- h) **Materie-Ära:** Nach 380.000 Jahren sind Temperatur (3000 K) und Dichte (10^{-13} g/cm³) weit genug gefallen, so dass sich neutrale Wasserstoff- und Helium-Atome bilden konnten. Materie und Licht sind entkoppelt (Rekombination), die Wand mit der Fläche der letzten Streuung ist dahin und das Weltall wird sichtbar und hat auch Licht im für uns sichtbaren Spektrum. Wie schon gesagt, war noch keiner da, der es hätte sehen können. Das Universum kühlt weiter ab, wird wieder dunkel und nach 200 Millionen Jahren dunklen Zeitalters entstehen die ersten heißen Population-III-Sterne von größer als 100 Sonnenmassen (M_{\odot}), in denen die chemischen Elemente bis Eisen fusioniert werden. Mit dem Aufleuchten dieser Sterne wird das Universum erneut sichtbar und vielleicht können wir es schauen, in nicht allzu ferner Zukunft. Indizien hierfür gibt es wohl in der Galaxie CR7.
- i) **Sichtbares Universum heute:** Radius: 46,6 Milliarden Lichtjahre / Kritische Gesamt-Dichte (68 % Dunkle Energie + 27 % Dunkle Materie + 5 % baryonische Materie), bei der das Universum flach ist: ca. $9,2 \cdot 10^{-27}$ kg/m³ (entspricht etwa 5 H-Atomen pro m³), die faktische gemessene Dichte ist dem Wert sehr nah / Dichte der sichtbaren Materie: etwa 4 % - 5 % der gesamten Materie: $4 \cdot 10^{-28}$ kg/m³ / Temperatur: 2,72548 K (**ChatGPT**).

Der Urknall WDR Quarks <https://www.youtube.com/watch?v=hALgS90XCLc> 7 min

Die Schöpfung <https://www.youtube.com/watch?v=RCaJPbp3T0A> 60 min (27 min bis 36 min wird vom Urknall erzählt)

Entstehung der ersten Sterne (Prof. H. Lesch) <https://www.youtube.com/watch?v=9o61VHaGvsE> 14 min

Atom

Ausführungen basieren auf dem Buch "Das Universum in deiner Hand" von Christophe Galfard (praktisch eine partielle komprimierte Nacherzählung).

Wir machen uns nun näher mit der Welt des sehr Kleinen vertraut. Die elementare Menge Gold z. B., ist das kleinste Etwas, das immer noch Gold ist und Gold-**Atom** genannt wird. Einen Würfel, Kantenlänge 100 mm, müsste man 26- bis 27mal halbieren*, um auf die Größe des Gold-Atoms zu kommen. Eine weitere Halbierung führt notwendig zur Spaltung des Atomkerns und es läge kein Gold mehr vor (z. B. Kernspaltung: Zerfall von U235). Das trifft auch auf andere Stoffe zu wie Blei, Kupfer, Holz und Glas, die aus Molekülen bestehen und somit auch aus Atomen, die miteinander verbunden sind.

Aus was bestehen Atome?

Um das zu verstehen, tauchen wir in die Quantenwelt ein.

Siehe hierzu auch immer mal wieder in der Excel-Tab. „Atomphysik“.

Wenn man einen natürlichen Magnet, wie den Haftmagnet einer Pinnwand, in den Fingern hält und ihn langsam auf die Pinnwand zubewegt, um z. B. eine Notiz an ihr zu befestigen, dann spürt man eine Kraft in Hand und Arm, die den Magnet zur Pinnwand ziehen will. Und diese Kraft wirkt umso stärker, je näher der Magnet der Pinnwand kommt. Auf den letzten Millimetern schließlich springt der Magnet aus den Fingern und haftet an der Pinnwand an. Ursache dieser Kraft ist das Magnetfeld, das zwischen Magnet und Pinnwand entstanden ist und bewirkt hat, dass die Pinnwand Magnet und Notiz fixiert.

Um Weiteres zu erkunden machst du dich so klein, dass du nur einige Atome groß bist und begibst dich in den Raum zwischen Pinnwand und dem sich ihr annähernden Magneten. Wenn der Magnet noch weit entfernt ist von der Pinnwand, wirkt die anziehende Kraft kaum und du siehst nichts. Wenn er ihr aber näher kommt wird das Magnetfeld stärker und hier und da siehst du kleine Lichtpulse auftauchen. Ob sie virtuell sind oder real ist schwer zu sagen, aber da war definitiv Licht. Es kam aus dem Nichts direkt vor deine Miniaugen. Diese Lichtquanten tauchen überall auf, am Magneten, auch außerhalb seiner Oberfläche und an der Pinnwand und sie verschwinden auch gleich wieder. Vom Magneten gehen Kraftlinien aus, direkt durch dich hindurch in die Pinnwand und sie erstrecken sich überall hin in den Raum. Du spürst das nicht, erinnerst dich aber, als der Lehrer im Physikunterricht einmal über einen Stabmagneten Kartonpapier gelegt und darauf Eisenfeilspäne gestreut hatte. Die Späne ordneten sich sofort von Pol zu Pol in kurvenförmig verlaufenden Linien an. Nah bei den Polen waren die Linien dichter beieinander als im weiteren Umfeld, weil das Magnetfeld direkt an den Polen am stärksten ist.

Du siehst, wie sich kleine Wellenpakete mit Lichtgeschwindigkeit durch dieses Feld bewegen, was offenbar daher rührt, dass sich Magnet und Pinnwand aufeinander zu bewegen. Mit weiterer Annäherung wird das Feld dichter und immer mehr dieser kleinen Lichtpulse tauchen in dem dichter werdenden Feld auf. Wie schon erwähnt scheinen sie virtuell zu sein, denn sie tauchen aus dem Nichts auf und bleiben nur einen Augenblick lang bestehen. Sie sind aber **real**, denn sie üben einen **realen Effekt** aus: In ihnen, **in diesen Lichtquanten**, steckt die Kraft, die Magnet und Pinnwand einander anziehen lässt.

Du hast eben erlebt, was eine **Fernwirkung** genannt wird und gesehen, dass **die** elektromagnetische Kraft bzw. Wechselwirkung, die Magnet und Pinnwand miteinander interagieren lässt, in den virtuellen Photonen steckt, die **nur** dem einen Zweck dienen, die elektromagnetische Kraft zu übertragen. Du hast mit deinen Miniaugen das **Elektromagnetische Feld** entdeckt, das überall im Universum zwischen zwei Objekten besteht. Es ist egal, ob es sich um Magnete handelt oder nicht. Es ist ein Meer von Kraft, aus dem zu jeder Zeit virtuelle Photonen hervortreten und sogleich wieder verschwinden können.

*) Zur Veranschaulichung auch mal andersrum: Das Blatt eines Buches, 26-mal mittig gefaltet, ergibt eine Höhe von 14 km.

Jetzt stehst du wieder real vor der Pinnwand. Während du sie ansiehst, um nach den Lichtperlen Ausschau zu halten, siehst du sie nicht mehr. Auch jetzt werden zahllose von ihnen ausgetauscht; sie sind aber unsichtbar und werden darum **virtuelle** Teilchen (Photonen) genannt. Diese virtuellen Teilchen sind überall, um dich herum und in dir. Sie gehören zum elektromagnetischen Feld, das das gesamte Universum ausfüllt. Man stellt sich vor, dass die **elektromagnetische Kraft** durch den Austausch der **virtuellen** Photonen veranlasst wird und nennt sie darum **Kraft-, Austausch- oder Boten-Teilchen**.

Es gibt auch **reale** Photonen! Das sind die Lichtquanten, von denen das Universum die Anzahl von 411 pro cm^3 enthält. Das ist das **Licht des Urknalls**.

Es ist ein bisschen so wie bei der Schwerkraft, die man auch nicht sehen kann. Auch Newton hatte keine Ahnung von dem, was er da beschrieb und auch berechnen konnte, mit seiner Formel, bzw. was dafür verantwortlich ist, dass Körper in einem Gravitationsfeld fallen. Die Erklärung hat erst Einstein mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie geliefert: Die Ursache ist in diesem Fall keine Kraft, sondern der Körper folgt den Krümmungen der Raumzeit. Aber es erscheint so, als wirke da eine Kraft zwischen den Massen. Ist die Wirkung von Magneten genauso zu erklären? **Nein!**

Sonst würden Magnete nicht nur magnetische Stoffe anziehen, wie Büroklammern, Nägel usw., sondern auch andere Stoffe wie Holz oder Menschen. Doch du hattest nicht das Gefühl, deine Finger würden von dem Magneten angezogen. Also muss es eine andere Erklärung geben. Die gibt es und hat mit dem zu tun, was Physikerinnen und Physiker als Feld bezeichnen, exakter als **Quanten-Vakuum-Feld**. Dieses Feld ist nicht leer, sondern erfüllt mit den v. g. virtuellen Teilchen / Antiteilchen, die auftauchen und rasch wieder verschwinden. Das geht zurück auf die Unbestimmtheitsrelation Heisenbergs. Das Vakuum bringt so Energie hervor, die nach kurzer Zeit wieder verschwindet, d. h. sie wird kurzzeitig (10^{-16} Sekunden) geliehen.

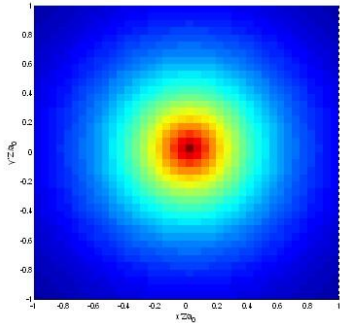
Bei Magneten haben wir es mit einem **elektromagnetischen** Quantenfeld zu tun. Wenn sich elektrische Ladungen bewegen, führt dies, wegen den damit einhergehenden Beschleunigungsvorgängen, zu magnetischen Kräften und elektromagnetischen Feldern. Dies beschreiben die Maxwell-Gleichungen (siehe Anhang). Magnete haben einen **Nordpol** und einen **Südpol**, die einander anziehend (**N \rightarrow \leftarrow S**) oder abstoßend (**N \leftarrow \rightarrow N / S \leftarrow \rightarrow S**) wirken. Das wiederum hängt von der (beschleunigt bewegten) elektrischen Ladung ab. In der Natur gibt es nur zwei Arten von **elektrischer Ladung**, die man auch messen kann:

Positive Ladung (plus +) und negative Ladung (minus -)

Diese **virtuellen** Photonen stoßen gleichnamige Ladungen ab und ziehen ungleichnamige Ladungen an und entfalten so die **elektromagnetische Kraft**. Und je größer die beiden Ladungen und je näher sie beieinander sind, umso größer ist auch die Anzahl der interagierenden virtuellen Photonen und umso größer auch die abstoßende bzw. anziehende Kraft, die sie übertragen, daher auch die Bezeichnung Kraftteilchen. Diese Energie-Pakete interagieren nicht mit neutralen Objekten, wobei diese entweder deshalb neutral sind weil sie die gleiche Anzahl positiver und negativer Ladungen aufweisen, oder weil sie überhaupt keine elektrische Ladung haben. Das sind die Gesetze des elektromagnetischen Quantenfeldes.

Das Quanten-Feld durchzieht das gesamte Universum und wird erst in der Nähe geladener Objekte merklich wirksam und das umso mehr, je näher sich diese kommen. Es ist kein Bild, es ist die Realität. Es bringt auch jedes elektromagnetische Teilchen und jede Form von Licht im Universum hervor. Und die Elektronen, wie wir noch sehen werden, sind davon ebenso Ausdruck wie das Licht, das wir mit unseren Augen wahrnehmen.

Zitat Galfard: „Viele brillante Köpfe unter den Naturwissenschaftlern halten das **Elektromagnetische Feld** für fundamentaler als alles andere in der Welt!“

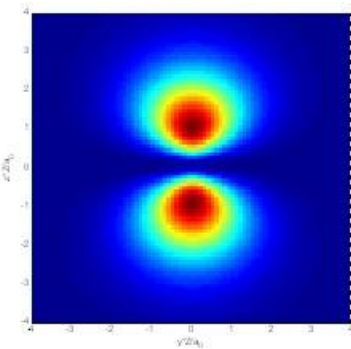


Du begibst dich jetzt wieder in dein Mini-Ich, um in die Welt der Atome vorzustößen und beginnst mit dem kleinsten Atom; es ist das Wasserstoff (H) - Atom, das rund 74 % aller bekannten baryonischen Materie des Universums ausmacht. Im H-Atom angekommen merkst du, dass da etwas ist vor dir. Was es ist, kannst du nicht sagen, du siehst nichts Konkretes. Du schließt deine Miniaugen und versuchst dir etwas vorzustellen: Eine Art Welle, die das elektromagnetische Feld kräuselt, eine Welle, die um eine hohle Kugel - oder ist es eine hohle Keule? - herumvibriert. Was immer es ist, es trägt eine (negative) elektrische Ladung, du spürst sie, die Ladung, wie du sie auch bei Annäherung des Magneten an die Pinnwand gespürt hast. Jetzt aber wechselt das Elektron die „Bahn“ von $n = 1 \rightarrow n = 2$. Auslöser ist die Absorption (Aufnahme) eines **realen** Photons. Es springt aber schnell wieder zurück von $n = 2 \rightarrow n = 1$ in den Ausgangszustand unter Emission (Ausendung) eines **realen** Photons. Und das ist der berühmte **Quantensprung** in seiner ursprünglichen Deutung (Siehe Excel-Tab. Atomphysik S. 3).

Grafik: <https://slideplayer.org/slide/904989/>

↑ Bild veranschaulicht den Aufenthaltsbereich des Elektrons im H-Atom für den Quantenzustand $n = 1$ (1s-Orbital, kugelförmig) / $l = 0$ / $m = 0$.

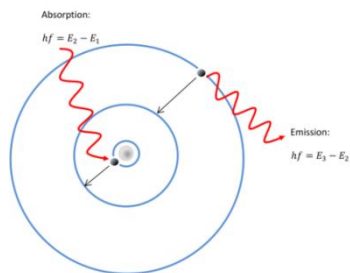
Visualisierung Quantensprung <https://www.youtube.com/watch?v=VsPwUGDhgxA> 1 min



Dann stellst du fest, dass da tief im Inneren noch etwas ist, das sehr klein ist, verglichen mit dem Volumen, das die Welle ausfüllt. Du siehst, dass auch im Zentrum der hohlen Kugel eine elektrische Ladung ist, die positiv ist und so stark, dass sie die negative bewegliche Ladung daran hindert, sich zu entfernen. Dieses Zentrum wird als **Atomkern*** bezeichnet und die nicht scharf abgegrenzte, geladene, vibrierende Welle als **Elektron**. Das Elektron ähnelt so, wie du es momentan erlebst, gar nicht dem kleinen Punkt, als den du es dir eigentlich vorgestellt hast. Um sicher zu gehen öffnest du deine Miniaugen und siehe da, die vibrierende Welle ähnelt auf einmal doch einem punktförmigen Teilchen, das aber, sobald du hinschaust, um es zu orten, sich im selben Augenblick unsterk bewegt und seine Bahn in unvorhersehbarer Weise ändert. Und das ist ein reales Phänomen, eines von vielen, die es nur in der Quantenwelt gibt, aber nicht in der Alltagswelt. Diese Erscheinung ist Teil der **fundamentalen Unbestimmtheit** der Natur (Heisenberg, siehe Excel-Tab. Sammelsurium S. 11 bis 14).

Grafik: <https://slideplayer.org/slide/904989/>

↑ Bild veranschaulicht den Aufenthaltsbereich des Elektrons im H-Atom für den Quantenzustand: $n = 2$ ($2p_x$ -Orbital, hantelförmig) / $l = 1$ / $m = 0$.



Wie bereits oben erwähnt, kann so ein Elektron „springen“. In der ursprünglichen Deutung des Begriffs Quantensprung wechselt das Elektron innerhalb des Atoms sein Energieniveau, indem es seine „Bahn“ wechselt. Der Quantensprung ist heute umfassender definiert und umfasst weitere Phänomene wie Quanten-Tunneleffekt, ? Übrigens können in der Quantenwelt **alle** Teilchen springen und tunneln. Quantensprung bedeutet eigentlich, dass die überhaupt **kleinstmögliche** Wirkung erzielt wird. Die Welt der Quanten können wir nicht verstehen, denn:

Die Quantenwelt ist nicht kausal!

Grafik: abiweb.de

*) Stellt man sich den H-Atomkern als Reiskorn vor, das in einem Fußballstadion auf dem Anstoßpunkt liegt, so hält sich das Elektron in den oberen Zuschauerreihen auf. Im Atom gibt es viel „leeren“ Raum. Der Kern enthält fast die gesamte Masse. Das Proton / Neutron ist 1836-mal so schwerer als das Elektron (s. Tab. Phys.-K Seite 3).

Elektronen und reale Photonen bilden das elektromagnetische Feld und sind Ausdruck desselben.

Sie sind kleine Wellen in einem unsichtbaren Meer, Quantenwellen, die sich sowohl wie Wellen (Photonen) als auch wie Teilchen (Elektronen) verhalten können. Viele von ihnen umspülen jetzt dein Wasserstoffatom. Um nach hier zu gelangen, mussten sie einen weiten Weg zurücklegen. So zwischen 100.000 und einer Million Jahre haben sie benötigt, um von der Kernfusionszone im Innern der Sonne bis an ihre Oberfläche zu gelangen. Diese haben sie schließlich vor 8,32 Minuten erreicht. Endlich frei ging es dann rasend schnell, ungehindert von Materie, mit Lichtgeschwindigkeit ins Weltall hinaus. Ein kleiner Teil von ihnen hat vor weniger als einer Sekunde die Erdatmosphäre erreicht und ein winziger Teil ist soeben durch das Fenster ins Zimmer gelangt. Du beobachtest aus dem Inneren des Wasserstoffatoms heraus was nun geschieht:

Die Quantenwellen rasen durch das Zimmer und auch durch dein Wasserstoffatom hindurch und krachen gegen die Wand des Zimmers, mit Ausnahme einer Welle. Diese hat mit dem Elektron deines Wasserstoffatoms interagiert. Das merkst du daran, dass das Elektron jetzt anders vibriert als vorher. Und betrachtet man es als Welle, die den Kern umschließt, dann liegen deren Scheitelpunkte jetzt dichter beieinander, d. h. die Wellenlänge ist kürzer und damit die Frequenz f höher als vorher. Das Elektron hat die Energie $E (= h \cdot f)$ des Photons hinzugewonnen, als es dieses verschluckt hat. Das Elektron befindet sich jetzt im angeregten Zustand. Doch schon nach kurzer Zeit spuckt es das Photon irgendwohin wieder aus und regt sich wieder ab.

Jetzt kommt es dir in den Sinn: Die Elektronen und Photonen des elektromagnetischen Feldes interagieren miteinander, d. h. sie wirken wechselseitig aufeinander ein. Elektronen und Photonen lieben sich, wie Daniela Leitner in „Als das Licht laufen lernte“ formuliert. Und da sich das elektromagnetische Feld durch das **ganze** Universum erstreckt, gehört ihm auch **jedes** einzelne Elektron an. Wenn du hinsiehst, dann sind Elektronen Teilchen und dann weißt du, wo sie sich befinden bzw. wo sich eines von ihnen befindet. Du kannst aber nicht ihre Bahn orten (z. B. um den Kern des Wasserstoffatoms), weil es sich unetw bewegt und augenblicklich aus deinem Blick verschwindet, sobald du hinsiehst. Und wenn du weißt wieviel Energie es hat, dann kannst du nicht wissen, wie lange es diese behalten wird.

Position und Geschwindigkeit als auch Energie und Zeit sind im elektromagnetischen Quantenfeld nicht voneinander unabhängig.

Siehe Tab. Sammelsurium S. 11 und 12

Elektronen sind Elementarteilchen und daher nur sich selbst und können **nicht** weiter zerlegt werden, wie das bei Protonen und Neutronen der Fall ist, die aus Quarks aufgebaut sind. Die Lichtperlen, die zwischen der Pinnwand und dem Magneten auftauchten, als dieser sich auf die Pinnwand zubewegte waren **virtuelle** Photonen. Sie werden Träger- oder Botenteilchen genannt und entstehen, wie schon gesagt, **nur** zu dem Zweck, die **elektromagnetische** Kraft zwischen den **elektrisch** geladenen Teilchen zu übertragen. In diesen virtuellen Photonen steckt die Kraft, die den Magnet zur Pinnwand hinzieht.

Elektronen haben es aber nicht **nur** mit virtuellen Photonen zu tun, durch die sie mit dem Rest der Welt wechselwirken (Kraftlinien im Magnetfeld). Sie interagieren auch mit **realen** Photonen, dem wirklichen Licht, das die Welt für uns sichtbar macht, wenn es in unsere Augen gelangt.

Das H-Atom, in das du eingetaucht warst, ist das kleinste Atom das es gibt. Der weitaus größte Teil der H-Kerne, 99,99 %, besteht aus nur einem Proton, 0,01 % bestehen aus 1 Proton plus 1 Neutron (Deuterium) und ganz selten kommt die Variante 1 Proton plus 2 Neutronen (Tritium) vor. Diese Varianten werden Isotope genannt und das sagt aus, dass diese Atome „an gleicher Stelle stehen“, im Periodensystem der Elemente. Das wiederum drückt aus, dass die **chemischen** Eigenschaften überhaupt **nicht** vom Atomkern beeinflusst werden. Die chemischen Eigenschaften werden **nur** von den Elektronen der **äußeren** Schale des Atoms bestimmt. Diese werden **Valenzelektronen** genannt. Auch von allen anderen Atomen, Helium (He), Sauerstoff (O), Eisen, ..., Uran (U), gibt es Isotope. **Siehe Excel-Tab. Atomphysik Seite 6 bis 8.**

Atome sind eigentlich gesellige Wesen und binden sich gern aneinander (chemisch), indem sie ihre Valenzelektronen gemeinsam nutzen, um dadurch einen möglichst stabilen und somit **niedrigeren** Energiezustand einzunehmen. Hierzu fehlt dem Wasserstoffatom (K-Schale: $1s^1$) nur noch ein zweites Elektron. Deshalb tut es sich mit einem anderen Wasserstoffatom aus seiner Nähe zusammen und komplettiert dann mit diesem gemeinsam die K-Schale zu $1s^2$. Indem sie sich das s-Orbital teilen, kommen beide Atome in den Genuss einer vollbesetzten äußeren Schale und binden sich dadurch aneinander. Aus zwei Wasserstoff-Atomen ist auf diese Art (kovalente Atombindung) ein Wasserstoff-Molekül (H_2) geworden.

Auch zwei Sauerstoff-Atome [K-Schale ist komplett ($1s^2$), auf der L-Schale ($2s^2 2p^4$) ist noch Platz für zwei weitere Elektronen] verbinden sich so zu einem Sauerstoff-Molekül O_2 [K-Schale ist komplett ($1s^2$), L-Schale ist komplett ($2s^2 2p^6$)], indem sie die äußere L-Schale gemeinsam nutzen. Ein Sauerstoff-Atom kann sich aber auch mit zwei Wasserstoff-Atomen zu einem Wasser-Molekül H_2O verbinden, um einen noch stabileren Energiezustand ($2s^2 2p^6$) einzunehmen. Mit dieser Reaktion geht ein lauter Knall einher, denn es wird Energie frei. Die Valenzelektronen der beteiligten Atome haben jetzt einen niedrigeren Energielevel eingenommen. Und da die drei Atomkerne des Wassermoleküls durch die virtuellen Photonen (Träger- oder Botenteilchen) an ihre Elektronen gebunden sind und zwar über die elektromagnetische Kraft, müssen diese ihnen folgen und die drei Atome bleiben so beieinander. Und wenn sie nicht getrennt wurden, unter Aufwendung von (Sonnen-) Energie, um z. B. mit Wasserstoff Auto zu fahren, dann sind sie auch morgen noch zusammen.

Die größten Wassermengen entstehen in kosmischen Nebeln, in denen sich der in explodierten Sternen erzeugte Sauerstoff mit dem überall vorhandenen Wasserstoff vermischt. Wenn Sterne sterben, senden sie ihre Keime hinaus und machen den Weg frei für die Bildung von Wasser und anderer Moleküle

Indem sich die Atome verschiedener Elemente ihre Valenzelektronen teilen, können sie auf vielfältige Weise Verbindungen eingehen und auch Ketten von verschieden großer Komplexität bilden. Die Natur hat Moleküle gebildet, die verschiedene Eigenschaften haben und so klein sind wie das Wassermolekül und auch so groß wie eine DNA, die mit ihren Milliarden Atomen alle Informationen enthält, die für die Bildung für jemanden wie dir erforderlich sind.

Für die Bildung aller Moleküle, die für die Entstehung von Leben auf der Erde notwendig waren, genügten sechs Elemente:

CHNOPS

Kohlenstoff C, Wasserstoff H, Stickstoff N, Sauerstoff O, Phosphor P, Schwefel S.

Und jetzt beschließt du, dich wieder in dein Mini-Ich zu verwandeln und zum Atomkern eines der beiden Wasserstoffatome vorzustößen, die sich eben mit einem Sauerstoffatom zum Wassermolekül verbunden hatten. Und so schwebst du nun von den oberen Rängen des Fußballstadions hin zum Reiskorn, das auf dem Anstoßpunkt des Spielfeldes liegt. Auf dem Weg dorthin tauchen immer wieder diese virtuellen Lichtperlen auf und verschwinden auch gleich wieder, wenn du sie beobachten willst. Das wiederum bestätigt dir nur, dass du dich in einem **elektromagnetischen** Feld befindest und dass der Atomkern elektrisch positiv geladen sein muss, da Elektronen ja die Träger der negativen elektrischen Elementarladung sind. Und die virtuellen Photonen erzeugen die elektromagnetische Kraft, die dafür sorgt, dass Elektronen nicht in den Kern stürzen oder aus der Atomhülle herausgeschleudert werden. Kurz gesagt:

Der Magnetismus ist somit der Baumeister der Materie.

Wie schon das Elektron, so hat auch der Kern keine fest umrissene Form. Beim normalen Wasserstoffatom besteht er aus nur einem Proton mit positiver Elementarladung. Entdeckt wurde das Proton im Jahr 1911 durch Ernest Rutherford bei seinen Streuversuchen.

Beim Wasserstoffkern angelangt, machst du dich noch winziger und begibst dich in ihn hinein. Sofort fühlst du eine enorme Kraft, die mehrere hundert Mal so stark ist wie die elektromagnetische Kraft, die von den virtuellen Photonen übertragen wird und die dir auf dem Flug zum „Reiskorn“ begegnet sind. Auch hier im H-Kern, in diesem einen Proton, siehst du in einer scheinbar konturlosen und wolkigen Sphäre, zahllose virtuelle Teilchen entstehen und auch gleich wieder verschwinden. Hier sind es aber keine virtuellen Photonen, sondern **Gluonen** (englisch: to glue = kleben).

Die Gluonen sind die Trägerteilchen einer weiteren Kraft, die zusammen mit einem neuen Quantenfeld, zu dem sie gehören, die Materie im Universum stabilisiert. Auch dieses Quantenfeld ist omnipräsent (allgegenwärtig) und wird **starkes Interaktionsfeld** oder einfach nur **starkes Feld** genannt und die zum Feld zugehörige Kraft die **starke Kernkraft** oder **starke Wechselwirkung**. Die Elementarteilchen des starken Feldes heißen Quarks und die, wie die Elementarteilchen des elektromagnetischen Feldes auch, die Elektronen, zu jeder Zeit und überall aus ihm heraus treten können, wenn nur genügend Energie vorhanden ist.

Von diesen Quarks gibt es sechs verschiedene Arten. Im Atomkern, genauer in seinen Bausteinen, den Protonen und Neutronen, finden sich aber nur zwei Arten: **Up-Quarks** und **Down-Quarks**. Ein Proton besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark und ein Neutron aus zwei Down-Quarks und einem Up-Quark. Als elektrisch geladene Teilchen gehören Quarks ebenso zum elektromagnetischen wie zum starken Feld und können so mit Gluonen **und** Photonen wechselwirken. Doch auf kurzen Distanzen, die Reichweite der starken Kernkraft beträgt nur 10^{-15} m, sind die Gluonen als Botenteilchen sehr viel stärker als das Licht. Und weil die starke Kernkraft so enorm stark ist, „kleben“ die Gluonen die Up- und Down-Quarks in den Protonen und Neutronen so fest aneinander, dass Atomkerne, auch die mit mehreren Protonen, nicht auseinanderfliegen, wegen der Coulomb-Abstoßung der positiv geladenen Protonen. Auf diese Weise stabilisieren die Gluonen die Materie im Universum. **Siehe auch Excel-Tab. Atomphysik Blatt 12 von 14.**

Das starke Feld mit seinen Elementarteilchen (Quarks) und Botenteilchen (Gluonen) umfasst 99,97 % der baryonischen Masse des Universums, zu der auch der Mensch gehört. Verlöre ein 80 kg schwerer Mensch alle seine Quarks und die sie verbindenden Gluonen, blieben nur noch 24 g von ihm zurück.

Es gibt noch ein drittes Quantenfeld, es ist das **schwache** nukleare Quantenfeld mit der **schwachen** Kernkraft. Wie es der Name andeutet, wirkt diese Kraft, wie die starke Kernkraft, auch nur auf die Bestandteile von Atomkernen. Um etwas über dieses Feld zu erkunden verkleinerst du dich mal wieder auf dein Mini-Ich und begibst dich nah an ein Gold - (Aurum-Au-) Atom heran. In seiner Hülle tummeln sich 79 Elektronen und im Kern 79 Protonen und 118 Neutronen, die von der **starken** Kernkraft zusammengehalten werden. Die Summe Protonen plus Neutronen ergibt 197 und das sagt dir, dass du in dem Gold-Isotop Au 197 gestrandet bist. Dir fällt nichts Besonderes auf und so wartest du eine Weile um zu sehen, ob es Veränderungen gibt, ob z. B. ein vorbeifliegendes Atom eingefangen wird, um mit dem Gold-Atom ein Molekül zu bilden. Aber es geschieht nichts. Gold oxidiert (rostet) nicht. Das ist einer der Gründe, warum dieses geschmeidige Metall für die meisten Menschen so wertvoll ist. Von Gold gibt es zwar weitere 40 Isotope, die jedoch alle samt instabil sind, mit Halbwertszeiten im Bereich von Nano-Sekunden bis zu 186 Tagen, so dass natürliche Goldvorkommen nur aus Au 197 bestehen.

Und da sich beim Gold weiterhin nichts tut, begibst du dich in ein Plutonium (Pu) - Atom, das zufällig in der Nähe ist. Hier zählst du 94 Elektronen, die um seinen Atomkern, bestehend aus 94 Protonen und 145 Neutronen, wirbeln. Somit handelt es sich um das Plutoniumisotop Pu 239. Beginnend mit der äußeren Schale lässt du wieder eine nach der anderen hinter dir und überquerst diese gewaltigen Leerräume, bis du den Kern des Atoms erreichst. Du tauchst in ihn ein und entschließt dich, intuitiv, ein Neutron zu besuchen. Hier triffst du, erwartungsgemäß, zwei Down-Quarks und ein Up-Quark an. Wie du schon weißt „kleben“ Gluonen, indem sie die starke Kernkraft übertragen, die Neutronen und Protonen ganz fest aneinander und verleihen den Atomkernen so ihre Stabilität, während die elektromagnetische Kraft auf die Elektronen einwirkt und sie in der Atomhülle gefangen hält. Du bist also in zwei Feldern unterwegs gewesen, die als **obstruktive**, d. h. aufbauende Quantenfelder betrachtet werden. Das schwache Feld ist aber **destruktiv**, weil es zunichtemacht, was die anderen beiden geschaffen haben. Es ist die letzte der vier Grund-Kräfte (Gravitation / Elektromagnetische Kraft / starke Kernkraft / schwache Kernkraft), die das Universum beherrschen.

Charakteristisch für das schwache Feld ist u. a., dass sich Atomkerne spontan spalten können, ein Vorgang, der als Radioaktivität berüchtigt ist. Du willst es dir in deinem Neutron gerade gemütlich machen als du mitbekommst, wie eines der beiden Down-Quarks von einem virtuellen Teilchen getroffen wird und dieses Down-Quark in ein Up-Quark verwandelt. Mithin ist das Neutron zu einem Proton geworden. Es ist Chaos entstanden, denn der Pu-Kern hat jetzt ein Proton zu viel. Die Folgen sind dramatisch. Der ganze Atomkern verliert seine Balance und wird instabil. Du machst dich sofort auf und davon und siehst noch, wie der Plutonium-239-Kern sich spaltet und in kleinere Kerne zerfällt, die alle davon schießen und noch versuchen Elektronen an sich zu binden, manchmal vergeblich. In jedem Stadium dieses Vorgangs werden so äußerst energiereiche Teilchen, die Spaltprodukte, frei. Und da zum Glück so gut wie keine weiteren Pu-Kerne in der Nähe sind, ist der Spuk auch schnell zu Ende.

Du hast gerade die virtuellen Trägerteilchen der vierten bekannten Naturkraft, der schwachen Kernkraft, kennengelernt und ihre Fähigkeit, Quarks in andere Quarks umzuwandeln und infolgedessen den radioaktiven Zerfall auszulösen. Diese Trägerteilchen werden als **W- und Z-Bosonen** bezeichnet.

Wolfgang Pauli, der auch das nach ihm benannte Ausschlussprinzip entdeckte, hat den radioaktiven Zerfall um die 1920er Jahre studiert und festgestellt, dass dabei Energie „verloren“ geht und postulierte daher die Existenz eines bis dahin unbekanntes Teilchens mit winziger Masse und ohne elektrische Ladung, das **Neutrino**, experimentell nachgewiesen 1956 durch den Physiker Frederick Reines (Nobelpreis für Chemie 1995) und Kollegen. Von ihm stammt die Aussage: Ein Neutrino ist die kleinste Masse Wirklichkeit, die sich je ein Mensch vorgestellt habe. Für Neutrinos, es gibt verschiedene Typen von ihnen, sind Atome leer, denn sie unterliegen nur der schwachen Kernkraft und der Schwerkraft. In der Sonne entstehen sie im Überfluss, so dass jede Sekunde mehr als 60 Milliarden einen Quadratzentimeter deiner Haut passieren.

Die vier Grundkräfte bzw. Wechselwirkungen des Universums im Überblick

Grundkraft	Stärke	Reichweite [m]	Materie-Teilchen	Kraft-Teilchen
	bezogen auf starke Kernkraft		Fermionen (Spin ½)	Bosonen (Spin 0, 1 oder 2)
Schwerkraft	10^{-44}	unendlich		Gravitonen* (Kein Nachweis)
Elektromagnetische Kraft	10^{-2}	unendlich	Leptonen: u. a. Elektronen	Virtuelle Photonen
Starke Kernkraft	1	10^{-15}	Hadronen: Quarks	Gluonen
Schwache Kernkraft	10^{-5}	10^{-17}	Hadronen: Quarks	W- und Z-Bosonen

Einzig der Spin entscheidet ob ein Elementarteilchen als Materieteilchen (mit Spin ½) oder als Kraftteilchen (mit Spin 0, 1 oder 2) in Erscheinung tritt. Die gesamte uns bekannte Materie ist aus **Fermionen** mit Spin ½ aufgebaut. Die Fermionen sind in zwei Gruppen eingeteilt: **Hadronen** (griechisch: Hadron „hart“) und **Leptonen** (griechisch: Leptos „schwach“). Zur Gruppe der Hadronen gehören Materieteilchen die aus Quarks aufgebaut sind. Sind nur zwei Quarks an ihrem Aufbau beteiligt, gehören sie zu den **Mesonen** (griechisch: Mesos = Mitte). Mesonen sind instabil und bestehen aus Quark und Anti-Quark. Sind Teilchen aus drei Quarks aufgebaut, wie es bei Protonen und Neutronen der Fall ist (Up- und Down-Quarks), so zählen sie zu den Baryonen.

Die gesamte uns bekannte normale Materie ist aus Hadronen aufgebaut und damit baryonisch.

Die Elementarteilchen der Materie, also Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen, unterliegen dem Ausschließungsprinzip nach Pauli, d. h. sie dürfen in den Grenzen der Unbestimmtheitsrelation (**Heisenberg, s. Excel-Tab. Sammelsurium Blatt 11 v.15**) nicht die gleiche Position und Geschwindigkeit haben. Wenn Quarks dennoch weitgehend die gleiche Position einnehmen und sich infolgedessen zu nah kommen, dann müssen sie sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, damit sie nicht lange in der gleichen Position verweilen. Deshalb haben die Elektronen, die in der Atomhülle den gleichen Aufenthaltsbereich besetzen, einen unterschiedlichen Spin. Würde das Pauli-Prinzip nicht gelten, dann könnten die Quarks keine separaten abgegrenzten Neutronen und Protonen bilden und diese wiederum mit den Elektronen in der Atomhülle auch keine separaten abgegrenzten Atome aufbauen.

*) Die Gravitation ist keine Kraft, denn Kräfte bewirken, über den Austausch von Bosonen, Beschleunigungsvorgänge. In Gravitationsfeldern sind jedoch auch kräftefreie beschleunigte Bewegungen möglich. Klassiker: Der „Freie Fall“. Aus diesem Grund gibt es wahrscheinlich auch keine Gravitonen. Das Innere von Materie ist kräftefrei.

So geht die Quantenmechanik davon aus, dass die Kräfte, die zwischen den Materieteilchen (Fermionen \rightarrow Spin $\frac{1}{2}$ \rightarrow Quarks, Elektronen) wirken, durch Teilchen mit ganzzahligem Spin (0, 1 oder 2), den Bosonen, hervorgerufen werden. Dabei wird ein Kräfte tragendes Teilchen (Gluon, virtuelles Photon, W- bzw. Z-Boson) von einem Materieteilchen (Quark, Elektron) emittiert. Der durch die Emission ausgelöste Rückstoß verändert die Geschwindigkeit des Materieteilchens (Quark, Elektron). Das emittierte Kräfte teilchen (Gluon, virtuelles Photon) kollidiert dann mit einem anderen Materieteilchen (Quark, Elektron) und wird wieder absorbiert. Die Kollision verändert die Geschwindigkeit der Materieteilchen dann ganz so, als ob **eine Kraft** zwischen ihnen wirkt (Weiteres hierzu siehe Excel-Tab. Atomphysik S. 9 bis 14).

Die 4 Grundkräfte, Prof. H. Lesch https://www.youtube.com/watch?v=kistC_EjkgY 19 min

Prof. Richard Feynman Materie EXISTIERT NICHT wie du denkst. 25 min
<https://www.youtube.com/watch?v=30EHeKDKbvQ>

Prof. Dr. Harald Lesch: Quantenmechanik & Kosmologie & Urknall • So entstand unser Universum 43 min
<https://www.youtube.com/watch?v=L4pS2tBa7xU>

Karl Schwarzschild Vortrag 2023, Prof. Klaus. Blaum oder „Atom wiegen“ <https://www.youtube.com/watch?v=7LAaEpQHveo> 60 min

Diesen Vortrag sollte man sich zum Abschluss anhören!

Unser rätselhafter und **doch einfacher** Kosmos https://www.youtube.com/watch?v=gNnxg_aUuE0 50 min Prof. Matthias Bartelmann Uni Heidelberg

Videos

Omega Centauri / Von Aristoteles zur Stringtheorie / Babelsberger Sternennächte / DLR Astroseminar / Neues aus dem Universum / Live im Hörsaal / Planetare Geologie - Vorlesung / Kommentarcheck / Cafe & Kosmos / Live-Fragen / Fünf Jahre Urknall Weltall und das Leben

von

Harald Lesch / Josef M. Gaßner / Andreas Müller / Ewald Puchwein / Karsten Danzmann / Hans-Joachim Blome / Jenny Wagner / Dominik Schleicher / Ralf-Dieter Scholz / Christian Körberl / Matthias Bartelmann / Martin Kürster / Gunther Korschinek / Stefan Hilbert / Lena Noack / Joachim Wambsganß / Eva Grebel / Bruno Leibundgut.

Appell zum Schluss!



Bild: Evolution oder Schöpfung aus almafam forum

Albert Einstein:
„Das Unbegreifliche an dieser Welt ist ihre Begreiflichkeit.“

ENDE

6) Anhang: Elektrodynamik

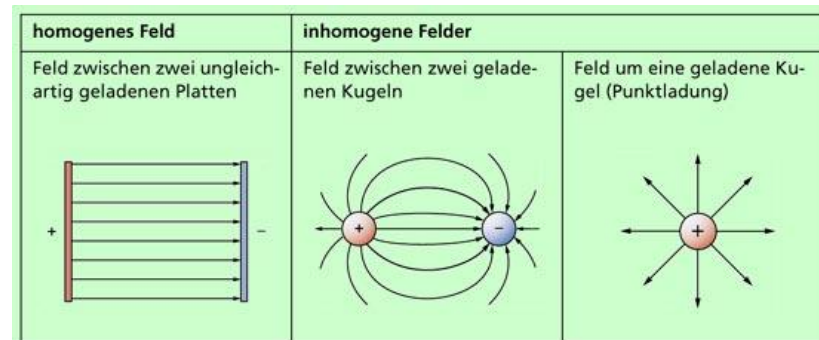
Betrachtung basiert im Wesentlichen auf lernhelfer.de

Die Elektrodynamik ist die Lehre von elektrischen und magnetischen Feldern und ihren Wechselwirkungen mit **bewegten Ladungen**. Die Elektrodynamik beschreibt, wie elektrische Felder und magnetische Felder entstehen, sich verändern und aufeinander wirken. Die Elektrostatik beschreibt, was passiert wenn elektrische **Ladungen in Ruhe** sind.

Was ist ein Elektrisches Feld?

Elektrische Felder haben **Quellen!** Und diese Quellen sind bei statischen Feldern ruhende negative oder positive elektrische Ladungen. Die kleinste frei existierende Ladungsmenge ist die Elementarladung $e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s}$ bzw. **C** (Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806), französischer Physiker). Die Elementarladung wird getragen vom Elektron (e^-) bzw. Positron (e^+); das sind **Elementarteilchen** mit der Ruhemasse $m_0 = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Ergo sind Ladungen gequantelt und die elektrische Ladung von Materiemengen **Q** ist **immer nur** ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung.

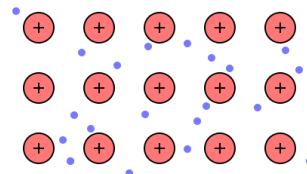
Elektrische Ladungen ($-Q$ oder $+Q$) entstehen **nur durch Trennung** ungleichnamiger Elektrizitätsmengen (z. B. Reibung (Bernstein an Fell) → statische Elektrizität / Induktion → Dynamo / chemisch → Batterien, Strahlung → Fotoeffekt / ...). Ergo ist die elektrische Ladung eine **Erhaltungsgröße**, wie die Energie- / Impulserhaltung / ... Feldlinien, s. Bild, veranschaulichen das elektrische Feld als Verbindungslinien zwischen Punkten **gleicher** Feldstärke **E**.



Grafik: Lernhelfer.de

Was ist elektrischer Strom?

Elektrischer Strom ist die **Bewegung elektrischer Ladungen**. Diese können Elektronen, Positronen, Protonen, Ionen, sein. In einem metallischen Draht z. B. bewegen sich die delokalisierten Valenz-Elektronen (e^-) relativ zu den örtlich festen Rumpfatomen im Metallgitter des Leitermaterials (z. B. Kupfer), wenn eine Spannung angelegt wird. Auslöser der Bewegung sind elektrische Felder, d. h. **elektrische Felder bewegen elektrische Ladungen**, weil sich gleichnamige Ladungen anziehen und ungleichnamige abstoßen.



Grafik: de.wikipedia.org

Die Bewegung elektrischer Ladungen ist aber nicht an einen metallischen Leiter gebunden. Elektrische Ladungen bewegen sich auch durch die Luft und im Vakuum, z. B. beim Überspringen von Funken bei großen Potentialunterschieden, sprich hohen Spannungen (z. B. Gewitter, Elektroschweißen) oder auch Ionen in Flüssigkeiten, wenn eine Spannung angelegt wird (z. B. Galvanisieren).

Was ist ein magnetisches Feld?

Ein Magnetfeld ist ein **Raum mit magnetischen Erscheinungen**. Die bekannteste Erscheinung ist wohl die Kraftwirkung auf eine Magnethadel beim Kompass. Das ist ein leichter, drehbar gelagerter Stabmagnet aus Magnetit*, der sich im Magnetfeld der Erde in die Nord-Südrichtung ausrichtet. Jeder Magnet hat zwei Pole, einen **Nordpol** und einen **Südpol**. Analog zu elektrischen Ladungen ziehen sich ungleichnamige Pole an und gleichnamige Pole stoßen sich ab. Die magnetischen Feldlinien verlaufen vom Nord- zum Südpol und sind, im Gegensatz zu elektrischen Feldlinien, **immer** geschlossen.

Magnetische Erscheinungen sind die Folge **bewegter** elektrischer Ladungen (Elektronen, Protonen, Ionen). Auch bei der Entladung von Blitzen bewegen sich elektrische Ladungen (Elektronen) und dabei treten Magnetfelder auf. Sonne und Erde haben Magnetfelder. Auch ein einziges Elektron (z. B. im Atom) oder Proton, das **in Bewegung** ist, erzeugt um sich herum ein magnetisches Feld.

So lenkt ein stromdurchflossener Leiter (siehe linke Grafik) eine in seiner Nähe aufgestellte Magnethadel wie ein Magnetpol aus. Die Ursache dafür ist das magnetische Feld, das den Leiter umhüllt. Feldlinien veranschaulichen dies; sie verlaufen in diesem Fall als konzentrische Kreise um die Leiterachse herum und sind nach der "Korkenzieherregel" ausgerichtet.

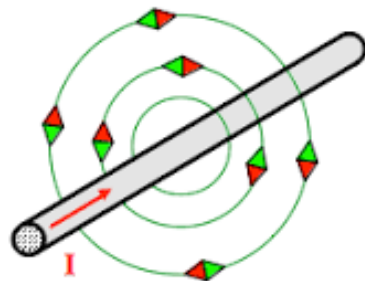
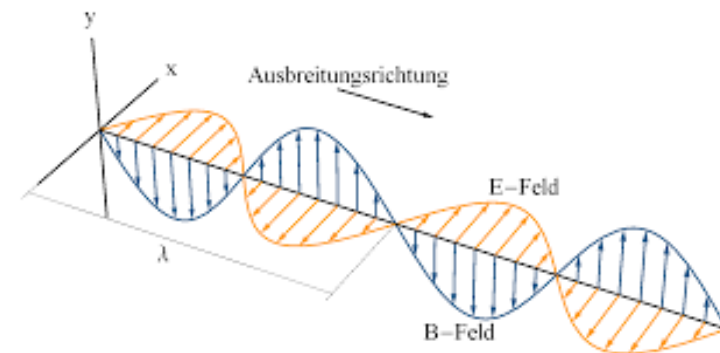


Bild 10-9: Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

Grafik: elektronik-kurs.net



Grafik: timaios.org

*) Eisen Fe_2O_4 → **natürlicher** Magnet, ist das **stärkste natürlich magnetische Mineral** auf der Erde. Stücke von Magnetit können Eisen anziehen.

Das bedeutet schließlich: Elektrische Ströme und elektrische Felder, die sich **zeitlich ändern**, erzeugen magnetische Felder. Das gilt auch umgekehrt; magnetische Felder die sich zeitlich ändern erzeugen elektrische Felder. Langer Rede kurzer Sinn: **Alle Ladungsträger** (Elektronen, Protonen, Ionen, Positronen) die **beschleunigt** oder **abgebremst** werden, senden in **alle** Richtungen

Elektromagnetischen Wellen

aus, die sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit **$c = 299792,458 \text{ km/s}$** ausbreiten. Elektrizität und Magnetismus sind zwei Eigenschaften desselben Systems. Das eine kommt, falls man sich nicht nur im statischen Bereich bewegt, ohne das andere nicht vor, ergo:

Licht ist ein elektromagnetisches Phänomen!

Was sind Wellen eigentlich?

Wellen, ob Wasserwellen, Schallwellen, seismische Wellen, ..., **elektromagnetische Wellen** transportieren **nur Energie** und **nie Materie**. Das bedeutet: Wellen, bei elektromagnetischen Wellen spricht man auch von Strahlung, sind **Träger von Energie**. Fällt ein Stein auf eine Wasseroberfläche, wie Teich, See, ..., dann gibt der Stein seine kinetische Energie ans Wasser ab und die Wasserwellen transportieren die Energie weiter ans Ufer, wo sie in Arbeit und Wärme umgewandelt wird und ggf. Sand aufwirbelt. Auf dem Meer kann das, wenn der Stein nur groß genug ist, z. B. ein Asteroid, einen Tsunami auslösen. Die H_2O -Moleküle verbleiben dabei faktisch an Ort und Stelle, laufen also nicht mit ans Ufer.

Die Maxwell-Gleichungen

James Clerk Maxwell (1831 – 1879) hatte Mitte des 19. Jahrhunderts die elektrischen und magnetischen Phänomene zur **ersten großen vereinigten Feld-Theorie der Physik** zusammengefasst.

In der Sprache der Physik wird die Elektrodynamik durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben. Sie fassen alle grundlegenden Gesetze über elektrische und magnetische Felder in vier eleganten Gleichungen zusammen und bilden so das Herz der Elektrodynamik. Es wird beschrieben, wie elektrische und magnetische Felder entstehen, sich verändern und miteinander verknüpft sind.

Maxwell und Elektromagnetische Wellen <https://www.youtube.com/watch?v=Cyy5hTbDdPg> 3,5 min + 9 min

Prof. Harald Lesch erklärt die Maxwellgleichungen <https://www.youtube.com/watch?v=hZEv04ibjKI> 15 min

Elektromagnetismus M. Gaßner https://www.youtube.com/watch?v=SO-eNY_8hyk 40 min

Das elektromagnetische Spektrum <https://www.youtube.com/watch?v=KrgD7FmFUe> 1,5 min + 5 min

Fazit der Maxwell-Gleichungen

5.2. Die Maxwell-Gleichungen

Wir beschränken uns auf E -, B -Felder ohne Materieeffekte
($\epsilon = \mu = 1$)

Maxwell-Gleichungen

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

mit $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$

Bemerkung: in Materie

$$c_{\text{Materie}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu \epsilon_0 \mu_0}}$$

Bild: slideplayer.org

1. **Die Quellen des elektrischen Feldes sind elektrische Ladungen!** Ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung e^- bzw. e^+ erzeugen eine **Ladungsdichte ρ (rho) = $4 \cdot \pi \cdot n \cdot e$** . Elektrische Feldlinien beginnen an positiven Ladungen und enden negativen. Viele Feldlinien bedeuten starke Ladung / wenige schwache. Beispiel: Eine positiv geladene Kugel stößt positive Teilchen ab, weil ihre Feldlinien „nach außen gerichtet sind“.
2. **Es gibt keine isolierten magnetischen Ladungen!** Magnetische Felder besitzen keine einzelnen „magnetischen Ladungen“. Stattdessen treten Magnetpole nur paarweise auf, als Nordpol und Südpol. Magnetische Feldlinien bilden daher immer geschlossene Schleifen; sie treten am Nordpol aus und am Südpol wieder ein.
3. **Ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld!** Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld induziert ein elektrisches Wirbelfeld, das als Spannung gemessen werden kann. Das ist das **Induktionsgesetz**, die Grundlage der Stromerzeugung in Dynamo und Generator.
4. **Elektrische Ströme j (Vektor) und zeitlich veränderliche elektrische Felder erzeugen Magnetfelder!** Das ist das **Durchflutungsgesetz!**

Elektrizität und Magnetismus können nicht verschwinden. Das elektrische Feld und das magnetische Feld sind **untrennbar** miteinander verbunden und umgekehrt. Änderungen des einen erzeugen jeweils das andere. Deshalb spricht man vom **Elektromagnetischen Feld**.

Beispiel:

Wenn Strom durch einen Draht fließt, bilden sich kreisförmige magnetische Feldlinien um ihn herum. Wenn sich das elektrische Feld ändert (z. B. in einer Antenne), entsteht ebenfalls ein Magnetfeld und das wiederum erzeugt ein neues elektrisches Feld und so weiter So entstehen elektromagnetische Wellen, also Licht, Radiowellen, Mikrowellen

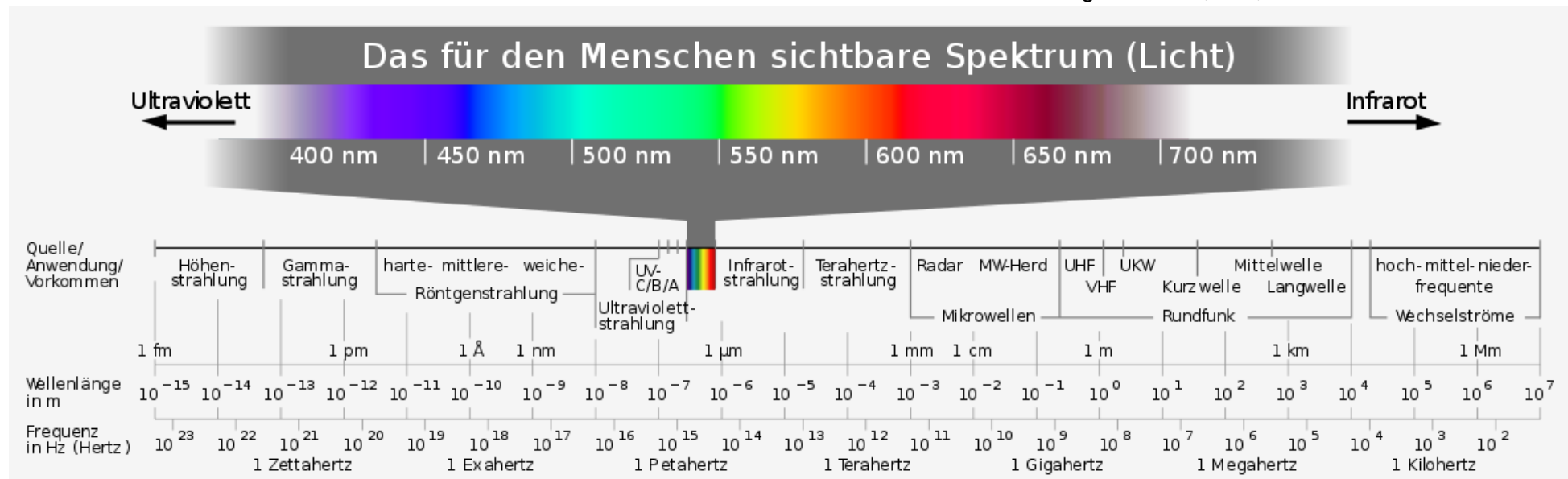
*) div = Divergenz: = „auseinandergehen“ (von einer Quelle, einem Ursprung ausgehend) / rot = rotieren = drehen, wirbeln (\rightarrow elektrisches Wirbelfeld)

Für die Physikerinnen und Physiker sind alle Elektromagnetischen Wellen Licht! Die Elektronen in den Atomen absorbieren ständig Lichtquanten (Photonen, Wellen-, Energiepakete), indem sie in den "Schalen" der Atome nach oben springen (auf höhere Energie-Niveaus) und emittieren ständig Lichtquanten, indem sie auf tiefer gelegene "Schalen" zurückfallen (auf niedrigere Energie-Niveaus). *Siehe Excel-Tab. Atomphysik S. 3 v. 14.*

Licht bzw. elektromagnetische Wellen brauchen, im Gegensatz zu, z. B. Wasser- oder Schallwellen, kein Medium um sich auszubreiten!

Die Materie kann auf vier verschiedene Arten mit Licht in Verbindung treten:

- **Emission** → passendes Lichtquant wird ausgesendet (Energieerniedrigung)
- **Absorption** → passendes Lichtquant wird aufgenommen (Energieerhöhung)
- **Reflexion** → gerichtete Abstrahlung unter festem Winkel, wie bei einem Spiegel oder auch wahllos, dann spricht man von Streuung
- **Transmission** → Elektronen der Materie lassen die Lichtquanten passieren, die Materie erscheint durchsichtig z. B. Glas, Luft, ...



Grafik: wikipedia.org

Messung der Lichtgeschwindigkeit <https://www.youtube.com/watch?v=8cCoAbJOY4c> . 8 min

Was ist Licht? <https://www.youtube.com/watch?v=2DOqF4Mt35Y> 4 min

Michelson-Morley-Experiment <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/michelson-interferometer-2263> 5 min