

Einsteins Universum

Inhaltsverzeichnis

<u>Kapitel</u>	<u>Seite</u>
Absolut und Relativ	1
Das Licht	4
Schneller als das Licht?	9
Die Gravitation	16
Die Zeit	28
Zeitreisen	36
Der Raum	46
Die Äquivalenz von Energie und Materie	61

Absolut und Relativ

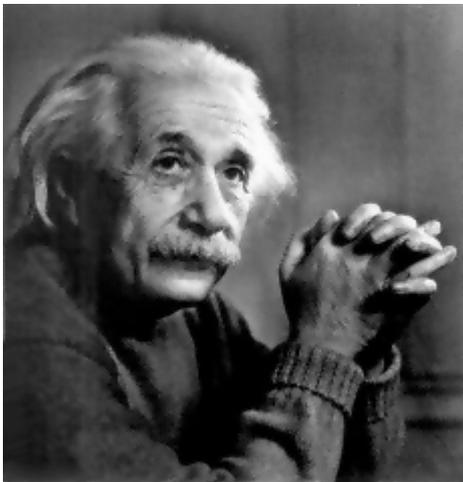
Absolute Größe?

Absolute Zeit?

Absolute Geschwindigkeit?

Absolute Größe?

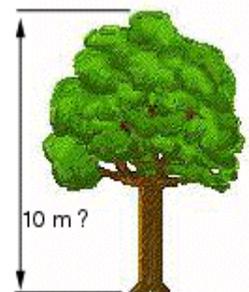
In unserer Alltagssprache gehen wir häufig recht belanglos mit Begriffen wie **absolut** oder **relativ** um, ohne uns allzu viele Gedanken um deren tiefere Bedeutung zu machen. Stimmt's?



Albert Einstein (1879 bis 1955) hat uns gezeigt, dass wir damit etwas vorsichtiger sein sollten, wie nachstehende Beispiele zeigen werden. Waren seit Newton Zeit, Raum und Geschwindigkeiten absolute, unveränderliche Ausdrücke, die überall im Universum Gültigkeit hatten, stieß Einstein dieses Weltbild mit seiner **Speziellen Relativitätstheorie** vom Sockel. Vor allem mit dem Ausdruck **absolut** in physikalischen Zusammenhängen sollten wir daher von nun ab etwas umsichtiger sein, wie wir sogleich sehen werden.

Sehen wir uns zunächst den Baum in unserem Garten an:

Er ist 10 **Meter** hoch. Ist das seine absolute Größe? Im ersten Moment sagt man natürlich ja. Doch diese Angabe ist lediglich ein Vergleich! Und zwar mit dem **Urmeter**, ein seit 1791 in Paris aufbewahrter Maßstab aus einer Platin- Iridiumlegierung mit einer Länge von einem Vierzigmillionstel des Erdumfangs. Diese Strecke nennen wir einen Meter. Heute sind wir viel genauer und definieren 1 m als den 299 792 458sten Teil einer Lichtsekunde, wobei letztere die Strecke ist, die das Licht in 1 Sekunde (im Vakuum) zurück legt (nämlich 299 792 458 m).



Jetzt stellen wir uns einmal vor, heute Nacht würde etwas Seltsames geschehen:

Alles, was es im gesamtem Weltall gibt, alle Sterne, Bäume, Menschen, eben einfach alles schrumpft um den Faktor 100. Wenn wir dann morgen früh aufstehen, was würden wir bemerken? Nichts! Wir könnten nicht feststellen, dass unser Baum 100- mal kleiner als am Vortag ist, denn unser Maßstab ist ebenfalls geschrumpft.

Alle Menschen hätten ihre Größe behalten, genauso wie die Erde und der Mond, und Proxima Centauri wäre immer noch 4,2 Lichtjahre von uns entfernt! *

Wir stehen also vor einer unlösbaren Aufgabe, wenn wir die "absolute" Größe eines Gegenstandes feststellen wollen. Denn es gibt sie nicht. Im Universum ist nirgendwo ein Eichmaß zu finden, auf das man alle Längenangaben beziehen könnte. Jede Größenangabe ist relativ, sie bezieht sich immer auf einen Vergleichsmaßstab, der willkürlich gewählt wurde. Wir könnten genauso gut die Größe eines durchschnittlichen Menschen, eines Wasserstoffatoms, einer Kaffeetasse oder eines Baumes als Maßstab wählen, das alles ist erlaubt um eine Beschreibung der Größe vorzunehmen. Doch eine absolute Ausdehnung kann man nicht bestimmen. Später werden wir noch sehen, dass die Größe (Länge) eines Gegenstandes sogar davon abhängt, wie schnell wir uns bewegen!

** Anmerkung: Eine Möglichkeit gäbe es allerdings doch, die Schrumpfung des Weltalls nachzuweisen. Die Entfernung zum Mond beispielsweise ist zwar augenscheinlich nicht verändert. Wenn wir aber einen Laserstrahl auf ihn richten, dort reflektieren lassen und die Zeit messen, die er für den Hin- und Rückweg benötigt, so werden wir daraus eine um den Faktor Hundert verringerte Entfernung ableiten können. Die Lichtgeschwindigkeit wurde nämlich durch die Schrumpfung nicht verändert, sie ist eine Konstante. Da uns der Mond hundertmal näher ist, braucht auch das Licht nur ein Hundertstel der Zeit für diese Strecke.*

Absolute Zeit?

Und wie ist das nun mit der Zeit? Nach unserem "Empfinden" verläuft sie doch völlig gleichmäßig, tagaus, tagein, oder?

Unsere tägliche Arbeitszeit beträgt 8 Stunden. Das ist ein Drittel des Zeitraumes, den die Erde für eine Umdrehung benötigt. Auch diese Angabe ist relativ, sie bezieht sich eben auf die Geschwindigkeit der Erdumkehrung. Die Erdrotation ist aber, über längere Zeiträume gesehen, alles andere als konstant! Die Tageslänge nimmt nämlich z.B. durch den Einfluss des Mondes im Lauf der Zeit stetig weiter zu. Der Begriff **Stunde** als Zeitmaß ist ebenso willkürlich gewählt wie das Meter!

Stellen wir uns jetzt vor, ab morgen verlaufen alle Vorgänge im Universum nur noch 1/2-mal so schnell wie bisher. Wir hätten auch hier keine Möglichkeit nachzuweisen, dass ein Jahr nun doppelt so lange dauern würde, denn auch unsere Uhren würden langsamer gehen. Auch die Zeit ist relativ, es gibt keine absolute Zeit. Nirgendwo im Kosmos ist eine Uhr aufgehängt, die für jeden Ort dieselbe Zeit angibt. Genauso gut könnte alles 10-mal schneller ablaufen und wir würden im Zeitraffer durch die Gegend flitzen. Feststellen könnten wir das aber nicht, es wäre für uns nicht messbar.

Erschwerend kommt bei unserer Betrachtung hinzu, dass auch die Zeit durch Bewegung und sogar durch die Einwirkung von Gravitation beeinflusst wird! Die nächsten Kapitel zeigen, warum das so ist.

Absolute Geschwindigkeit?

Wenn man eine Geschwindigkeit misst, so ist das eine Angabe, wie viel Zeit für die Überwindung einer bestimmten Strecke benötigt wird. Mathematisch ausgedrückt ist Geschwindigkeit als

$$v = s/t$$

wobei **v** die Geschwindigkeit ist, **s** die Strecke und **t** die Zeit.

Da nun, wie wir oben gesehen haben, Zeit und Größe relative Begriffe sind, ist auch die Angabe einer Geschwindigkeit relativ!

Wenn wir mit dem Auto auf der Landstraße fahren, können wir unsere Geschwindigkeit bestimmen, indem wir die Zeit messen, die wir von einem bis zum nächsten Leitpfosten, oder von der einen zur anderen Stadt benötigen. Unsere Geschwindigkeit ist damit relativ zur Straße oder zu den Orten, sie ist bezogen auf den Bezugspunkt Erde. In unserem Alltag tun wir so, als wenn die Erde still stehen würde, obwohl wir es doch eigentlich besser wissen sollten...

Wir sitzen gemütlich im Garten unter unserem schönen Baum und genießen die Ruhe. Befinden wir uns wirklich in Ruhe? Nein, wir drehen uns mit 1667 [km/h] (1,3fache Schallgeschwindigkeit!) im Kreis, denn das ist die Geschwindigkeit der Erddrehung. Und die Erde fliegt mit 30 [km/s] um die Sonne. Die Sonne ihrerseits umläuft mit 220 [km/s] um das Zentrum der Milchstraße, und auch diese bewegt sich innerhalb der Lokalen Gruppe, einer Galaxienansammlung. Welches ist nun die "gültige", die "richtige" Geschwindigkeit? Jede für sich betrachtet ist natürlich korrekt, da sie sich nach einem Bezugspunkt richtet. Aber keine dieser Angaben macht eine Aussage über die Absolutgeschwindigkeit. Diese kann es auch nicht geben, weil wir im gesamten Kosmos keinen Bezugspunkt kennen, der eine Absolutgeschwindigkeit von 0 [km/h] hat. Damit stehen wir wieder vor einer unlösbaren Aufgabe, sollten wir eine absolute Geschwindigkeit bestimmen.

Als "Hausarbeit" können Sie jetzt einmal versuchen, die "wahre" Geschwindigkeit zu ermitteln, wenn Sie mit dem Auto mit 100 [km/h] unterwegs sind - unter Einbeziehung der vorstehend genannten Geschwindigkeiten von Erddrehung, Bahngeschwindigkeit, Sonnensystem- und Galaxienbewegung. Aber fragen Sie bitte nicht in Bezug auf was...

Stellen wir uns nun noch vor, wir würden mit einer Rakete antriebslos durch den Weltraum fliegen. Die Fenster sind komplett verschlossen, wie könnten wir jetzt unsere Geschwindigkeit ermitteln? Überhaupt nicht, denn wir haben keinen Bezugspunkt. Mit einem Blick aus dem nun aber freien Fenster aber sehen wir die Sterne vorüberziehen, sie können wir als Bezugspunkte für eine Geschwindigkeitsmessung verwenden (obwohl diese sich genau genommen auch selbst bewegen). Ein Beobachter, der sich in einem anderen bewegten Bezugssystem (Rakete, Planet) befindet, wird allerdings für unsere Bewegung einen völlig abweichenden Wert ermitteln.

Und wenn das Universum leer wäre, wir keine Sterne mehr sehen könnten? Dann gäbe es überhaupt keine Möglichkeit mehr, eine Geschwindigkeit zu ermitteln. Und damit gäbe es in einem solchen unwirtlichen Kosmos auch keine Bewegung mehr! Wir könnten mit unserer Rakete in einem solchen All "Gas geben" wie wir wollten - niemals könnten wir eine Geschwindigkeit bzw. Ortsveränderung feststellen.

Unter anderem hat Albert Einstein intensiv über diese Beziehungen nachgedacht und kondensierte seine Gedanken in der **Speziellen** (1905) und **Allgemeinen** (1915) **Relativitätstheorie**. Während die erstere sich mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, der Äquivalenz von Energie und Materie, der Zeit und bewegten Systemen beschäftigt, stellt die Allgemeine Relativitätstheorie eine Theorie der Gravitation und der Raum- Zeit- Struktur dar.

Einige der Zusammenhänge aus diesen Theorien sollen in den nächsten Kapiteln etwas näher betrachtet werden.

Das Licht

Kann man Licht wiegen?

Wechselnde Wirkungen

Ausbreitung

Konstanz

Kann man Licht wiegen?

Ohne **Licht** gäbe es wohl kein Leben auf der Erde und wir Menschen könnten heute nicht den Blick zum Firmament erheben und etwas über die faszinierenden Erscheinungen im Kosmos erfahren. Das Licht ist der Bote, welcher Informationen aus den tiefsten Regionen des Universums zu uns trägt. Fragen wir uns einmal, was ist das eigentlich, dieses Licht?

Vor Einstein war die wissenschaftliche Welt davon überzeugt, dass Licht einfach eine masselose elektromagnetische Schwingung ist. Heute wissen wir jedoch, dass nach der Quantentheorie Licht sowohl den Charakter einer Welle als auch eines Teilchens annehmen kann. Die kleinsten Einheiten des Lichts nennt man **Lichtquanten** oder **Photonen**, deren Energieinhalt nicht beliebig klein sein kann. Die Energie eines Photons ist abhängig von der Wellenlänge **Lambda** λ bzw. der Frequenz **f**:

$$E = h \times f = h \times c / \lambda$$

wobei **h** das Plancksche Wirkungsquantum ist ($h = 6,625 \times 10^{-34}$ [Js]), **c** ist die Lichtgeschwindigkeit ($\sim 3 \times 10^8$ [m/s]).

Wenn der Astronom von Licht spricht, dann meint er damit nicht nur das schmale Spektrum des sichtbaren Lichts. Für ihn sind alle nutzbaren Frequenzen der elektromagnetischen Wellen "Licht", brauchbare Informationsträger. So werden auch wir den Lichtbegriff auf dieser Homepage in diesem Sinne verwenden.

Photonen sind also Energiequanten, die kleinsten Einheiten einer elektromagnetischen Welle, die wir allerdings auch als Teilchen mit der **Ruhemasse** Null auffassen können, d.h. in einem Zustand völliger Ruhe weisen sie keine Masse auf. Nach der Speziellen Relativitätstheorie bzw. der **Äquivalenz von Energie und Materie** kann man einem Photon allerdings doch eine Masse **m**, besser gesagt einen Impuls **p** zuweisen:

$$E = mc^2 \text{ und } p = mc = hf/c$$

Hierzu ein Berechnungsbeispiel:

Wir berechnen die Energie eines Photons bei einer Frequenz von 10.000 [Hz] (10 [kHz])

$$E = h \cdot f = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ [Js]} \cdot 10000 \text{ [s]}^{-1} = 6,625 \cdot 10^{-30} \text{ [J]} \quad (1 \text{ [J]} = \text{[m}^2\text{kg s}^{-2}\text{)})$$

Einsteins Formel $E = mc^2$ umgestellt nach m :

$$m = E/c^2 = 6,625 \cdot 10^{-30} \text{ [m}^2\text{kgs}^{-2}\text{]} / 9 \cdot 10^{16} \text{ [m}^2\text{s}^{-2}\text{]} = 7.4 \cdot 10^{-47} \text{ [kg]}$$

Unserem Photon können wir demnach eine Masse zuordnen, wenn sie auch verschwindend gering ist. Prinzipiell kann man also das Licht wiegen!

Wenn die Astronomen von Licht sprechen, meinen sie damit nicht nur das sichtbare Licht. Vielmehr sprechen sie dann von *allen* Frequenzen der elektromagnetischen Wellen, angefangen von längsten Radiowellen über Infrarot, den sichtbaren Bereich, UV, bis hin zur härtesten Röntgen- und Gammastrahlung. Das allein schon aus dem Grund, weil heute fast alle Wellenlängen genutzt werden, um Informationen der weit entfernten kosmischen Objekte zu erhalten (z.B. Radio-, Röntgen- oder Gammaastronomie). Schließlich ist dieses Licht vorerst unsere einzige Möglichkeit, etwas über unerreichbar ferne Welten zu erfahren.

Nachstehender Skizze kann man das Spektrum der elektromagnetischen Wellen entnehmen:



Die Skala der elektromagnetischen Wellen

Die Wellenlängen erstrecken sich über einen riesigen Bereich, angefangen bei den sehr energiearmen Längstwellen (hier nicht dargestellt), bei denen eine Schwingung 100 [km] lang sein kann, bis hin zu den hochenergetischen Gammastrahlen mit einer Wellenlänge von z.B. nur 10^{-12} [m].

Eine elektromagnetische Welle kann man sich als ein Bündel von Photonen vorstellen, die alle in bestimmter Weise miteinander schwingen. Je schneller sie hin und her schwingen (je höher ihre Frequenz ist), umso größer ist ihr Energieinhalt. Infrarotwellen sind relativ langwellig und daher energiearm, Röntgenstrahlung ist sehr kurzellig und deshalb energiereich.

Wechselnde Wirkungen

Photonen haben, wie wir oben sahen, eine Ruhemasse von Null. Durch elektrische und magnetische Felder sind Photonen deshalb nicht ablenkbar, weil solche Felder ihrerseits durch *virtuelle* Photonen übertragen werden und diese Energiequanten nicht miteinander reagieren. Sie können aber mit anderen Teilchen wechselwirken, das geschieht dann durch **Absorption** oder **Emission**. Prallt ein Elektron mit einem Photon zusammen, absorbiert es diesen Strahlungsquant mit dem Energieinhalt $E = hf$ und gelangt dadurch auf ein höheres Energieniveau (d.h., es entfernt sich um einen bestimmten Betrag vom Atomkern)

Fällt das Elektron wieder auf sein vorheriges Niveau ab, emittiert es ein Strahlungsquant, ein Photon mit einer charakteristischen Wellenlänge (das emittierte Photon ist ein klein wenig energieärmer als das absorbierte, weil das Elektron diesen Differenzbetrag für sich "verbraucht"). So entstehen beispielsweise die Emissionslinien in einem Sternspektrum und verraten uns damit die Zusammensetzung der Sternatmosphäre (hierzu siehe auch [Spektralanalyse](#)).

Neben seiner Energie überträgt ein Photon auch seinen Impuls auf das Teilchen, es wird also ein gewisser **Strahlungsdruck** ausgeübt. Es ist eine pro Flächeneinheit ausgeübte Kraft, die umso größer ist, je mehr Quanten auf die betrachtete Fläche treffen und je größer deren Impuls hf/c ist. Herrscht ein thermodynamisches Gleichgewicht vor, wie z.B. bei einem [Schwarzen Strahler](#), so ist der Strahlungsdruck p nur von der Temperatur T abhängig:

$$p = aT^4/3$$

wobei a die so genannte Strahlungsdichtekonstante ist: $a = 7,581 \cdot 10^{-16} \text{ [J m}^{-3} \text{ K}^{-4}]$

Der Strahlungsdruck spielt eine gewichtige Rolle im Innern der Sterne, wo er einen hohen Anteil zum Gleichgewicht gegen die nach innen gerichtete Gravitation beiträgt, sowie bei der Bildung von neuen Sternen. Aufgrund des Strahlungsdruckes könnte man Licht auch als Raketenantrieb nutzen (in so genannten [Photonentriebwerken](#)) und auf diese Weise Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit erreichen. Allerdings ist der Lichtdruck höchst gering und die Beschleunigungs- und Bremsphasen würden unsäglich lange andauern. Eine technische Umsetzung erscheint daher kaum möglich.

Photonen können indessen nicht nur absorbiert werden, es gibt noch andere Wechselwirkungen des Lichts mit der Materie. So kann Licht auch **reflektiert** oder **gestreut** werden, an der Grenzfläche zweier optisch unterschiedlich dichter Substanzen tritt die **Lichtbrechung** in Erscheinung. Lichtwellen breiten sich normalerweise geradlinig aus. Trifft ein Lichtstrahl jedoch auf ein Hindernis (eine "Kante"), kann er **gebeugt** werden. Zwei Lichtwellen können sich überlagern und je nachdem, ob sich die Wellenberge oder -täler überschneiden, tritt Lichtverstärkung oder sogar völlige Auslöschung auf, dieses nennt man **Interferenz**.

Licht kann auch **abgelenkt** werden, wenn es nämlich starken Gravitationsfeldern ausgesetzt wird. Wo sich Photonen normalerweise geradlinig ausbreiten, müssen sie im Schwerfeld eines massiven Körpers den durch ihn hervorgerufenen Krümmungen der Raumzeit folgen. Auf diesem Effekt beruhen z.B. die [Gravitationslinsen](#), die uns Objekte zeigen können, die normalerweise hinter anderen Objekten verborgen sind.

Ausbreitung

Licht breitet sich mit einer Geschwindigkeit von **299 792,458 [km/s]** ($\sim 3 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$) im Vakuum aus. Es ist dabei völlig egal, ob wir eine Taschenlampe einschalten, die Flutlichtanlage eines Fußballplatzes, der Arzt sein Röntgengerät oder ob im Kosmos eine Supernova explodiert und dabei Licht aller möglichen Wellenlängen freisetzt. Jedes Mal fliegen die Photonen mit exakt derselben Geschwindigkeit durch die Gegend. Das gilt für **alle** elektromagnetischen Wellen!

Aber halt, es wurde ja oben behauptet, dass Photonen eine (scheinbare) Masse besitzen. Dann sollten sie ja eigentlich durch ein Medium, wie unsere Luft, oder Wasser oder kosmischen Staub gebremst werden (eine Art Reibungswiderstand). Genau das ist auch der Fall!

Luft raubt der Lichtgeschwindigkeit zum Beispiel rund 65 [km/s], und der Brechungsindex eines Glases beruht ebenfalls auf dieser Abbremsung. Der Brechungsindex n ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c dividiert durch die Geschwindigkeit im Medium c_1 , also :

$$n = c/c_1$$

daraus ergeben sich beispielsweise Werte für Glas von 1.5 und Wasser von 1.33.

Die physikalische Ursache für die "Bremswirkung" optisch dichter Medien liegt darin begründet, dass die Photonen kurzzeitig von den Elektronen der Atome des Mediums absorbiert werden. Die Elektronen gewinnen dadurch vorübergehend an Energie und gelangen auf ein höheres Energieniveau. Als bald nehmen sie jedoch ihren alten Zustand wieder ein und emittieren das Photon, dem nun aber ein wenig seines ursprünglichen Impulses fehlt (das Elektron verbrauchte diese Energie für seinen Sprung). Hierauf beruht z.B. die Lichtabschwächung in optischen Geräten: Je mehr Linsen ein System verwendet, umso schwächer wird die Abbildung.

Sobald das Photon emittiert wird, fliegt es mit seiner normalen Vakuumlichtgeschwindigkeit weiter, bis es vom nächsten Elektron absorbiert wird. So tritt nach und nach eine Verzögerung ein, wodurch die Geschwindigkeit der Lichtstrahlen in dichten Medien verringert wird.

Die Vakuumgeschwindigkeit des Lichts ist also die maximale Geschwindigkeit, mit welcher Energie oder Informationen (Signale) übertragen werden können. Man kann daher sagen:

Photonen überholen sich niemals und sie lassen sich auch von nichts überholen!

Sie haben im freien Raum immer dieselbe Geschwindigkeit, sie können nicht verzögern und auch nicht beschleunigen.

Nun könnte man vielleicht auf den "genialen" Gedanken kommen, wenn ein Astronaut mit beispielsweise halber Lichtgeschwindigkeit durch den Raum fliegt und von der Spitze seiner Rakete einen Lichtstrahl aussendet, dass dieser Strahl sich dann auch mit anderthalbfacher Lichtgeschwindigkeit durch den Raum bewegt. Das aber ist leider nicht der Fall, denn die Lichtgeschwindigkeit ist vollkommen unabhängig vom Standpunkt des Beobachters.

Konstanz

Die Lichtgeschwindigkeit ist stets konstant und von keiner Bewegung abhängig. Das ist eine der bedeutungsvollsten Erkenntnisse Einsteins. Würden wir z.B. einem Astronauten zusehen, wie er mit dem Irrsinnstempo $0,99 c$ auf die Erde zurast und die Geschwindigkeit seines Lichtstrahls messen, so kämen wir zu dem Ergebnis $299\,792,458$ [km/s]!

Selbst wenn er gar umdreht und von uns wegfliegt, den Lichtstrahl erneut in unsere Richtung schwenkt, messen wir wieder das gleiche! Auch er kann nichts anderes feststellen, wenn er die Geschwindigkeit seines Strahls bestimmt oder eines anderen, den wir ihm vielleicht entgegen senden.

Durch viele Experimente, unter anderem auch bei verschiedenen Weltraummissionen, wurde auch diese Aussage der Relativitätstheorie erfolgreich überprüft (wie viele andere auch, es ist die bestüberprüfte Theorie der Welt). Die Lichtgeschwindigkeit ist in keiner Weise abhängig von irgendeinem Bezugssystem. Im folgenden Abschnitt [Schneller als das Licht?](#) wird auf dieses merkwürdige Verhalten noch etwas ausführlicher eingegangen.

Schneller als das Licht?

[Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit](#)

[Tunneleffekt](#)

[Einstein und Geschwindigkeit](#)

[Einstein und Masse](#)

[Was noch bleibt](#)

[Kausalität](#)

[Tachyonen](#)

Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit

Im Jahre 1905 veröffentlichte Einstein seine *Spezielle Relativitätstheorie*. Unter anderem postulierte er darin die Lichtgeschwindigkeit c als absolute Obergrenze jeder Bewegung:

$$c = 299\,792\,458 \text{ [m/s]}$$

Doch wie es mit jeder Grenze so ist, liegt es wohl in der menschlichen Natur sie überwinden zu wollen. So wurden bislang viele Theorien aufgestellt und Experimente durchgeführt, um Einsteins Aussagen auf ihre Gültigkeit zu prüfen. Antrieb dieser Neugier ist sicher das Wissen der Menschen, dass für künftige Reisen zu den Sternen sehr hohe Geschwindigkeiten erforderlich sind. Denn trotz der enormen Erfolge von Astronomie und Kosmologie in den letzten hundert Jahren müssen wir "vor Ort" sein, wollen wir die noch vielen ungelösten Rätsel des Universums aufdecken. Als nur ein Beispiel für die noch vielen aufzudeckenden Geheimnisse mag hier die [Dunkle Materie](#) dienen. Wir können sie von der Erde aus nicht analysieren, da sie uns keine Informationen preisgibt. Ganz zu schweigen von der mysteriösen Dunklen Energie. Ergo müssen wir "hinaus". Sehen wir also, ob sich Einstein überlisten lässt!

Es gibt eine einfache Methode, etwas mit Überlichtgeschwindigkeit zu bewegen. Stellen Sie sich abends in die Landschaft und warten, bis der Mond gerade aufgeht. Nun drehen Sie sich einmal um sich selbst. Das sollte in 2 Sekunden passiert sein. Damit würde der rund 385 000 [km] entfernte Mond mit einer Geschwindigkeit von etwa 1,2 Millionen [km/s] um Ihren Kopf kreisen, das ist mehr als 4fache Lichtgeschwindigkeit!

Was ist hier faul? Natürlich rotiert der Mond nicht um unseren Kopf. Wir können nicht unsere (Rotations-) Geschwindigkeit mit der Geschwindigkeit des Mondes vergleichen, da wir uns an verschiedenen Orten befinden. Der Mond ist in einer anderen Umgebung, einem anderen Bezugssystem, und da bewegt er sich *nicht* mit mehrfacher Lichtgeschwindigkeit.

Machen wir ein anderes Experiment mit dem Mond. Uns steht ein starker Laserpointer zur Verfügung, den wir in unserer Hand halten und auf den Mond richten.

Nun machen wir einen schnellen Schwenk und lassen den Strahl von der einen zur anderen Seite des Mondes wandern. Wenn der Lichtstrahl beispielsweise 10 [cm] hinter unserer Hand austritt, und wir einen Schwenk von 2 [cm] in 1/10 [s] machen, so rast der Laser immerhin mit noch rund 2,5facher Lichtgeschwindigkeit über die Mondoberfläche.

Auch dieses ist leider nur ein plumper Versuch, Einstein zu überlisten! Aus unserem Laserpointer fliegt Photon für Photon, hübsch brav nacheinander und jedes mit Lichtgeschwindigkeit. Nur die Orte, an denen sie auf dem Mond auftreffen, bewegen sich scheinbar mit Überlichtgeschwindigkeit über die Oberfläche. Das ist auch nicht verboten, da es sich nicht um eine tatsächliche Bewegung handelt.

Tunneleffekt

Die Sensation war perfekt, als im Jahr 1993 Prof. Günter Nimtz von der Universität



Köln in einem Versuch Informationen mit 4,7facher Lichtgeschwindigkeit transportiert hat. Dazu verwendete er einen Hohlleiter, ein rechteckiges Metallrohr, durch welches er Mikrowellen leitete. In der Mitte des Hohlleiters befand sich ein verengtes Mittelstück (Bild). Zu ihrer Ausbreitung benötigten Mikrowellen wie alle anderen elektromagnetischen Wellen einen bestimmten Mindestraum, der Mittelteil war allerdings so bemessen, dass eigentlich keine Welle hindurch konnte. Nimtz verglich das Signal, das trotzdem aus dem Hohlleiter austrat mit einem außen laufenden Referenzsignal und ermittelte so 4,7fache Lichtgeschwindigkeit. Er hatte später sogar die Mikrowellen mit der 40. Symphonie von Mozart überlagert und sie durch den Hohlleiter gesendet.



Was ist hier passiert? Wenn man einen Ball mit zu geringer Geschwindigkeit einen Hügel hinaufrollt, so erreicht er nur eine bestimmte Höhe und rollt dann zurück. Teilchen der Quantenwelt, zum Beispiel Photonen, können aber trotz zu geringer Geschwindigkeit (besser gesagt: zu geringer Energie, denn Photonen haben stets die gleiche Geschwindigkeit c) auf die andere Seite des "Hügels" (der Barriere) gelangen, indem sie ihn einfach wie durch einen Tunnel durchdringen. Diese Erscheinung nennt man daher **Tunneleffekt**. Genau darauf beruht oben genanntes Experiment: Einige Teilchen der Wellen durchtunneln den zu engen mittleren Hohlleiter, und das mit mehrfacher Lichtgeschwindigkeit. Was sich genau im "Tunnel" abspielt, wie und wie schnell die Teilchen hindurchgehen, entzieht sich völlig unseren Blicken und unserer Kenntnis. Nur eines scheint sicher: Für die Teilchen existiert im Tunnel keine Zeit.

Nun erhebt sich die Frage, ob man diesen Effekt zur Übertragung von Informationen nutzen könnte, um beispielsweise den Funkverkehr zukünftiger Raumschiffe zu beschleunigen. Aber das geht leider nicht, denn es lässt sich nicht bestimmen, welches Teilchen durch den Tunnel geht und wie viele es schaffen. Die Anzahl tunnelnder Teilchen nimmt bei Verdopplung der Tunnellänge quadratisch ab (man nennt dies **Dämpfung**).

Aus diesem Grund wurde aus Mozarts 40. Symphonie am Ausgang des Tunnels lediglich ein verstümmeltes Geräusch. Zur Übertragung von Informationen im makroskopischen Bereich ist dieses Verfahren also nicht geeignet, zumal man die getunnelten Signale zuerst wieder extrem verstärken müsste, was wiederum mit einer zeitlichen Einbuße verbunden wäre. In mikroskopischen Dimensionen dagegen kommt der Tunneleffekt durchaus zur Anwendung, wie z.B. in der [Tunnel diode](#) oder dem [Tunnelrastermikroskop](#).

An dieser Stelle schweifen wir kurz zur Sonne ab: Ohne den Tunneleffekt würde sie nämlich nicht scheinen! Die Energie in Form von sichtbarem Licht, Wärme- oder UV-Strahlung bezieht sie aus der [Kernverschmelzung](#) zweier Wasserstoffatome (Protonen). Bei den im Sonneninnern herrschenden Temperaturen sind aber normalerweise die elektrischen Abstoßungskräfte der positiv geladenen Protonen so groß, dass eine Kernfusion eigentlich nicht stattfinden kann. Die gleichnamige Ladung stellt für das einzelne Proton eine Energiebarriere dar, die es nicht überwinden kann. Doch hin und wieder gelingt eine Durchtunnelung und die Kernverschmelzung findet statt. Nur aufgrund dieses relativ seltenen quantenmechanischen Effektes scheint unsere Sonne, wie auch die meisten anderen Sterne!

Einstein und Geschwindigkeit

Doch zurück zu der Frage, ob Reisen im Kosmos mit oder sogar mit mehr als der Lichtgeschwindigkeit möglich sind. Wir kommen nicht umhin, ein wenig Einsteins Theorien zu bemühen, um zu einer Antwort zu gelangen.



Stellen wir uns vor, wir könnten eine Rakete mit einer Geschwindigkeit von $w = 250\,000$ [km/s] durchs All sausen lassen. Nun benutzen wir dieselbe als Startplattform für eine weitere Rakete, die ebenfalls mit $u = 250\,000$ [km/s] in gleicher Richtung

davonfliegt. Sie hätte dann nach einfacher Rechnung aus unserer Sicht als ruhende Beobachter auf der Erde damit eine Endgeschwindigkeit von $500\,000$ [km/s], wäre damit schneller als jedes Photon!

$$v = u + w$$

$$v = 250\,000 + 250\,000 = 500\,000 \text{ [km/s]}$$

Stimmt das? Diese Rechnungsmethode ist annähernd richtig bei niedrigen Geschwindigkeiten, wie sie in unserer Alltagswelt vorkommen. In hohen, relativistischen Bereichen muss man allerdings auf Einsteins Lösung zurückgreifen, weil man verschieden schnell bewegte Bezugssysteme betrachtet und folgende Gleichung anwenden:

$$v = \frac{u + w}{1 + uw/c^2}$$

wobei c für die Lichtgeschwindigkeit, hier rund $300\,000$ [km/s], steht.

$$v = \frac{250\,000 + 250\,000}{1 + 250\,000 \cdot 250\,000 / 300\,000^2}$$

Als Ergebnis erhalten wir nun: $v = 295\,082$ [km/s], ein Wert unterhalb der Lichtgeschwindigkeit. Wie man sieht, nutzt uns auch dieser "geniale" Trick gar nichts, um schneller als das Licht durch den Kosmos zu reisen.

Vielleicht könnte das Raumschiff wenigstens auf seiner Reise zurück zur Erde mit der oben genannten Geschwindigkeit w von unterwegs bereits einen Bericht per Funk an uns übermitteln? Funkwellen breiten sich ja ebenfalls mit c aus und sollten demnach mit $w + c = 550\,000$ [km/s] bei uns eintreffen. Dass man so nicht rechnen kann, wissen wir jetzt, daher benutzen wir nochmals Einsteins Beziehung:

$$v = \frac{c + w}{1 + cw/c^2} = \frac{c + w}{1/c (c + w)} = \frac{c(c + w)}{(c + w)} = c$$

Das Funksignal kommt mit exakt Lichtgeschwindigkeit bei uns an! Und das gilt für alle Beobachter im Universum, egal ob sie sich in bewegten oder ruhenden Bezugssystemen befinden, die Lichtquelle bewegt oder ruhend ist. Das Licht breitet sich immer mit der für jeden Beobachter gleichen Geschwindigkeit c aus.

So wie es jetzt scheint haben wir keine Chance, jemals schneller als das Licht zu reisen und wohl auch nicht mit exakt Lichtgeschwindigkeit. Auch Informationen lassen sich nicht schneller verbreiten. Aber vielleicht gibt es ja eines Tages Antriebe, die uns beispielsweise eine Reise mit 99,9999... % der Lichtgeschwindigkeit erlauben. Wir starten also zu einer Expedition zur Andromedagalaxie, die rund 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Dabei kommt uns Einsteins [Zeitdilatation](#) gerade recht, lässt sie doch während der Reise unsere Uhren extrem langsamer gehen als diejenigen auf der Erde. Wenn wir dann nach vielleicht 30 Jahren zurückkehren, um stolz unsere Ergebnisse zu präsentieren, kennt uns aber leider niemand mehr. Nur in einem uralten Buch findet sich ein kurzer Hinweis, dass irgendwelche verrückten Typen vor 5 Millionen Jahren sich in ein halsbrecherisches Abenteuer mit einem schnellen Raumschiff gestürzt hätten, man aber nie mehr von ihnen gehört hat...

Man sieht an diesem Beispiel, dass selbst bei gegebenen technischen Möglichkeiten Reisen mit hohen Geschwindigkeiten sinnlos werden, weil man seine Erkenntnisse mit niemandem mehr teilen kann. Und entfernte Reiseziele mit den heute realisierbaren Geschwindigkeiten sind außerhalb jeder Reichweite, weil die menschliche Lebensdauer allzu begrenzt ist.

Einstein und Masse

Es gibt bei schnellen Reisen mit relativistischen Geschwindigkeiten noch ein weiteres Problem:

Alle Energie, die man zur Beschleunigung aufwendet, wird als kinetische Energie gespeichert und führt letztendlich zu einer Massezunahme* der Rakete. Jeder kennt die berühmte Formel

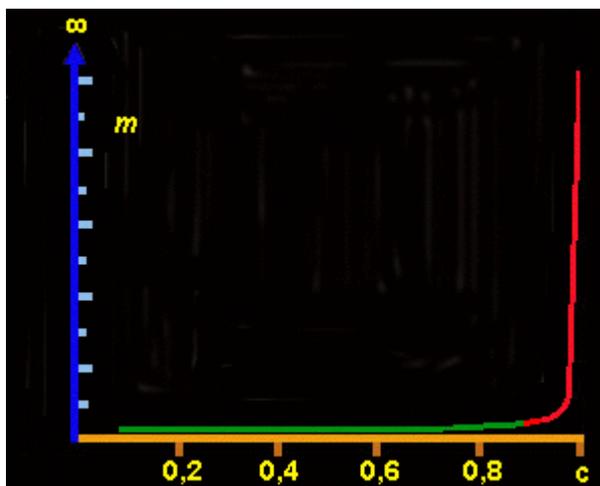
$$E = mc^2$$

welche die Äquivalenz von Energie und Masse beschreibt. Das kleine unscheinbare m in dieser Formel muss man aber einmal etwas näher betrachten. Würde es nur die unbewegte Ruhemasse m_0 beschreiben, so wäre es tatsächlich recht harmlos, aber m beschreibt die Gesamtmasse eines bewegten Systems und enthält daher zusätzlich den relativistischen Faktor **Gamma** γ :

$$E = \gamma m_0 c^2 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Auch dieser unangenehme Gammafaktor hindert uns daran, jemals die Lichtgeschwindigkeit zu erreichen.

In nebenstehendem Diagramm sieht man, wie die Masse bei Zunahme der Geschwindigkeit anwächst. Zuerst verläuft alles noch völlig normal, die aufgebrauchte Energie wird zum größten Teil in eine Geschwindigkeitszunahme umgewandelt. Ab etwa 90 % der Lichtgeschwindigkeit wird sich aber die zugeführte Energie immer mehr als Anwachsen der Masse äußern (roter Kurvenbereich), die Kurve verläuft umso steiler, je mehr man sich c nähert. Bei exakt Lichtgeschwindigkeit ist die scheinbare Masse unserer Rakete dann unendlich groß (im Diagramm nicht darstellbar) und wir müssten unendlich viel Energie dazu aufwenden. Dass dieses nicht funktioniert, leuchtet sofort ein. Es ist einer der Hauptgründe, warum kein massebehafteter Körper jemals mit Lichtgeschwindigkeit fliegen kann, nicht einmal ein einzelnes Elektron.



* Die Massezunahme der Rakete sollte man nicht zu wörtlich nehmen. In der Realität kann die Masse nicht einfach mehr werden, vielmehr wird die zugeführte Antriebsenergie als kinetische Energie im bewegten System gespeichert. Wenn ein Auto mit 150 [km/h] über die Autobahn fährt, so wird es auch nicht "schwerer", seine Masse nimmt nicht zu. So aber ein Brückenpfeiler seinem Vorwärtsdrang ein Ende setzt, wird schlagartig und deutlich sichtbar die gespeicherte kinetische Energie freigesetzt und in Verformungs- und Wärmeenergie umgewandelt. Einsteins Formel besagt lediglich, dass man die gespeicherte kinetische Energie auch als Masse ausdrücken kann.

Was noch bleibt

Was also kann man noch unternehmen, um den Weltraum zu erobern? Man könnte sich zum Beispiel waghalsig in ein [Schwarzes Loch](#) stürzen und darauf vertrauen, dass es mit einem anderen Ort im Kosmos durch eine Art Verbindungstunnel kommuniziert. Unser Vertrauen bekommt allerdings spätestens beim Eintauchen in den Ereignishorizont einen

tiefen Knacks, weil wir von den Gezeitenkräften auseinander gerissen und auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden (das ist hier möglich, weil die Raumzeit nicht mehr in der uns bekannten Form existiert). Blicke noch die Möglichkeit ein künstliches Wurmloch zu erschaffen. Aber dazu fehlt uns *exotische Materie* mit antigravitativer Wirkung bzw. *negative Energie*, die hierzu unbedingt erforderlich wäre. Vielleicht ist es menschlichen Generationen in ferner Zukunft vorbehalten, hier eine Lösung zu finden oder gar den Warp- Antrieb zu entwickeln (Näheres hierzu siehe [Wurmlöcher](#)). Allerdings werden sie dann ein noch gewaltigeres Problem als die bisher beschriebenen zu lösen haben, nämlich das der Kausalität.

Kausalität

Unter der Kausalität versteht man, dass es in der Natur keine Wirkung ohne Ursache geben kann. Wenn Sie einen plötzlichen Schmerz im Bein verspüren, hat Sie vielleicht ein Hund gebissen oder Sie haben eine Thrombose. In jedem Fall hat der Schmerz eine Ursache. Auch eine Supernovaexplosion hat eine Ursache, im Innern des Sterns gibt es keine Kernfusionen mehr und deshalb kollabiert das Zentrum.

Wenn wir uns jedoch mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen könnten, würden wir uns damit auch in der Zeit bewegen, was unlösbare Paradoxien verursacht. Im folgenden Beispiel nehmen wir an, dass wir uns beliebig schnell bewegen können.

Sie sind ein Bösewicht und wollen in New York einen Mord um 9⁰⁰ Uhr begehen. Der Polizei können Sie aber beweisen, dass Sie exakt zu diesem Zeitpunkt in Ihrem Büro in Berlin waren. Man kann Ihnen also nichts anhaben, denn diese Situation entspricht der Kausalität.

Aber Sie können sich ja schneller als das Licht bewegen! Also fliegen Sie nach New York, begehen den Mord um 9⁰⁰ Uhr und sind zurück im Büro, bevor der Mord geschieht. Schlimmer noch, weil Sie es besonders eilig haben, benutzen Sie auch eine Waffe mit überlichtschnellen Geschossen. Das bedeutet, dass Ihr armes Opfer bereits tot ist, noch bevor Sie abgedrückt haben! Die Kausalität ist damit empfindlich verletzt. Sie sitzen friedlich im Büro, in New York fällt jemand tot um noch bevor sich ein Schuss löst. Das ist bereits konfus genug, aber man kann diese Geschichte auch noch ein wenig auf die Spitze treiben:

Angenommen, das arme Opfer kennt sich ebenfalls in der Überlichttechnologie aus. Während es stirbt, sendet es schnell noch eine Nachricht an seine Freundin mit Ihrer Beschreibung und dem Hinweis, wann und wo Sie den Mord begehen. Die Geschichte sieht dann so aus: Sie fliegen nach New York und dort schlägt Ihnen eine Frau mit einem Stock auf den Kopf. Aber warum? Sie hat ja keinen Grund dazu, denn Sie haben noch keinen Mord begangen. Und damit hatte das Opfer auch keinen Grund, seiner Freundin eine Nachricht zu senden. Was wollte die Freundin überhaupt da, und warum liegen Sie ohnmächtig in New York, anstatt in ihrem Büro zu arbeiten?

Man erkennt leicht die Paradoxien dieser Situation, gegen die Kausalität wird recht übel verstoßen! Es können Ereignisse eintreten, die sich selbst verhindern. Doch auch wenn Einsteins Gesetze und die Kausalität Überlichtgeschwindigkeiten prinzipiell ausschließen muss das nicht bedeuten, dass nicht doch eines fernen Tages "Highspeed- Reisen" zu fernen Sternen machbar sind. Die künftigen Generationen haben bis dahin allerdings einige schwerwiegende Probleme zu lösen.

Tachyonen

Tachyonen ("*Schnelle Teilchen*") wurden erstmalig 1967 vom Physiker **Gary Feinberg** in den *Physical Reviews* erwähnt. Er zeigte auf, dass prinzipiell überlichtschnelle Teilchen nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie stehen.

Generell lässt sich jedes Teilchen in eine der 3 folgenden Gruppen einstufen:

- **Luxonen**, das sind Teilchen, die sich stets nur mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Also ruhemasselose Teilchen wie *Photon* oder *Graviton*.
- **Tardyonen**, hier finden wir alle Teilchen, die sich mit weniger als Lichtgeschwindigkeit bewegen. Hier finden wir somit alle massebehafteten Teilchen wie *Elektron*, *Proton* usw.
- **Tachyonen**. Teilchen, die sich stets schneller als das Licht bewegen.

Tachyonen könnten also nur jenseits der von Einstein gesetzten Lichtmauer existieren. Sie sind immer schneller als das Licht, sie könnten diese Grenze nicht unterschreiten, genauso wie Photonen sie nicht zu überschreiten in der Lage sind. Diese Welt ist uns nicht zugänglich, sie liegt außerhalb unserer *Weltlinien*. Jedoch könnte man sich in einer solchen Welt mit beliebiger Überlichtgeschwindigkeit bewegen. Allerdings wäre der Eintrittspreis ein hoher: Man hätte eine *imaginäre* Energie bzw. Masse. Der Begriff imaginär kommt aus der Mathematik:

*Zieht man die Quadratwurzel aus einer Zahl, so ergibt sie normalerweise mit sich selbst multipliziert wieder die Quadratwurzel. Das aber geht nicht z.B. mit der Wurzel aus -1. Denn -1 zum Quadrat ergibt +1. Die Wurzel aus -1 ist eine **imaginäre Zahl**. Wenn man also die Ruhemasse eines Tachyons zum Quadrat erhebt, erhält man eine negative Zahl!*

Je schneller sich Tachyonen bewegen, umso mehr nimmt ihre Energie ab, um bei unendlich hoher Geschwindigkeit Null zu werden. Tachyonen sind nicht mit der Kausalität vereinbar, wie wir in unserer Mordgeschichte sahen. Sie würden sich von der Zukunft in die Vergangenheit bewegen, ihre Zeit wäre also rückläufig. Solche Teilchen sind rein hypothetisch und es gibt bislang nicht einen einzigen Hinweis darauf, dass ihre Existenz ernst zu nehmen wäre. Daher scheiden auch sie als "Antriebsart" künftiger Raumfahrzeuge aus und wir haben nun leider keine weitere Möglichkeit mehr, schneller als das Licht zu sein...

Die Gravitation

Eigenschaften

Krümmung der Raumzeit

Gravitationslinsen

Beschleunigung und Gravitation

Gravitationsquanten

Gravitationswellen

Antigravitation

Eigenschaften

Gravitation ist eine der vier Grundkräfte der Natur. Auf diese Kräfte lassen sich alle Vorgänge, ob im kosmischen oder atomaren Maßstab, zurückführen. Sie lauten:

1. Die **starke Kraft** bzw. Wechselwirkung, sie hält die Kernteilchen im Atom zusammen und auch die Quarks in einem Proton oder Neutron. Sie wirkt nur auf kürzesten Entfernungen.
2. **Elektromagnetische Kraft**, sie ist etwa 100mal schwächer als die starke Wechselwirkung. Sie bindet die Elektronen an den Atomkern.
3. Die **schwache Wechselwirkung** ist verantwortlich für die Umwandlung eines Quarks in ein anderes oder die Umwandlung eines Protons in ein Neutron und umgekehrt. Sie ist 1000mal schwächer als die elektromagnetische Kraft.
4. Die **Gravitation**, sie ist etwa 10^{35} - mal schwächer als die schwache Wechselwirkung! Doch ist sie die bestimmende Kraft zwischen Massen und wirkt über große Distanzen.

Wie man leicht erkennen kann, ist die Gravitation eine ausgeprägt schwache Kraft. Im Bereich der Atome spielt sie praktisch keine Rolle, denn hier sind die anderen Wechselwirkungen zu Hause. Auch in unserem Alltagsleben spielt sie kaum eine Rolle. Zwar verleiht sie uns durch die Masse der Erde ein **Gewicht**, wir spüren jedoch nicht die Gravitation, die von unserem Auto oder Haus ausgeht, nicht mal die eines ganzen Gebirges. Doch in kosmischen Größenordnungen ist sie unbestreitbar die vorherrschende Macht. Sie lässt Sterne entstehen und erstrahlen, sie schafft Planeten, wodurch erst das Leben ermöglicht wird. Sie kann sich zu unvorstellbar hohen Werten aufaddieren, wenn sie aus massereichen Sternen ungeheuer kompakte Objekte wie Neutronensterne erschafft. Sie setzt sich selbst die Krone auf, wenn sie im Zentrum einer Galaxie ein "Schwerkraftmonster" von milliardenfacher Sonnenmasse, ein Schwarzes Loch, entstehen lässt. Dann hat sie ihre Macht endgültig bewiesen, es ist ihr Sieg über die Materie. Von dieser Macht ist in den vorliegenden Kapiteln die Rede.

Gravitation ist seit **Isaac Newton** eine Massenanziehung, die von jeglicher Materie ausgeht. Zwei Massen m_1 und m_2 ziehen sich mit einer Kraft F an, die proportional den beiden Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihres Abstandes ist:

$$F = G m_1 m_2 / r^2$$

In diesem [Newtonschen Gravitationsgesetz](#) ist G die Gravitationskonstante

($G = 6.67259 \cdot 10^{-11} [\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}]$), deren Wert man nur experimentell ermitteln kann.

Gravitation wirkt immer anziehend, es gibt keine abstoßenden Wirkungen, obwohl eine Ausnahme existiert: Die [Dunkle Energie](#). Jede Masse ist von einem **Gravitationsfeld** umgeben, in welchem man an jeder Stelle im Abstand r eine Feldstärke G zuordnen kann:

$$G = m / r^2$$

Unter dem **Gravitationspotential** U versteht man die Arbeit, die von der Gravitationskraft der Masse geleistet werden muss, um einen Gegenstand aus unendlicher Entfernung bis zur betrachteten Stelle zu ziehen:

$$U = -G m / r$$

Das negative Vorzeichen weist darauf hin, dass bei der Annäherung (Gravitations-) Energie freigesetzt wird.

Krümmung der Raumzeit

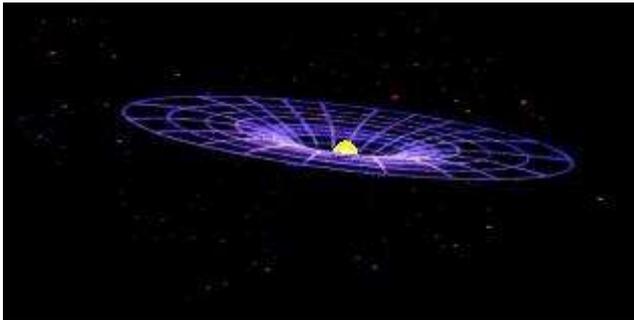
Seit Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie hat sich unser Bild der Gravitation erheblich gewandelt. Das Newtonsche Gravitationsgesetz gilt heute nur noch in Näherung, wenn man schwache Gravitationsfelder betrachtet und die Körper sich langsam im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit bewegen. Einstein hat in seiner Arbeit beschrieben, dass jeder Körper die ihn umgebende Raumzeit um sich herum krümmt, und zwar in Abhängigkeit von seiner Masse mehr oder weniger stark. Gravitation ist also nicht mehr die Newtonsche Kraft, die zwischen zwei Körpern ausgeübt wird, sondern die Stärke der Raumzeitkrümmung:

**Die Masse sagt dem Raum, wie er sich zu krümmen hat,
und die Krümmung sagt der Masse, wie sie sich zu bewegen hat.**

Wie aber kann man sich diese Krümmung nun überhaupt vorstellen?

In einem vielzitierten Beispiel stellt man sich die vierdimensionale Raumzeit auf zwei Dimensionen zusammengequetscht vor, und zwar in Form eines gespannten Gummituches. Hierzu lässt man einfach zwei der drei Raumdimensionen wegfällen. In der Realität können wir uns leider keine brauchbare Vorstellung der Raumzeit machen. Aber man kann sich die 3 Raumdimensionen auf eine einzige zusammengepresst denken, und nimmt als zweite Dimension die Zeit. Legt man nun auf das Tuch einen Gegenstand, beispielsweise eine Stahlkugel, so wird es durch das Gewicht, oder besser gesagt die Masse der Kugel nach unten ausgebeult. Lässt man nun schräg vom Rand des Tuches kleine Glaskugeln laufen, so werden sie sich in kreisenden Bewegungen spiralförmig der Stahlkugel in der Mitte nähern.

Genau so kann man sich die Krümmung der Raumzeit durch massive Körper, wie etwa einem Stern, verdeutlichen.



Die auf zwei Dimensionen reduzierte, vierdimensionale Raumzeit wird durch massive Körper gekrümmt. Als Beispiel dient ein gespanntes Tuch, welches durch ein darauf gelegtes Gewicht nach unten ausgebeult wird. Planeten, Sterne, Schwarze Löcher und erst recht Galaxien krümmen durch ihre Masse die Raumzeit.

In unserem Beispiel könnten die kleinen Glaskugeln Planeten darstellen, welche einen Stern umkreisen. Durch die Raumkrümmung werden sie zu kreisenden Bewegungen um den Zentralkörper gezwungen, wobei ihre Geschwindigkeit gerade so groß ist, dass sie nicht in die "Raumbeule" fallen, sich aber auch nicht entfernen können. Die Bewegung der umkreisenden Planeten setzt sich nämlich aus zwei Komponenten zusammen: Dem freien Fall zum Zentralkörper hin und einer dieser Bewegung entgegengesetzten Fliehkraft. Die Bewegung der kleinen "Glaskugelplaneten" entspricht einem fortwährenden freien Fall. Fallen ist die natürlichste Art der Bewegung von Objekten. Wenn eine Rakete durch den Weltraum fliegt, ist das nichts anderes als ein (gerichtetes) Fallen. Auch wir auf der Erde verwenden die meiste Zeit unseres Lebens mit Fallen, manchmal wird dies unsanft in bösartiger Absicht durch den festen Untergrund abgebremst.

In der Nähe sehr massiver Körper, wie [Schwarzen Löchern](#), ist die Verformung des Raums durch die ungeheure Gravitation extrem hoch. Ein Schwarzes Loch krümmt in einem bestimmten Abstand von seinem Zentrum ("Ereignishorizont") die Raumzeit vollständig um sich herum. Es entsteht ein kugelförmiges Gebilde, mit welchem sich das Loch nun vollkommen vom restlichen Universum abschottet.

Wenn wir in unserem obigen Beispiel die Glaskugeln durch Licht ersetzen, so muss auch dieses den Krümmungen der Raumzeit folgen. Dieses Phänomen lässt sich z.B. beobachten, wenn während einer Sonnenfinsternis ein scheinbar sehr nah am Sonnenrand stehender Stern betrachtet wird. Er hat dann eine etwas andere Position, als wenn wir ihn nachts betrachten. Das von ihm ausgestrahlte Licht wird durch die von der Sonne verursachte Raumzeitkrümmung abgelenkt, der Lichtstrahl wird regelrecht "verbogen". Das war eine der ersten Voraussagen Einsteins, die nach Erscheinen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie durch zwei eigens hierzu durchgeführte Expeditionen im März 1919 bewiesen wurde.

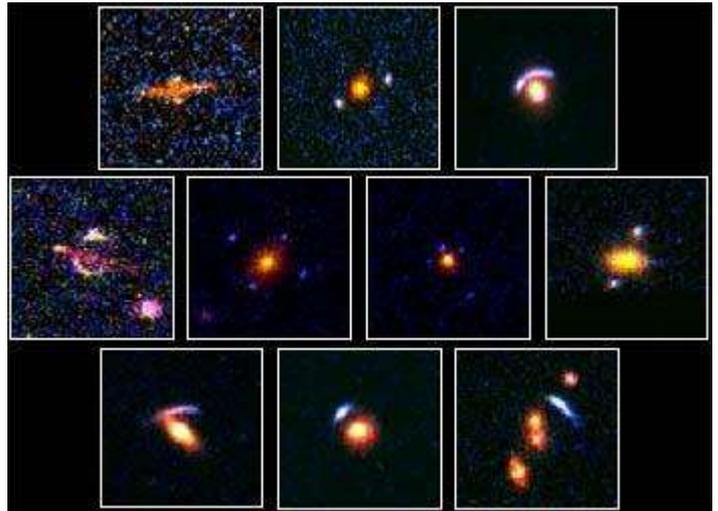
Gravitationslinsen

Einstein hat in seinen Arbeiten auch vorausgesagt, dass sehr massive Objekte eine Art Linsenwirkung haben müssen. Das könnten Schwarze Löcher oder Galaxien sein. Durch ihre starken Gravitationskräfte bremsen sie das Licht etwas ein, so als wenn es in ein optisch dichtes Medium (z.B. eine Linse) eintritt. Mit dieser Linsenwirkung sollte das Licht entfernter, hinter den großen Massen liegender Objekte so abgelenkt werden, dass man ein oder mehrere Abbilder vergrößert erkennen kann.

Die Projektion kann sogar so verzerrt werden, dass sich ein ringförmiges Bild ergibt (so genannte "**Einsteinringe**"). Das Weltraumteleskop Hubble hat nun bereits viele solcher Gravitationslinsen entdeckt, womit wieder einmal mehr die Relativitätstheorie bestätigt wurde.

Eine Auswahl der vom Hubble-Teleskop entdeckten Gravitationslinsen. Das massive Objekt, meist eine Galaxie, steht dabei jeweils im Zentrum des Bildes, während Abbildungen des entfernten Objektes um es herum angeordnet sind.

Mit freundlicher Genehmigung STScI, Kavan Ratnatunga (Carnegie Mellon Univ.) und [NASA](#)



Heute benutzt man die Erscheinung der Gravitationslinsen auch, um massive Körper der **Dunklen Materie** im Halo der Milchstraße nachzuweisen. Dies ist tatsächlich inzwischen gelungen. Dabei

hat man es allerdings nicht mit den oben gezeigten Gravitationslinsen zu tun, sondern mit dem so genannten **Microlensing**-Effekt. Hierbei erzeugt ein massiver, sonst unsichtbarer Körper beim Vorüberziehen vor einem Hintergrundstern durch den Effekt nur eine Helligkeitsverstärkung des Sterns.

Beschleunigung und Gravitation

So wie uns Einstein vor Augen führte, dass Energie und Materie das selbe sind, überlegte er auch, dass man die Wirkung der Gravitation nicht von der Wirkung einer beschleunigten Bewegung unterscheiden kann. Ein im Kosmos umherfliegender Astronaut kann mit *keinem* Mittel feststellen, ob er sich nun bewegt, oder ob er stillsteht und der ganze übrige Kosmos an ihm vorbeizieht. Verschließen wir seine Sichtluken gar, kann er nicht mal mehr eine Bewegung feststellen. Denn nun hat er keinen Bezugspunkt mehr, an dem er sich orientieren könnte.

Wenn wir einen Aufzug benutzen, spüren wir die Beschleunigung als Gravitation. Bei der Aufwärtsfahrt werden wir gegen den Boden gedrückt und wir werden scheinbar etwas schwerer. Geht die Fahrt abwärts, nimmt die scheinbare Gravitation etwas ab und der Mensch fühlt sich leichter. Bei höheren Beschleunigungen bzw. Verzögerungen wie im Auto oder Flugzeug sind diese Effekte, die jeder kennt, noch verstärkt.

Ein Astronaut, dessen Rakete mit $9,81 \text{ [m/s]}$ (das ist die **Erdbeschleunigung**) beschleunigt, spürt die gleiche "Anziehungskraft" seines Bodens wie wir auf der Erde. Wenn seine Rakete vollkommen geschlossen ist, kann er nicht feststellen, ob er sich in Ruhe auf der Erde befindet oder mit konstanter Beschleunigung durchs Weltall fliegt.

Gravitation beeinflusst sogar die Zeit (näheres hierzu siehe auch **Schwarze Löcher - Horizonte**). In der Speziellen Relativitätstheorie zeigt Einstein, dass die Zeit bei hohen Geschwindigkeiten deutlich verlangsamt wird. Die Allgemeine Relativitätstheorie beweist, dass die Zeit auch durch Gravitationsfelder verlangsamt wird. Umso mehr, je stärker die Gravitation ist. Aus diesem Grund geht eine Uhr an der Kirchturmspitze oder auf einem Berg etwas schneller als eine Uhr auf dem Boden. Das lässt sich mit hochpräzisen Uhren einwandfrei nachweisen.

Deshalb wird auch eine Atomuhr an der Decke unserer beschleunigenden Rakete etwas schneller laufen als eine auf dem Boden, weil hier "unten" die (scheinbare) Gravitation stärker ist.

Nicht zuletzt wird auch noch das Licht genau wie bei der "echten" durch die "Beschleunigungs- Gravitation" beeinflusst. Sendet man einen Lichtstrahl seitlich quer durch die (beschleunigte) Rakete, so kommt er auf der anderen Seite etwas tiefer an, weil er durch die Gravitation nach unten gebogen wird.

Wichtig ist hierbei festzuhalten, dass alle genannten Erscheinungen nur für eine **beschleunigte** Bewegung gelten. Hört die Beschleunigung auf, fallen sie schlagartig weg: der Astronaut wird schwerelos, die Atomuhren an Decke und Boden gehen wieder absolut gleich schnell und der Lichtstrahl verläuft schnurgerade von einer Wand zur anderen.

Gravitationsquanten

Kommen wir noch einmal zu den vier Wechselwirkungen zurück und fragen uns, wie diese übertragen werden. Wodurch "spürt" z.B. die Erde, dass sie sich nicht der Gravitationskraft der Sonne entziehen kann?

Alle 4 Wechselwirkungen werden durch den Austausch von Botenteilchen, so genannten **Bosonen** (Teilchen mit ganzzahligem *Spin*) übertragen. Im einzelnen sind dies:

Wechselwirkung	Reichweite	Botenteilchen	Existenz
Starke Wechselwirkung	10^{-15} m	Gluonen	indirekt nachgewiesen
Schwache Wechselwirkung	10^{-18} m	W- und Z-Bosonen	nachgewiesen
Elektromag. Wechselwirkung	unendlich	Photonen	nachgewiesen
Gravitation	unendlich	Gravitonen	vermutet

Wie wir schon oben sahen, ist die Gravitation außerordentlich schwach gegenüber den anderen drei Naturkräften. Aus diesem Grund können Gravitonen mit den derzeit vorhandenen Messgeräten nicht nachgewiesen werden, sie liegen außerhalb jeder Nachweisgrenze. Wenn es sie aber gibt (was noch keineswegs sicher ist!), dann haben wir sicherlich Teilchen mit der Ruhemasse 0 und dem Spin 2 (der Spin eines Teilchens ist, einfach ausgedrückt, ein gequantelter Eigendrehimpuls) vor uns. Sie sind die "Lastesel", welche die Kraft der Gravitation zwischen den Körpern übertragen. Wobei die Gravitationskraft immer anziehend wirkt, sie ist nicht polarisiert.

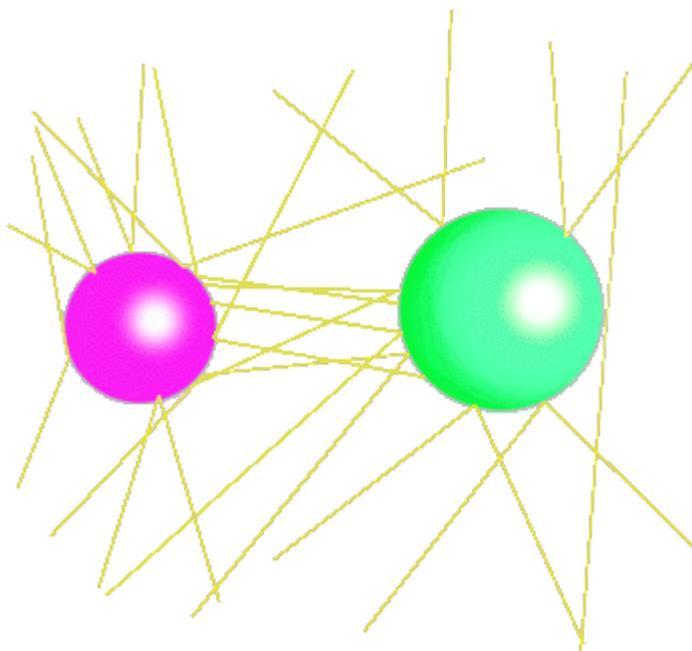
Gravitation geht von jedem noch so kleinen Teilchen aus, selbst von Neutronen oder Protonen. Ihre Wirkung ist allerdings derart gering, dass sie in diesen Dimensionen vollkommen vernachlässigt werden kann. Doch aus wie viel Protonen und Neutronen besteht ein Stern aus 20 oder 50 Sonnenmassen! * Erst in dieser Größenordnung zeigt sich die "*Macht der Gravitation*", weil sich nämlich alle winzigsten Gravitationsbeiträge der

einzelnen Teilchen zu ungeheurer Stärke aufaddieren und schließlich aus solchen massereichen Sternen die exotischsten Gebilde des Alls, Schwarze Löcher, entstehen lassen.

* Man kann das sogar berechnen. Angenommen, der Stern besteht nur aus Wasserstoff (H_2). Dieser ist ionisiert, besteht also nur aus Protonen. Die Masse der Elektronen vernachlässigen wir großzügig. Eine Sonnenmasse entspricht rund 2×10^{30} [kg], die Masse eines Protons 1.672648×10^{-27} [kg]. Die Sonnenmasse dividiert durch die Protonenmasse ergibt dann, dass in der Sonne $1,196 \times 10^{57}$ Protonen umherschwirren, in Sternen mit 20- oder 50facher Sonnenmasse entsprechend mehr.

Gravitonen kann man sich also als winzigste Teilchen, oder besser nach der Quantenmechanik, als Feldquanten vorstellen, die eine gewisse Ähnlichkeit mit den Photonen aufweisen.

Hier sieht man, wie Gravitonen zwischen zwei Körpern ausgetauscht werden könnten. Man kann diesen ruhemasselosen Feldquanten, genau wie den Photonen, einen Impuls zuordnen. Daraus folgt, dass sich auch Gravitonen ausschließlich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Entgegen vielen anderen Behauptungen breiten sich damit Gravitationsfelder nur mit der Lichtgeschwindigkeit c aus.



Nun werfen wir einen Blick durch ein Elektronenmikroskop und betrachten ein Wasserstoffatom. In einfachster Vorstellung wird hier ein Proton von einem Elektron umkreist. Das Elektron könnte nun ein kleines Energiepaket, ein Photon, abstrahlen und dadurch von einer hohen auf eine niedrigere Bahn fallen. Ebenso gut könnte das Elektron auch ein Graviton abstrahlen! Doch wir haben ja schon festgestellt, dass im atomaren Bereich die Gravitation nichts zu melden hat, vielmehr ist hier das Reich der elektromagnetischen Wechselwirkung. Und so kommt es, dass wir auf 10^{44} (!) beobachtete, vom Elektron abgegebene Photonen nur ein einziges Graviton feststellen könnten.

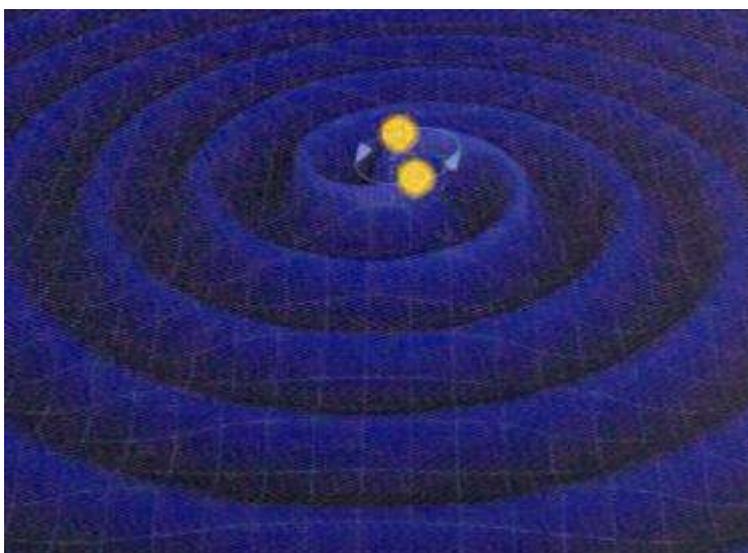
Wir brauchen also etwas Massiveres als ein Elektron, um den Gravitonen auf die Spur zu kommen.

Gravitationswellen

Gehen wir die Sache also gleich richtig an und montieren auf einem Drehteller einen ordentlichen Metallklotz, vielleicht von 20 m Länge und einem Gewicht von 500 Tonnen. Nun lassen wir unseren Klotz mit 30 Umdrehungen pro Sekunde rotieren. Jetzt sollte man eigentlich genügend Gravitonen "produzieren". Aber es erwartet uns eine weitere Enttäuschung: unser Balken strahlt Gravitonen mit einer Leistung von gerade mal 10^{-29} [Watt] ab. Das ist viel zu wenig, um es irgendwie messtechnisch zu erfassen.

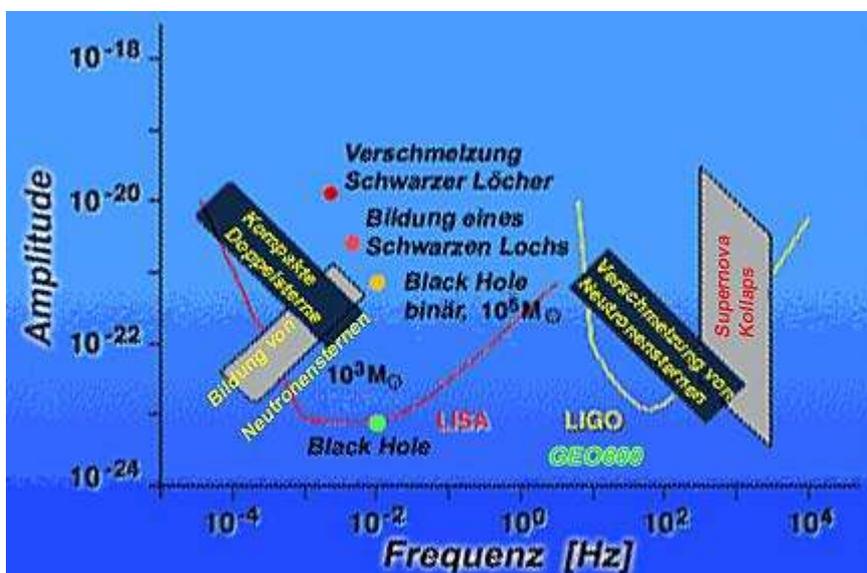
Man braucht scheinbar richtig große Massen, um den Gravitonen auf den Pelz zu rücken. Zuvor aber noch einmal der Vergleich mit den Photonen: Wenn viele Photonen miteinander in bestimmter Weise schwingen, so nennt man das eine Welle. Das kann sichtbares Licht, Radio- oder Röntgenstrahlung sein. Dasselbe gilt auch, vereinfacht ausgedrückt, für Gravitonen: Viele Gravitonen bilden **Gravitationswellen** aus. Und diese wollen wir nun suchen.

Einstein hat in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie die Existenz von Gravitationswellen vorausgesagt. Sie sind sich fortplanzende Verzerrungen der Raumzeitkrümmung, die durch massive Objekte verursacht werden. Gravitationswellen "wandern" nicht durch die Raumzeit - es sind vielmehr Oszillationen ihrer selbst. In den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts erkannten Physiker, dass Körper, die Gravitationswellen aussenden, Masse bzw. Energie einbüßen. 1974 fand man eine Bestätigung in einem



System zweier sich sehr schnell umkreisender Pulsare (= Neutronensterne). Dieses System, genannt **PSR1913+16** (grafische Darstellung), sollte Gravitationswellen aussenden. Tatsächlich konnte man bei einem der beiden Pulsare nachweisen, dass seine Rotationsdauer pro Jahr um 75 Mikrosekunden abnimmt. Dieser Energieverlust ist nur durch die Abstrahlung von Gravitationswellen zu erklären. Damit war der erste, obwohl nur indirekte Beweis der Existenz von Gravitationswellen gelungen. Die beiden Pulsare werden sich durch den Energieverlust einander nähern und eines Tages kollidieren und zu einem Schwarzen Loch verschmelzen. Bei einem solchen Ereignis werden dann nochmals Gravitationswellen hoher Energie freigesetzt.

Warum aber sollten wir nach ihnen suchen? Nun, Gravitationswellen könnten uns völlig neue Erkenntnisse über das Universum erschließen. Weil sie jede Materie unverändert durchdringen, könnten sie uns "erzählen", wie schnell Schwarze Löcher rotieren oder uns neue Erkenntnisse über Neutronensterne eröffnen.



Das Spektrum der Gravitationswellen. Es beginnt mit einer Frequenz von etwa einem zehntausendstel [Hertz] und reicht bis in den 10 [KHz]-Bereich, überstreicht also 8 Größenordnungen. Erdgebundene Detektoren können wegen seismischer Störungen nur ab etwa 1 [Hertz] eingesetzt werden, die tieffrequenten Bereiche

sind nur den Weltraumexperimenten zugänglich (siehe weiter unten). Wie aber kann man sie nachweisen? Wenn sie auf Materie treffen, werden sie deren Ausdehnung verändern. Weil sie aber so schwach sind, würden sie z.B. bei einem Menschen nur eine Änderung der Ausdehnung um 1/100 000stel des Durchmessers eines Protons hervorrufen. So hat man bereits in den sechziger Jahren vergeblich versucht, die Längenänderungen an einem großen Aluminium- Zylinder nachzuweisen. Derzeit laufen bzw. werden viele verschiedene Projekte durchgeführt, um endlich den Nachweis zu erbringen.

Die Jagd nach diesen schwachen Wellen ist eröffnet: Es ist weltweit ein regelrechtes Wettrennen angelaufen. Schon allein diese Tatsache zeigt, wie sehr die Wissenschaft von der Existenz der Gravitationswellen überzeugt ist, denn die Experimente sind letztendlich mit einem enormen finanziellen Aufwand verbunden. Hier eine Auswahl der geplanten bzw. bereits angelaufenen Experimente:

- [LISA](#), ein Weltraumprojekt von 5 Millionen km Länge
- [LIGO](#), ein USA- Bodenexperiment von 4 km Ausdehnung
- [VIRGO](#), italienisch- französisches Gemeinschaftsprojekt, 3 km
- [GEO600](#), britisch- deutsches Projekt in Hannover, 600 m
- [TAMA300](#), japanisch, 300 m

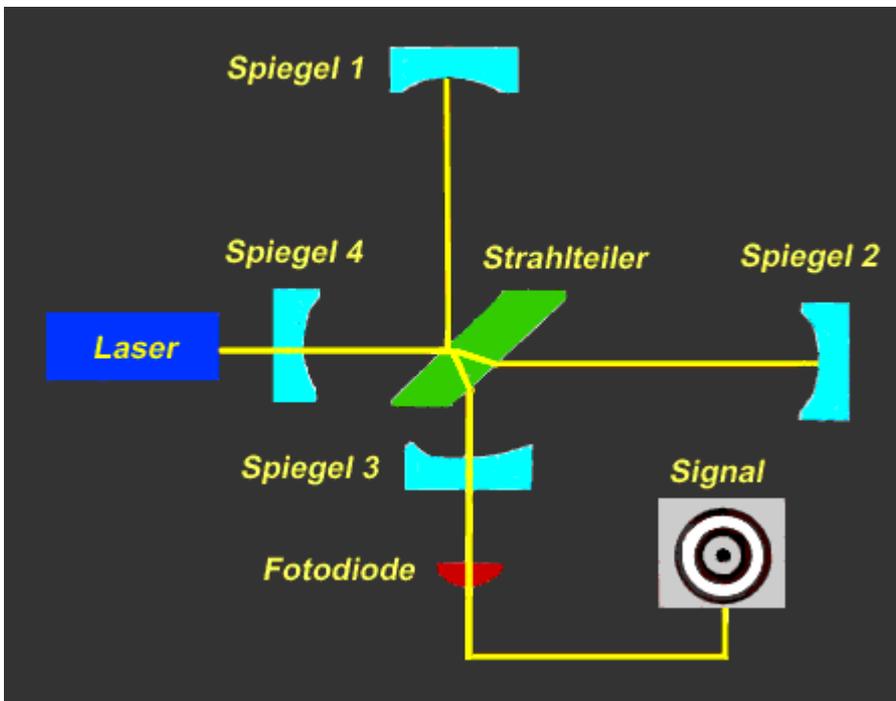
Dies alles sind Experimente, die auf der **Interferometrie** (Überlagerung von Wellen) beruhen. Es laufen jedoch auch Projekte, welche die Längenveränderung von massiven Körpern ausnutzen:

- [GRAIL](#), ein holländisches Projekt
- [EXPLORER](#), Italien

Weitere Experimente mit ebenfalls klingenden Namen sind **TIGA**, USA; **SFERA**, Italien; **OMEGA**, Italien **GRAVITON**, Brasilien; **ALLEGRO**, USA, **NAUTILUS**, Italien sowie **AURIGA**, ebenfalls in Italien.

Es würde sicher zu weit führen, sollte hier jedes Experiment beschrieben werden. Stellvertretend für alle anderen betrachten wir deshalb nur kurz folgende:

Die Interferometer nutzen den Effekt, dass Gravitationswellen die Länge von zwei rechtwinklig angeordneten (Laser-) Lichtstrahlen unterschiedlich beeinflussen. Rechtwinklig deshalb, weil auch Gravitationswellen in zwei Ebenen schwingen, horizontal und vertikal, so dass man beim Auftreffen einer Welle wenigstens immer eine Polarisationssebene "erwischt". Hierzu verwendet man das Prinzip des *Michelson-Interferometers*, welches von **Albert Michelson** und **William Morley** schon 1878 und 1887 benutzt wurde, um den "Ätherwind" nachzuweisen, was natürlich nicht gelang.



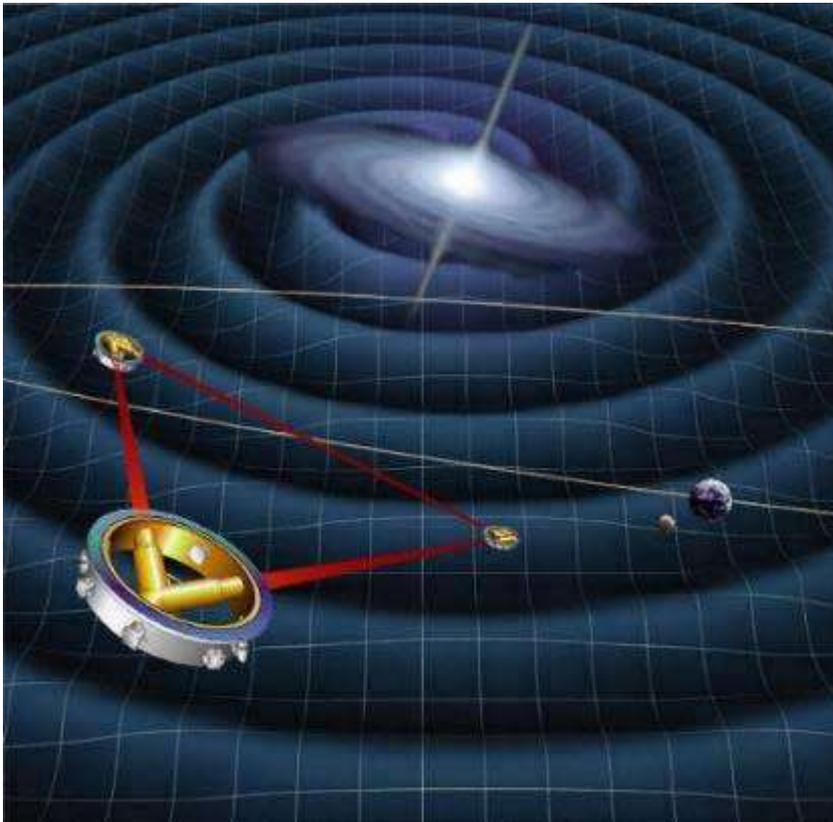
Der Laserstrahl des Interferometers **GEO600** bei Hannover durchläuft einen Strahlteiler und gelangt zu den Spiegeln 1 und 2, welche die Messstrecke darstellen. Man stellt die Apparatur so ein, dass sich die Lichtwellen überlagern und damit gegenseitig auslöschen (destruktive Interferenz), womit am Ausgang kein Licht einfällt. Verändern nun Gravitationswellen die Streckenlänge, d.h. die Laufzeit, verschieben sich die Wellen und am

Ausgang erscheint ein Signal (Licht). Das Licht wird durch die Überlagerung nicht vernichtet, sondern nur umverteilt. Es gelangt zurück zum Eingang und wird von Spiegel 3 wieder zurückgeworfen, wodurch eine Lichtverstärkung erzielt wird. GEO600 verwendet noch einen vierten Spiegel, um das selbe mit dem Signal durchzuführen, wodurch man eine weitere Signalverstärkung erreicht.



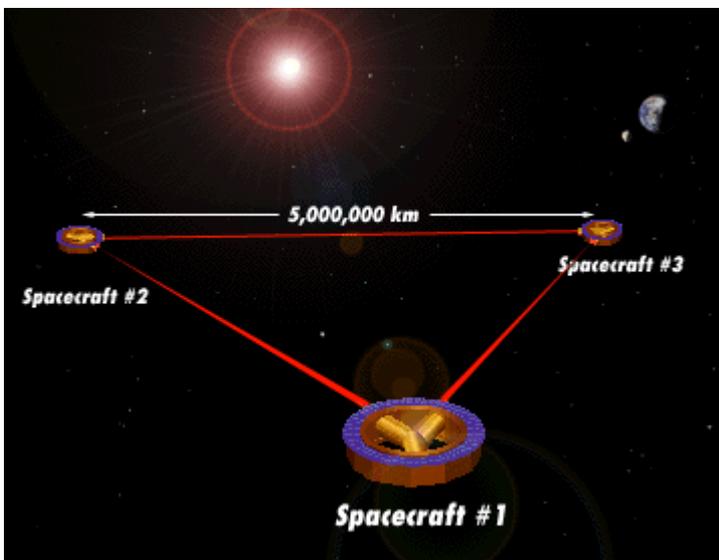
Die Anlage GEO600 bei Hannover. Jede der beiden rechtwinklig angeordneten Lichtlaufstrecken hat eine Länge von 300 m. Sie ist so empfindlich, dass man sogar besondere Vorkehrungen treffen musste, damit nicht die Wellen der Nordsee in über 200 km Entfernung zu Fehlmessungen führen.

Luftaufnahme von DEUTSCHE LUFTBILD W. Seelmann & Co. GmbH, Hamburg



LISA (**L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna) ist ein Experiment, welches in einer geostationären Umlaufbahn positioniert wird. Das Gerät besteht aus 3 Zylindern von 1,80 m Durchmesser und 30 cm Höhe, die jeweils in einem Abstand von 5 Millionen km zueinander ausgerichtet werden. Die Stromversorgung erfolgt über Solarzellen. Das Y-förmige optische System im Innern des Zylinders ist goldbeschichtet und thermisch isoliert, zusätzlich werden die Zylinder 30° gegen die Sonne geneigt. Ein separates Schild sorgt für weitere Abschirmung der Sonneneinstrahlung.

Angedeutet ist die Position des Instrumentes zur Erdumlaufbahn. In der Bildmitte sieht man das zentrale Schwarze Loch unserer Milchstraße, von welchem Gravitationswellen ausgehen sollten. Durch die enorme Lauflänge der Laserstrahlen sollte LISA imstande sein, auch schwache Gravitationswellen aufzuspüren.



Gravitationswellen werden den Abstand der einzelnen Zylinder geringfügig verändern. Durch die extreme Schenkellänge ist Lisa so empfindlich, dass noch Abweichungen von einem tausendstel Millimeter einwandfrei nachgewiesen werden. Ein weiterer Vorteil durch die Stationierung im Weltraum ist, dass Untergrundrauschen sowie Störungen seismischer Art im Gegensatz zu erdgebundenen Experimenten nur sehr gering sein werden. Das Gerät ist daher vorzüglich geeignet, auch sehr schwache und niederfrequente

Gravitationswellen zu detektieren. Diese können von Quellen wie binären Neutronensternen oder rotierenden Schwarzen Löchern stammen und werden uns aufregende neue Informationen zugänglich machen.

Mit freundlicher Genehmigung der NASA



Eine andere Methode zum Nachweis von Gravitationswellen ist die Veränderung der Länge von starren Körpern. Wie hier beim **Explorer**-Experiment am **CERN** benutzt man dazu Zylinder aus einer speziellen Aluminiumlegierung. Der Zylinder ist 3 m lang, hat einen Durchmesser von 60 cm und wiegt 2,3 Tonnen. Zum Betrieb wird er durch flüssiges Helium auf eine Temperatur von nur 2 K (-271° C) abgekühlt. Seine Resonanzfrequenz liegt zwischen 903

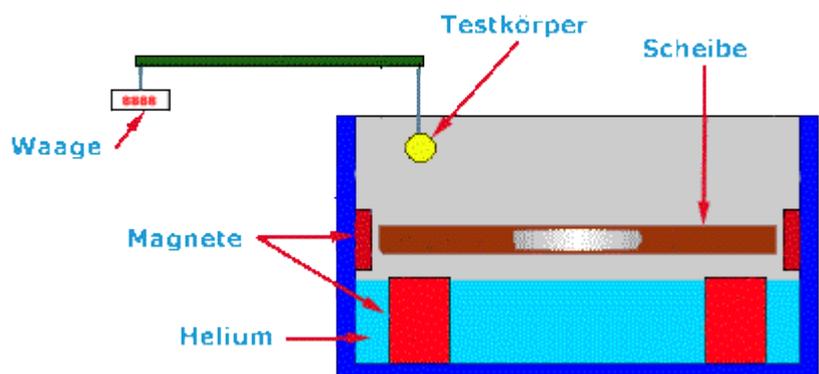
und 926 Hz. Sensoren am Zylinder müssen allerwinzigste Längenänderungen aufspüren.

Wie auch immer diese Experimente geartet sind, wünschen wir den Wissenschaftlern eine baldige Belohnung ihrer Mühen! Schließlich werden wir alle Nutznießer der neuen Erkenntnisse sein, denn Gravitationswellen werden uns sicherlich helfen, viele der teilweise noch rätselhaften Vorgänge im schier unergründlichen Kosmos besser zu verstehen.

Antigravitation

In vielen SF- Romanen ist sie längst Wirklichkeit - die **Antigravitation**. Aber gibt es sie tatsächlich? Spätestens seit einem Experiment des finnischen Wissenschaftlers Dr. Eugene Podkletnov von der Universität Tampere im Jahre 1996 ist die Diskussion um die Antigravitation nicht verstummt.

In diesem Experiment wird in einem mit flüssigem Helium von nur 70 K (-200 °C) gefüllten Behälter die Scheibe eines Supraleiters (chem. Zusammensetzung $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) gelegt. Diese wird durch 3 Magnete in der Schwebe gehalten und durch seitlich angeordnete Elektromagnete in Drehung versetzt. Bringt man nun oberhalb der Scheibe einen Testkörper in die Anordnung, so verliert dieser bis zu 2% seiner ("schweren") Masse, je nachdem wie schnell sich die Scheibe dreht, ob sie ruht, beschleunigt oder abgebremst wird.



Der Masseverlust des Testkörpers, welcher inzwischen in vielen Nachfolgeexperimenten reproduziert wurde, wird auf eine Abschirmung des Gravitationsfeldes der Erde zurückgeführt. Podkletnov kam auf diesen Gedanken, als ein pfeiferauchender Kollege während des Experiments zugegen war und beide beobachteten, wie der Rauch über dem Experiment senkrecht nach oben zog. Messungen des Luftdrucks über der Scheibe ergaben dann ebenfalls einen verringerten Wert, der selbst im darüber liegenden Stockwerk noch nachzuweisen war.

Worauf dieser Effekt nun letztendlich beruht, ist bis heute noch nicht eindeutig geklärt. Supraleiter sind Substanzen, in denen jeder elektrische Widerstand aufgehoben ist. Ein äußeres Magnetfeld kann nur wenige Atomlagen tief eindringen (Supraleiter erster Art). Supraleiter zweiter Art kanalisieren das Magnetfeld und können wesentlich höheren magnetischen Flussdichten standhalten. Letztere Art kann sehr starke Magnetfelder erzeugen, vielleicht ist der Effekt des Experiments einfach eine magnetische Abstoßung?

Dass aber vielleicht wirklich "etwas daran" sein könnte, zeigt das Interesse der NASA an diesem Experiment wie auch neuerdings der Firma Boeing, die unter dem Namen **GRASP** (*Gravity Research for Advanced Space Propulsion*) eine eigene Forschungsabteilung für Antigravitation ins Leben gerufen hat. Die Aussicht, vielleicht einmal 2% der Erdanziehungskraft abzuschirmen, lässt solche Forschungsprojekte äußerst lukrativ erscheinen, denn die Treibstoffersparnis wäre enorm. Auch die **ESA**, die europäische Raumfahrtbehörde, will in diese Forschung einsteigen. Allerdings sind sich die Forscher sicher, dass es niemals zur Aufhebung der Schwerkraft kommen wird, oder dass man etwa vollkommen neuartige Antriebe entwickeln könnte.

Weitere Experimente, denen nun nachgegangen werden soll, werden sich mit den gravitativen Eigenschaften von Antimaterie beschäftigen. Denn es ist längst noch nicht geklärt, wie die Schwerkraft auf diese Materieart einwirkt bzw. ob nicht selbst von Antimaterie eine abstoßende Gravitation ausgeht.



Viele Wissenschaftler lehnen heute allerdings die Existenz von antigravitativen Wirkungen ab. Einzig der **Negativen Energie** kommt eine solche Eigenschaft zu. Darüber hinaus steht die Antigravitation nicht im Einklang mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, denn Gravitation ist nicht polarisiert, sie wirkt immer anziehend. Captain Kirk und Co. werden wohl das freie Schweben über der Oberfläche von Planeten auf andere, uns unbekannte Art bewerkstelligen. Und Podkletnov arbeitet seit seinem Rausschmiss längst nicht mehr an der Universität von Tampere...

Die Zeit

[Raumzeit](#)

[Maße](#)

[Anfang oder Ende?](#)

[Zeitdehnung](#)

[Zeit ist Privatsache](#)

[Das GPS- System](#)

Raumzeit

Zeit ist eine Dimension, für die wir kein Sinnesorgan besitzen. Daher haben wir ein nur subjektives Zeitempfinden, welches sich nach der biologischen Uhr richtet und damit vom Tagesablauf abhängt. Physikalisch gesehen beschreibt sie den temporären Ablauf eines Ereignisses. **Isaac Newton** formulierte seinerzeit:

"Es gibt eine absolute, wahre und mathematische Zeit, die gleichförmig für sich und vermöge ihrer eigenen Natur fließt, ohne Beziehung zum äußeren Geschehen".

Wie sehr sich Newton mit dieser Aussage irrte, wissen wir spätestens seit der Entwicklung der Relativitätstheorie durch **Minkowski**, **Lorentz** und natürlich **Einstein**. Minkowski fügte dem dreidimensionalen Raum die Zeit hinzu, auf

"dass von nun an Raum und Zeit für sich völlig zum Schatten herabsinken, nur noch eine Union der beiden soll Selbstständigkeit bewahren".

Die Relativitätstheorie wie auch die Quantenmechanik bringen nun zusätzlich den Beobachter bei Betrachtung des Raumzeit- Kontinuums mit ins Spiel. Denn die Bewertung von Zeit oder Raum fällt unterschiedlich aus, wenn sich Beobachter mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. Dazu später aber noch mehr.

Jedes Ereignis im Kosmos ist definiert durch die Raumkoordinaten *und* die Zeitkoordinate. Fehlt nur eine davon, ist das Ereignis nicht mehr korrekt zu beschreiben. Ohne die Zeitkoordinate aber hätte unser Universum überhaupt keine Geschichte, es gäbe keine Entwicklung, es wäre ein totes Universum, weil kein einziges Ereignis stattfinden könnte. Kein Stern, kein Planet würde sich bilden und erst recht kein Leben entstehen.

Alles, was wir in unserem Leben erfahren, ist eine ununterbrochene Kette von Ereignissen! Den Verlauf der Zeit betrachten wir als gleichförmig fließend:



Unterbrechungen im Zeitfluss scheint es nicht zu geben, augenscheinlich ist es eine Dimension ohne "Ecken" oder "Zacken". Dennoch haben wir durch die Quantenmechanik erkennen müssen, dass auch die Zeit in kleinsten Abschnitten einer gewissen Unschärfe unterliegt.

Wir können also heute nicht mehr die Zeit vom Raum losgelöst betrachten. Die Relativitätstheorie macht deshalb auch keinen Unterschied mehr zwischen den 4 Koordinaten "Länge, Breite, Höhe und Zeit". Dennoch soll hier die Zeit als eigenständige Größe betrachtet werden.

Maße

Die Einteilung der Zeit in messbare Abschnitte erfolgt rein willkürlich. Wenn wir alltägliche Begriffe wie Stunde oder Sekunde verwenden, sollten wir uns darüber im Klaren sein, dass sich diese Einheiten aus unserer natürlichen Umgebung ableiten. Unsere Zeiteinteilung ist gegeben durch die Erddrehung (Stunde Minute, Sekunde), die Dauer des Erdumlaufs um die Sonne (Jahr) und die Dauer des Mondumlaufs (Monat, Woche). Wesen auf anderen Planeten mit anderen Umlaufzeiten werden sicherlich eine völlig abweichende Zeiteinteilung haben. Um einen reproduzierbaren Maßstab für die Zeit herzustellen, braucht man lediglich eine bestimmte Menge des Metalls **Cäsium** (^{133}Cs), dessen Atome durch eine spezifische Umlagerung sich gegenseitig zur Ausstrahlung von Mikrowellenstrahlung anregen. Mit dieser Welle versetzt man dann einen Quarzkristall in Schwingungen, welche nun durch eine elektronische Digitalanzeige dargestellt werden. Genau

9 192 631 770 Schwingungen dieser Mikrowelle benötigt man zur exakten Darstellung eines Zeitraums von einer Sekunde, welche die Basiseinheit der Zeitmessung bildet. Dieses Prinzip ist in einigen Tausend Atomuhren weltweit verwirklicht. Darüber hinaus senden einige dieser Uhren regelmäßige Radioimpulse aus, so dass wir jederzeit bei einem Blick auf unsere Funkuhr höchst präzise wissen, was die Stunde geschlagen hat.

Weil man die Lichtgeschwindigkeit heute recht genau bestimmen kann und diese im Vakuum eine universelle, absolut unveränderliche Naturkonstante darstellt, verwendet man sie in den SI- Einheiten zur Definition der Basiseinheit Sekunde. Demnach wird eine Sekunde als die Zeit definiert, die ein Lichtstrahl benötigt um eine Strecke von 299 792 458 m zu durchlaufen. Ebenso wird heute die Längenangabe nicht mehr wie früher auf das in Paris aufbewahrte Urmeter zurückgeführt, sondern auf eine Zeitangabe. 1 Meter entspricht der Strecke, die ein Lichtstrahl in $1/299\,792\,458$ s durchläuft. Diese Angabe ist viel genauer als das Urmeter, weil die Lichtgeschwindigkeit nicht wie die Länge des Urmeters von der Temperatur abhängig ist. Zeit fließt augenscheinlich kontinuierlich in eine Richtung, ohne jede Unterbrechung. Vermutlich kann sie dies unendlich lang, jedenfalls so lange wie unser Universum existiert. Wie aber sieht es im kleinsten Bereich aus?

Gibt es vielleicht eine kleinste Zeiteinheit? Ja, in der Physik rechnet man mit der so genannten [Planckzeit](#), dem kleinsten noch sinnvollen Zeitabschnitt. Er leitet sich aus folgender Beziehung ab:

$$t_p = \sqrt{\frac{G \cdot h}{c^5}} \approx 10^{-43} \text{ s}$$

Hierin ist **G** die Gravitationskonstante, **h** die Planck-Konstante und **c** die Lichtgeschwindigkeit. In diesen winzigen Bereichen ist auch die Zeit der Unschärfe der Quantenmechanik unterworfen, man kann sie nicht mehr erfassen, weiß nicht ob sie vorwärts oder rückwärts läuft und sie wird durch die Beobachtung in ihrer Richtung beeinflusst.

Anfang oder Ende?

Man kann sich nun die Frage stellen: Hat die Zeit einen Anfang, und gibt es vielleicht auch ein Ende? Den ersten Teil der Frage kann man mit einem klaren "Ja" beantworten. Die Zeit unseres Kosmos begann mit dem [Urknall](#). Das war, zumindest für unser Universum, der absolute Punkt Null (genau genommen beginnt unser All mit der oben genannten Planckzeit, was davor war liegt verschwommen in der Quantenunschärfe). Wir wissen nicht, wie und woraus der Kosmos entstand, ob er vielleicht nur ein Staubkorn in einem "Multiversum" ist, in welchem völlig andere Gesetze gelten und vielleicht eine für uns unbegreifliche Zeit existiert. Jedenfalls ergeben sich für den Verlauf [unserer Zeit](#) lediglich zwei Alternativen: Sie kann ein Ende nehmen, wenn irgendwann in ferner Zukunft das gesamte Universum wieder kontrahieren sollte durch die Eigengravitation. Es wird dann vollständig in sich zusammenstürzen, alle Materie, Energie, Raum und Zeit in einem schier unendlich kleinen Punkt (einer [Singularität](#)?) vereinen. Das wäre das Ende von Allem, auch der Zeit. Falls wir im Gegensatz zu einem solch geschlossenen Universum in einem offenen leben (und alles deutet bisher darauf hin), so wird die Expansion des Raums unendlich lang fortgesetzt. Selbst wenn dann irgendwann alle Materie zerfallen ist und der Kosmos nichts Sinnvolles mehr enthält, wird es noch die Zeit geben.

Zeitdehnung

Bis jetzt haben wir die Zeit als gleichmäßig in eine Richtung fließend betrachtet. Durch Einsteins Relativitätstheorie wissen wir aber, dass Zeit abhängig ist vom Bezugssystem eines Beobachters. Zeit lässt sich nämlich beeinflussen, und zwar durch Gravitation und durch Bewegung:

Je schneller die Bewegung oder je größer die Gravitation, umso langsamer verläuft die Zeit.

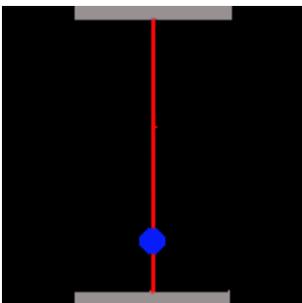
So wird z.B. eine Atomuhr an Bord eines in 10 km Höhe fliegenden Flugzeugs nachweislich schneller laufen als auf dem Erdboden, denn hier unten ist die Gravitation größer (man kann das durchaus nachmessen). Selbst die Kirchturmuhren gehen schneller als unsere Armbanduhr, der Unterschied ist aber noch verschwindend gering. Tragen wir unsere Uhr in die Nähe eines Schwarzen Loches, so wird sie durch die extreme Gravitation immer langsamer laufen, je näher wir diesem Objekt kommen. Kommt sie so nahe an das Loch, dass sie den Ereignishorizont berührt, bleibt die Zeit gänzlich stehen. Noch verrückter: womöglich läuft sie innerhalb des Ereignishorizontes sogar rückwärts!

So verhält es sich auch bei unserem "armen Astronauten" (der inzwischen ja schon so manches [Schwarze Loch](#) besuchen musste), wenn er sich mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Für ihn vergeht die Zeit viel langsamer als für das Bodenpersonal auf der Erde. Hätte er ein Superraumschiff, mit dem er die Lichtgeschwindigkeit erreichen könnte (was natürlich nicht möglich ist), so würde für ihn die Zeit stehen bleiben! Er könnte dann in Nullzeit jeden beliebigen Punkt im Universum erreichen.

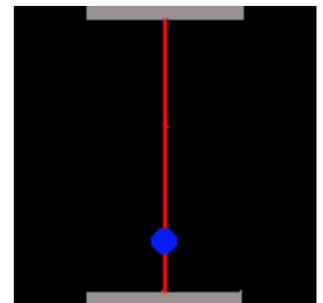
Wie aber wird er aus seiner Sicht die Vorgänge auf der Erde beobachten? Der Astronaut kann mit Fug und Recht von sich behaupten, selbst der ruhende Pol im Universum zu sein. Nach seiner Anschauung steht er still im Raum und die Erde sowie das restliche All fliegen an ihm vorüber! Während seine Borduhr (auch seine biologische Uhr) vollkommen normal läuft, sieht er die Zeit auf der Erde nun immer langsamer verlaufen, je schneller er sich bewegt. Daran erkennt man, dass Zeit an unterschiedlichen Orten, oder besser gesagt in unterschiedlich bewegten Bezugssystemen anders verläuft:

Es gibt im Universum keinen absoluten Ort, den man als ruhenden Bezugspunkt bezeichnen kann, und deshalb ist die Zeit an verschiedenen Orten unterschiedlich.

Zeit ist also abhängig von der Bewegung des betrachteten Bezugssystems. Wie aber kommt Einstein zu solchen Aussagen? Um das zu verstehen, stellen wir uns eine simple, aber hochgenaue Uhr her. Sie besteht ganz einfach aus zwei parallelen Spiegeln, zwischen welchen ein Photon hin und her reflektiert wird. Als Maßeinheit der Zeit verwenden wir dabei die Dauer, die das Photon für den Weg vom einen zum anderen Spiegel benötigt. Weil die Lichtgeschwindigkeit absolut konstant ist, arbeitet unsere Uhr mit höchster Präzision:

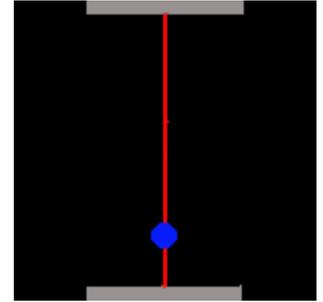
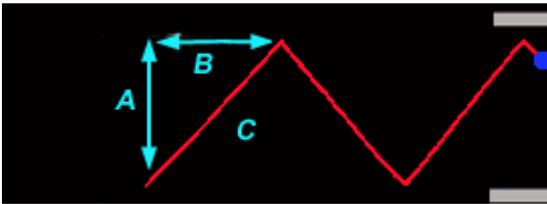


Hier sehen wir gleich 2 dieser phantastischen Uhren. Diese benötigen wir auch, denn eine soll bei uns auf der Erde bleiben, weil wir die ruhenden Beobachter sind. Eine Uhr bekommt der Kollege Astronaut mit in seine Rakete, den wir jetzt wieder einmal auf die Reise schicken wollen. Wie man sieht, sind beide Uhren synchronisiert, sie gehen vollkommen identisch. Unsere neue Zeiteinheit nennen wir **T** und die Strecke, die das Photon vom einen zum anderen Spiegel durchläuft **A**.



Jetzt können wir auf den Feuerknopf drücken und unseren Astronauten ins All schießen. Er dreht erst ein "paar Runden" um Geschwindigkeit aufzunehmen, und fliegt dann mit relativistischer Geschwindigkeit (in deutlichen Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit) auf einem solchen Kurs, dass wir bequem seine Uhr beobachten können. Was werden wir sehen?

Während unsere (rechte) Uhr völlig normal weiterläuft, sieht die des Astronauten total anders aus! Wir sehen das Photon unten links starten, doch in der Zeit, die es für den Weg zum oberen Spiegel benötigt, haben sich die Spiegel durch die schnelle Bewegung des Raumschiffs verschoben und zwar mit der Geschwindigkeit des Raumschiffs v . Aus unserer Sicht muss das Photon damit scheinbar eine Diagonale (C) durchlaufen, und die ist natürlich länger als der direkte Weg (A) zwischen den Spiegeln unserer Uhr. Denn zusätzlich zur Strecke A durchläuft das Photon auch die Verschiebung beider Spiegel um die Distanz B . Allem Anschein nach wird die Zeit gedehnt, und wir bezeichnen diese Zeit als T' . Wir betrachten dies genauer, indem wir das rechtwinklige Dreieck aus den Strecken A , B und C untersuchen.



Minkowski, Einsteins ehemaliger Professor (der seinen Studenten Einstein noch als *"faulen Hund"* bezeichnete), erkannte in dessen Gleichungen die Bedeutung des Satzes des Pythagoras, der die Seitenverhältnisse eines rechtwinkligen Dreiecks beschreibt:

$$A^2 + B^2 = C^2.$$

Das Photon durchläuft nun alle Strecken mit der Lichtgeschwindigkeit c , also A und auch C . Somit können wir sagen, dass sich die Strecken A zu C verhalten wie die Zeiten T zu T' :

$$A/C = T/T'$$

Während das Photon C durchläuft, verschoben sich die Spiegel mit der Geschwindigkeit v um den Betrag B , daher gilt auch

$$B/C = v/c$$

Nun wollen wir untersuchen, wie sich die Laufzeiten zueinander verhalten. Wir beginnen damit, den Satz des Pythagoras durch c^2 zu dividieren:

$$\left(\frac{A}{C}\right)^2 + \left(\frac{B}{C}\right)^2 = 1$$

Wir bringen B/C auf die andere Seite:

$$\left(\frac{A}{C}\right)^2 = 1 - \left(\frac{B}{C}\right)^2$$

Um A/C berechnen zu können, müssen wir auf beiden Seiten die Wurzel ziehen:

$$\frac{A}{C} = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{C}\right)^2}$$

Jetzt können wir die Verhältnisse A/C und B/C durch die anderen physikalischen Größen ersetzen, da sie ja einander proportional sind. Die Strecke A ersetzen wir also durch T , die Zeit, die das Photon für einen Weg auf unserer Erduhr benötigt und C durch T' , die verlängerte Zeit in der Raumschiffuhr. Wie wir oben gesehen haben, verhalten sich $B/C = v/c$, und wir ersetzen daher auch diesen Ausdruck:

$$\frac{T}{T'} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Wir bilden noch den Kehrwert und erhalten eine damit eine bequeme Möglichkeit, die Größe der Zeitdehnung zu berechnen:

$$\frac{T'}{T} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \gamma$$

Dies ist nun der berühmte **Gamma-Faktor**, ein sehr wichtiger Ausdruck, der häufig in der Relativitätstheorie vorkommt. Er gibt uns an, um welchen Faktor sich die Zeit verlangsamt, wenn sich jemand im Gegensatz zu uns als ruhende Beobachter mit einer Geschwindigkeit v bewegt.

Das gilt für jede Bewegung! Selbst wenn wir einen Fußgänger an unserem Fenster vorbeigehen sehen, verläuft seine Zeit eine winzige Idee langsamer als unsere.

Das ist aber kaum messbar, überhaupt bemerken wir auf der Erde nichts von der Zeitdehnung, sie ist einfach zu gering. Erst bei hohen Geschwindigkeiten wird sie deutlich spürbar, wie folgende Beispiele zeigen:

Objekt	Geschwindigkeit	% der Lichtgeschwindigkeit	Gamma- Faktor γ
Fußgänger	5 [km/h]	0,000 000 4	1,000 000 000 000 000 02
PKW	100 [km/h]	0,000 009	1,000 000 000 000 004
Düsenflugzeug	2000 [km/h]	0,000 2	1,000 000 000 002
Geschosskugel	1 [km/s]	0,000 3	1,000 000 000 005
Erde	30 [km/s]	0,01	1,000 000 005
Ionenrakete	30 000 [km/s] 270 000 [km/s]	10	1,005
		90	2,294
		99	7,089
		99,99	70,71
		99,9999	707,11
		99,999999	7071,1

Man sieht an diesen Beispielen sehr deutlich, dass man die Zeitdehnung in unserem Alltag durchaus vernachlässigen kann, erst in relativistischen Geschwindigkeitsbereichen wirkt sie sich erheblich aus. Exakt bei Lichtgeschwindigkeit wird sie dann sogar unendlich groß!

Im gleichen Maße, wie wir die Zeit des Astronauten sich verlangsamen sehen, sieht er auch unsere Uhren langsamer gehen, natürlich ebenfalls mit dem Gamma- Faktor. Denn für ihn geht seine Uhr völlig normal, er bemerkt an sich und seinem Raumschiff keine Veränderung. Doch im Endeffekt bedeutet das, wenn er nur ein Jahr lang mit 99,999999% der Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist und zur Erde zurück kehrt, sind wir bereits nur noch Staub und Asche, denn es sind über 7000 Jahre seit Beginn seiner Reise vergangen! Wieso aber heben sich beide Effekte nicht gegenseitig auf? Der Astronaut war vor seinem Start im selben, ruhenden Bezugssystem wie wir. Während nun unsere Zeit normal verläuft, verlangsamt sich sein Zeitfluss durch seinen Weltraumflug. Wenn er wieder in unser ruhendes Bezugssystem eintritt, ist ein großer Teil seiner Reisezeit gedehnt worden, nach obigem Beispiel dauerte eine seiner Bordsekunden 7000 Erdsekunden. Weil unsere Zeit somit viel schneller verging, findet er uns nur noch im "Methusalem- Outfit" bei seiner Rückkehr vor.

Wir können die Bewegung auch durch Gravitation ersetzen, um denselben Effekt zu erzielen. Dazu lassen wir unseren (armen!) Astronauten in ein Schwarzes Loch steigen und beobachten ihn aus sicherer Entfernung. Je näher er dem Ereignishorizont kommt, umso langsamer sehen wir seine Uhr gehen. Berührt er den Ereignishorizont, so wird die letzte Sekunde, bevor er in das Loch fällt, unendlich gedehnt. Wir müssten also unendlich lange warten, um ihn darin verschwinden zu sehen. Schonen wir lieber den armen Astronauten und verwenden unsere Zeit sinnvoller!

Zeit ist Privatsache

Wir sehen also, dass die Zeit in verschiedenen Bezugssystemen eine völlig andere Rolle spielen kann, wenn diese sich zueinander bewegen oder von unterschiedlichen Gravitationsfeldern beeinflusst werden.

Aber gibt es denn nicht eine für alle Objekte im Kosmos gültige Zeit? Nein, es gibt keine **absolute Zeit** wie sie vormalig von Newton definiert wurde. Es ist nirgendwo im All eine große Uhr aufgehängt, deren Zeit für alle Lebewesen und für jeden beliebigen Ort maßgebend ist. Zeit ist eine reine *Privatangelegenheit*, denn alle Bezugssysteme unterscheiden sich voneinander. Der Mann, der mit seinem Auto auf der Autobahn fährt, hat eine andere Zeit als seine Frau zu Hause in der Küche. Die Uhr des Reisenden im Zug geht anders als die eines am Bahnhof wartenden Passanten.

Dennoch gibt es so etwas wie eine **Kosmische Zeit**. Diese begann ja mit dem Urknall und kann vermutlich unendlich lang weiterführen. Es ist die Zeit unseres Universums, und wir erleben wahrscheinlich gerade seine "Kindheit", denn es ist "erst" etwa 13,7 Milliarden Jahre alt.

Das GPS- System

Eine aktuelle Anwendung der Relativitätstheorie findet man im **GPS**- Satelliten-Navigationssystem (**Global Positioning System**). Hierzu befinden sich 24 Satelliten in 20 000 [km] Höhe über der Erde und senden Signale herunter. Unser Empfänger kennt die Laufzeit des Signals und kann daraus die Position ableiten. Nun geht aber die Uhr des Empfängers langsamer als die der Satelliten, weil sie einer stärkeren Erdanziehung ausgesetzt ist. Diesen relativistischen Effekt muss der Empfänger korrigieren. Verrechnet er sich nur um eine Millionstel Sekunde, so ergibt sich bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit der Funksignale von rund 300 000 [km/s] bereits ein Fehler von 300 [m]!

Der Empfänger muss aber noch mehr wissen:

Die Satelliten umkreisen die Erde nicht auf exakten Kreisbahnen und "spüren" daher unterschiedliche Stärken des Gravitationsfeldes. Das beeinflusst ihre Uhren unterschiedlich. Der Raum um die Erde wird von ihrem Gravitationsfeld gekrümmt, das verändert den Weg der Signale. Und zum Schluss drehen sich Satellit und Empfänger relativ zueinander wegen der Erdrotation.

Würde man alle diese Effekte nicht berücksichtigen, so käme am Ende eine Abweichung von mehreren Kilometern zustande! Zum Glück kann man sie aber berechnen und kann sich über die hohe Genauigkeit des GPS- Systems freuen.

Weitere Informationen zum GPS- System:

<http://www.darc.de/distrikte/u/07/html/learn/gps.htm#gps>

Zeitreisen

[Zeitreisen - wozu?](#)

[Auf zum Milchstraßenzentrum!](#)

[High Speed Zeitreisen](#)

[Tiplers Bauplan einer Zeitmaschine](#)

[Natürliche Zeitmaschinen](#)

[Gödels Zeitmaschine](#)

[Zeitreisen eiskalt](#)

Zeitreisen - wozu?

Eine Reise durch die Zeit unternimmt ständig jeder von uns: In jedem Augenblick machen wir einen Schritt in die Zukunft. Doch sind wir fest an den stetigen Fluss der Zeit gebunden, wir können weder schneller vor geschweige denn zurück in der Zeit gehen. Wer von uns hat aber nicht schon davon geträumt, einmal in die Zukunft zu reisen, um mit den Lottozahlen der nächsten Ziehungen zurück zu kehren und damit seinem Glück ein wenig nachzuhelfen?

In der Trilogie [Zurück in die Zukunft](#) wurde Ähnliches sehr schön dargestellt. Mancher Zeitgenosse finsternen Sinnes dachte vielleicht auch schon daran, in die Vergangenheit zu reisen um den eigenen Großvater zu ermorden. Wer solche Missetat plant hat bereits das erste Problem: Er kommt mit der [Kausalität](#) in ärgsten Konflikt! Denn wenn der Großvater zu früh stirbt, kann er nicht den Vater des Bösewichtes zeugen, womit dieser dann auch selbst nicht existiert und die Zeitreise gar nicht unternehmen kann. Es ist also gar nicht so einfach, Reisen in der Zeit durchzuführen, zumindest wenn man durch sie die Ereignisse der Gegenwart nachhaltig beeinflussen will. Aber fragen wir uns zunächst: Sind Zeitreisen überhaupt grundsätzlich möglich?



Auf zum Milchstraßenzentrum!

Im Prinzip ja, würde sicher die Antwort von [Radio Eriwan](#) auf unsere Frage lauten. Es gibt tatsächlich eine recht einfache Methode, in der Zeit zu reisen. Man braucht dazu nicht mehr als ein supermassives Schwarzes Loch, etwa von der Größe, wie es im Zentrum der Milchstraße zu finden ist. Hier kann man seine Rakete vorsichtig auf eine stabile Umlaufbahn möglichst nahe dem Ereignishorizont manövrieren, so dass die Gezeitenkräfte durchaus noch erträglich bleiben. Bei einem stellaren Schwarzen Loch wäre das nicht möglich. Der Ereignishorizont liegt viel näher zur Singularität, so dass die Gezeitenkräfte hier mörderisch wirken und jeden sich nähernden Astronauten zerreißen würden.

Unser Astronaut umkreist nun also munter das Milchstraßenzentrum, während seine Kollegen in einer Parkposition weit draußen warten. Was geschieht nun? Wenn die Kollegen die Uhr des Astronauten beobachten sehen sie, dass dessen Zeiger sich immer langsamer bewegen, je näher er dem Ereignishorizont kommt. Der Astronaut sieht das allerdings anders: Für ihn geht seine Uhr vollkommen normal, aber er kann erkennen, wie seine Kollegen von Minute zu Minute altern. Ja er sieht den ganzen Kosmos sich schnell entwickeln! Wenn der Astronaut sich nah genug am Horizont des Schwarzen Lochs und lange genug dort aufhält, wird er bei seiner Rückkehr die Beobachter-Kollegen nicht mehr kennen, denn hier haben inzwischen schon mehrere Generationen von Beobachtern ausharren müssen...

High Speed Zeitreisen

Zeit wird also durch Gravitation verlangsamt, wie wir schon wissen. Wenn unser Astronaut seinen Orbit verlässt und zurück kehrt, hat er eine Reise in die Zukunft unternommen. Die ist allerdings *irreversibel* (nicht umkehrbar), er kann also nicht zurück zu dem Zeitpunkt, an dem er seine Reise antrat. Die Geschichte hat aber noch einen anderen Haken: Das zentrale Schwarze Loch der Milchstraße ist rund 28 000 Lichtjahre entfernt. So alt wird kein Astronaut, um auf normalem Weg dorthin zu gelangen.

Allerdings könnte man sich die weite Reise auch sparen. Denn denselben Effekt kann man erzielen, wenn man sich mit großen Geschwindigkeiten bewegt. Mit einem geeigneten Antrieb kann der Astronaut in Bereichen nahe der Lichtgeschwindigkeit umherfliegen, in denen dann die [Zeitdilatation](#) voll zum Tragen kommt. Wenn er zur Erde heimkehrt, wird er wiederum auf diese Weise eine irreversible Reise in die Zukunft gemacht haben. Doch könnte er wenigstens zu Lebzeiten das zentrale Schwarze Loch erreichen, um noch weiter in die Zukunft zu gelangen.

Auf diese Weise wird es aber leider nichts mit unserem Lottogewinn, da wir nicht in unsere Ausgangszeit zurück können. Auch der Großvater kann beruhigt sein Leben fristen, da niemand auf solchen Wegen in die Vergangenheit gelangt. Doch vielleicht sollte er sich doch nicht zu früh freuen...?

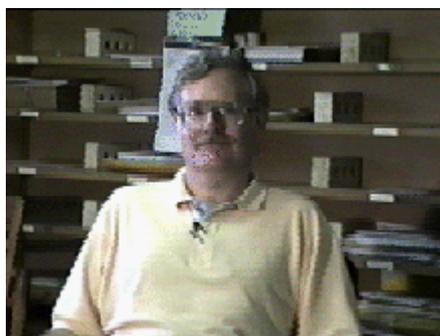
Tiplers Bauplan einer Zeitmaschine

Man nehme Materie von mindestens 10 Sonnenmassen, besser noch von der Masse der gesamten Milchstraße und presse sie zu einem extrem dünnen Zylinder zusammen, in etwa so, als würde man ein Schwarzes Loch durch eine Spaghettimaschine quetschen.

Diesen versetze man dann in hyperschnelle, relativistische Rotation, und schon hat man eine Zeitmaschine, mit welcher man in die Zukunft *und* in die Vergangenheit reisen kann.

Man muss nur in möglichst geringem Abstand vorsichtig die rotierende "Nudel" umkreisen, und je nachdem, ob man sich mit oder gegen die Rotationsrichtung bewegt, geht man in der Zeit vor oder zurück.

Der amerikanische Professor für Physik und Mathematik [Frank J. Tipler](#) hat bereits 1974 einen Artikel veröffentlicht, in welchem er [globale Kausalitätsverletzungen](#) durch einen rotierenden Zylinder beschrieb. Die Allgemeine Relativitätstheorie, so Tipler, lässt es zu, dass ein Teilchen durch die umgebende Raumzeit einer Singularität läuft und dabei zur selben Zeit an seinen Startpunkt wie bei seiner Abreise wieder ankommt. Anders gesagt, es müsste zweimal durch ein [Wormloch](#) laufen und würde so eine zeitartige Schleife bilden. Aber der Weg durch eine Singularität ist nicht ganz ohne Gefahren, realistischer wäre daher die Anfertigung eines kompakten Zylinders. In seiner Umgebung ist die Raumzeit sinusförmig gekrümmt, so dass die Zeit schwingt und nicht mehr geradlinig von der Gegenwart zur Zukunft läuft.



Die Zeit in der Umgebung eines solchen Zylinders wird also schwingen und ein Körper, der sich sehr vorsichtig nähert, ist nicht zwangsläufig den unangenehmen Verformungen unterworfen wie bei einem Höllentrip durch eine Singularität.

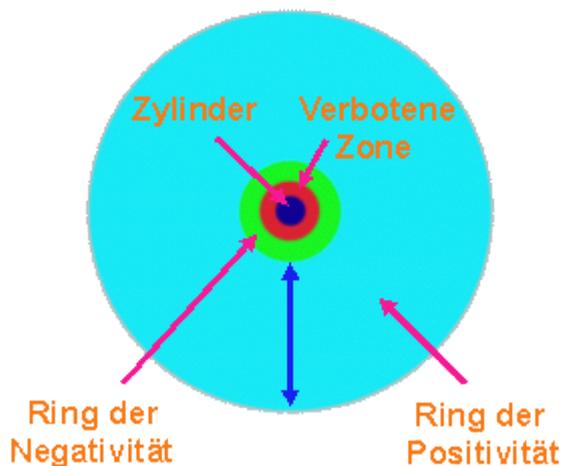


Solch ein Zylinder sollte theoretisch unendlich lang sein, was natürlich praktisch unmöglich ist.

Das Rezept Tipler's zur Herstellung einer tatsächlich funktionierenden Zeitmaschine klingt dennoch recht einfach: Man nehme etwa 200 [Neutronensterne](#) (es darf gerne auch etwas mehr sein!), deren Materie für unseren Zweck genügend kompakt ist, und ordne sie in einer Reihe an. So ergibt sich ein Zylinder von rund 20 km Durchmesser und mindestens 4000 km Länge. Damit keine unbekanntem negativen Einflüsse auf die Milchstraße entstehen, sollte man das Gerät außerhalb der Galaxie aufbauen. Nun muss man

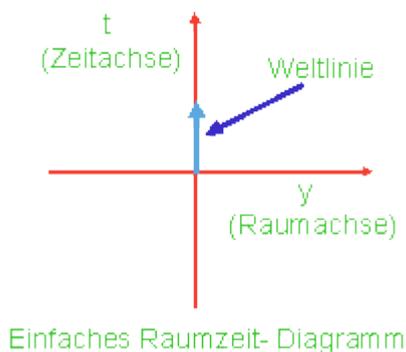
"nur" noch die Rotation der Neutronensterne synchronisieren und sie soweit auf Trab bringen, dass sie wenigstens auf halbe Lichtgeschwindigkeit kommt, da sonst die Gefahr besteht, dass der Zylinder kollabiert oder explodiert.

Tipler prognostiziert nun, dass man sich auf einem sehr sorgfältig ausgewähltem spiraligen Kurs der Mitte des Zylinders nähern und in die verschiedenen Zeitzonen eintauchen kann. Je nachdem, wie schnell und wo man in diese Zonen gelangt, kann man beliebig weit in der Zeit vor- und zurückgehen oder sogar sich plötzlich in einer entfernten Galaxie wiederfinden. Um nicht in die chaosartig ineinander verwirbelte Raumzeit zu gelangen, muss man allerdings einen (sehr!) großen Bogen um die Enden des Zylinders machen, hier wäre jeder Aufenthalt absolut tödlich. Hält man sich aber nur in der Mitte des Zylinders auf, könnte man eine gute Chance zum Überleben des Abenteuers haben.

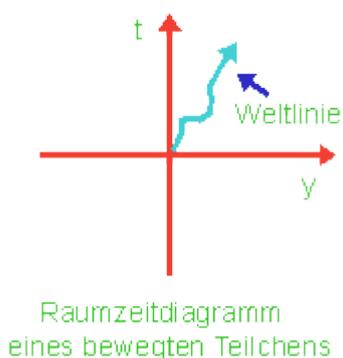


Im Querschnitt sieht man die Raumzeit-Umgebung des Zylinders. Direkt neben dem Zylinder befindet sich die "Verbotene Zone" (rot), hier wäre ein Aufenthalt schon aufgrund der enormen Gezeitenkräfte absolut tödlich. Wenn man in den grünen Ring eintaucht, begibt man sich in die Vergangenheit. Entsprechend weist der hellblaue Ring der Positivität den Bereich aus, in welchem eine Zeitreise in die Zukunft möglich ist.

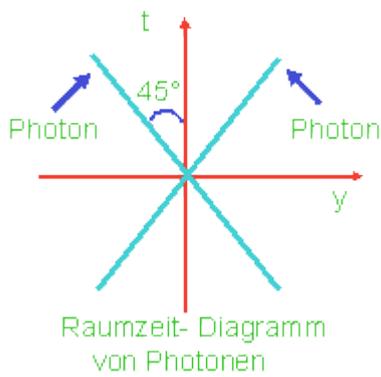
Wie kommt Tipler nun eigentlich zu seiner Überzeugung, dass eine solche "Maschine" in der Tat Zeitreisen ermöglichen könnte? Um das zu verstehen, beschäftigen wir uns ein wenig mit der Allgemeinen Relativitätstheorie:



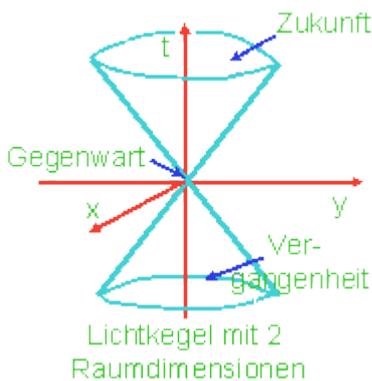
Um Bewegungen innerhalb der Raumzeit darzustellen, verwendet man vereinfachte Diagramme. Man benutzt eine senkrechte Achse, um Bewegungen in der Zeit darzustellen (t), die waagerechte (y) dient uns zur Veranschaulichung von Bewegungen in den 3 Raumdimensionen gleichzeitig (wir lassen die 3 Raumdimensionen zu einer einzigen schrumpfen). Das Diagramm ist nicht ganz realistisch, aber es wäre enorm schwierig, wollte man alle 4 Dimensionen darstellen. Blau dargestellt ist ein unbewegtes Teilchen. Da es sich nicht in Bezug auf einen Beobachter im Raum bewegt, sehen wir nur eine Bewegung senkrecht die Zeitachse hinauf.



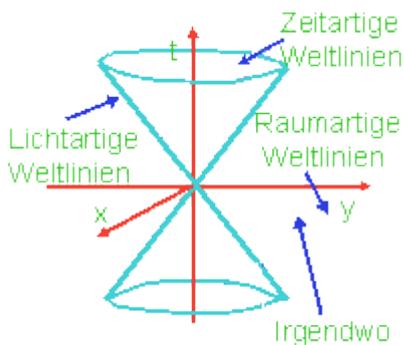
In dieser Darstellung sieht man nun, wie sich ein Teilchen in der Raumzeit bewegt. Wenn es eine gleichmäßige Geschwindigkeit hat, ergibt sich eine schräg ansteigende gerade Linie. Durch beschleunigte oder verzögerte Bewegung erhält man eine Kurve. Bei Beschleunigung bewegt sich die Kurve von der Zeitachse weg, durch Abbremsen wieder auf sie zu. Solche Linien, ob Kurven oder Geraden innerhalb der Raumzeit nennt man **Weltlinien**. Eine Weltlinie repräsentiert also den Weg eines Teilchens oder von etwas anderem (z.B. einem Menschen) durch die vierdimensionale Raumzeit.



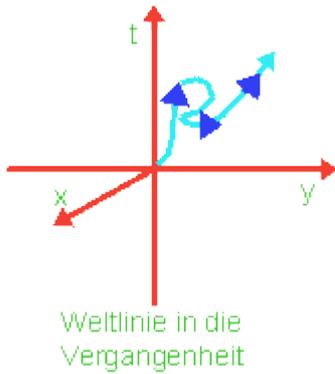
In diesem Diagramm sieht man die Weltlinien von Photonen. Wenn man das Diagramm der Realität entsprechend gestaltet, wird die Zeitachse in Sekunden unterteilt und die Raumachse in Lichtsekunden (die Strecke, die das Licht in 1 [s] zurücklegt, also 300 000 [km]). Eingezeichnet sind jetzt die Weltlinien von Photonen, sie steigen in einem Winkel von 45° an. Größer kann dieser Winkel niemals werden, sonst hätten die Teilchen mehr als Lichtgeschwindigkeit! Alles, was rechts oder links dieser Weltlinien liegt, bleibt für immer unerreichbar. Diesen Bereich bezeichnen wir einfach als "Irgendwo".



In dieses Diagramm wurde eine zweite Raumdimension (x) eingezeichnet. Hierdurch ergibt sich ein kegelförmiges Aussehen der Weltlinien, man nennt deshalb diese Weltlinien auch **Lichtkegel**. Wenn wir die Lichtgeschwindigkeit als obere Grenze akzeptieren, liegen alle anderen Weltlinien innerhalb dieses Lichtkegel. Doch man sieht noch mehr in diesem Diagramm: Am Kreuzungspunkt der Koordinatenlinien, also im Nullpunkt (t, x, y = 0), liegt die Gegenwart. Nach oben hin öffnet sich der Zukunftslichtkegel, nach unten geht es in die Vergangenheit. Wichtig hierbei ist zu wissen, dass jeder Punkt in der Raumzeit einen eigenen Lichtkegel aufweist!

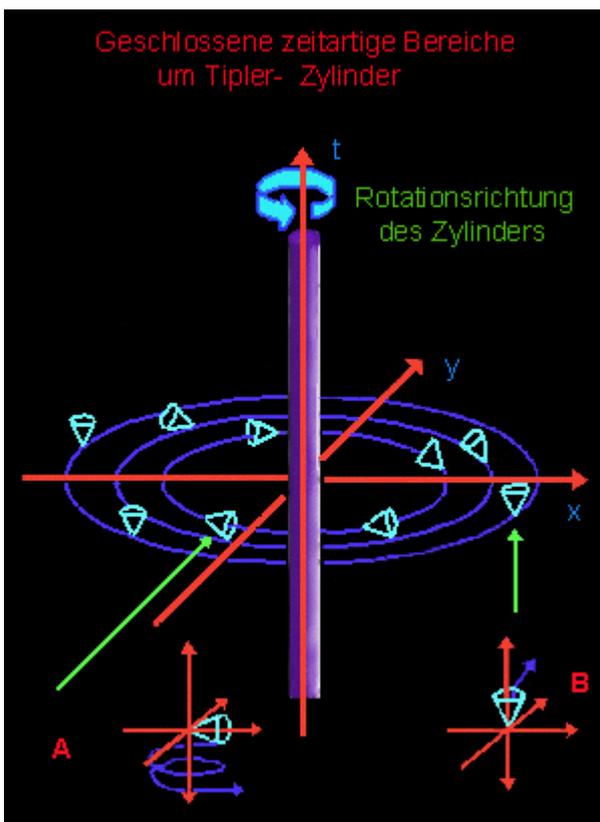


Ein Teilchen, welches sich unterhalb der Lichtgeschwindigkeit bewegt, kann also jede Weltlinie innerhalb des Zukunftskegels als auch des Vergangenheitskegels einnehmen. Man nennt diese Bereiche auch **zeitartig**, weil die Zeit in jedem Moment des Teilchens eine Rolle spielt. Den Bereich außerhalb der Kegel bezeichnet man als **raumartig**, er ist solchen Teilchen wie **Tachyonen** vorbehalten, oder entspricht anderen Universen. Sie sind uns nicht zugänglich, die **Zeit** ist hier **imaginär**. Wie gesagt nennt man die Bereiche außerhalb der Lichtkegel auch einfach "Irgendwo". Liegt die Weltlinie direkt auf der Kegelfläche, stimmt also mit der eines Photons überein, nennt man sie lichtartig. Diese Weltlinie hat immer eine Steigung von 45°, und das Teilchen bewegt sich mit **c**.



Raumzeitdiagramme zeigen uns auch, wie sich ein Teilchen in die Vergangenheit bewegen kann. Ereignisse folgen immer eins auf das andere und liegen daher nacheinander auf der Weltlinie, die stets von der Gegenwart in die Zukunft weist. Aber wie kann es sein, dass man trotz Bewegung mit weniger als c in die Vergangenheit geraten könnte? Man sieht im Diagramm eine Weltlinie, die fast in sich gekrümmt ist, wo also ein Ereignis wieder dann eintritt, als es in der Vergangenheit begann. Wie aber könnte eine Weltlinie so verbogen werden? Die Allgemeine Relativitätstheorie hat uns hierzu gezeigt, dass z.B. starke Gravitationsfelder die Raumzeit krümmen. Oder anders ausgedrückt, der Lichtkegel, in welchem sich Teilchen oder Mensch befinden, wird durch diese Krümmung geneigt oder gar gekippt (kleine dunkelblaue Kegel im Diagramm). Wenn demnach Teilchen oder Menschen eine derart stark gekrümmte Raumzeit durchlaufen, könnten sie tatsächlich in die Vergangenheit geraten! Und das, ohne gegen mathematische oder physikalische Gesetze zu verstoßen, und es ist dazu keine Überlichtgeschwindigkeit erforderlich.

Nun betrachten wir noch einmal den Zylinder, der mit mindestens halber Lichtgeschwindigkeit rotieren muss, damit genügend Fliehkräfte erzeugt werden und er nicht unter der eigenen Gravitation zusammen bricht.



Je näher man dem Zylinder kommt, umso mehr wird die umgebende Raumzeit mitgerissen. Weit außerhalb ist noch alles recht "normal", die Raumzeit ist flach und kaum verzerrt, und die Lichtkegel stehen senkrecht im Diagramm (Detail B). Die Zeit verläuft wie gewohnt von der Gegenwart in die Zukunft. Eingezeichnet sind der Übersichtlichkeit halber nur die Zukunftslichtkegel. Wenn man nun weiter vordringt, sieht ein außenstehender Beobachter, dass die Zeit immer mehr durch die Gravitation verlangsamt wird (ähnlich der Annäherung an den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs, siehe weiter oben). Hier würde ein Astronaut in die Zukunft reisen. Je weiter man aber nach innen kommt, um so mehr neigen sich die Kegel, bis sie sich schließlich bei einem Winkel von über 45° überschneiden (Detail A). Sie kippen über die x,y - Koordinaten in den negativen Zeitbereich, Raum und Zeit tauschen ihre Rollen.

Es bildet sich eine geschlossene zeitartige Schleife um den Zylinder, ein Zeitreisender kann mit einer Rakete von Lichtkegel zu Lichtkegel gelangen, ohne dass hierzu Geschwindigkeiten über der des Lichts erforderlich wären. Er kann durch vorsichtiges Navigieren auf spiralförmigen Bahnen beliebig rückwärts durch die Zeit reisen, muss aber peinlich darauf Acht geben, dem Zylinder nicht zu nahe zu kommen. Allerdings kann er maximal nur bis zu dem Zeitpunkt zurück, an welchem die Zeitmaschine geschaffen wurde.

Der Traum, dem Bau der Pyramiden in Ägypten zuzusehen bleibt daher unerfüllt. Anders ist es mit der Zukunftsreise: sie kann beliebig weit in die Zukunft gehen, und dazu muss der Zylinder sogar nur einen kurzen Moment stabil sein.

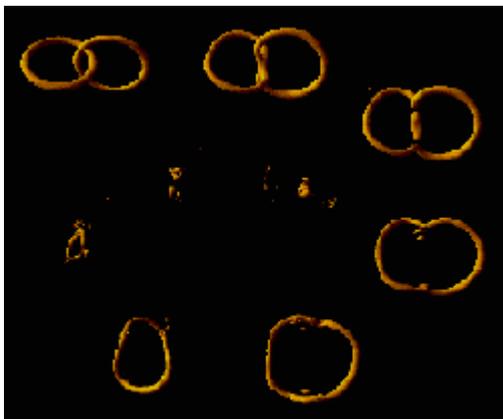
Wie realistisch ist nun dieser Tipler-Zylinder? Mathematisch und physikalisch gesehen sind Zeitreisen zulässig. Tiplers Berechnungen haben noch heute ihre Gültigkeit und wurden von anderen Physikern bestätigt und verfeinert, die beschriebene Zeitmaschine würde tatsächlich funktionieren. Aber es gibt schier unüberwindbare Probleme, wollte man wenigstens 10 oder 20 Neutronensterne zusammenschalten. Die erste Schwierigkeit ist, sie über große Entfernungen transportieren zu müssen. Selbst wenn das einer Superzivilisation gelingen könnte, stände sie doch vor der unlösbaren Aufgabe, die Sterne vor dem Kollaps zu bewahren. Die ungeheure Gravitation würde sie sofort vereinigen und zu einem einzigen Schwarzen Loch kollabieren lassen, bevor noch die erforderliche superschnelle Rotation eingestellt werden könnte. Und wer wollte 20 oder gar 200 Neutronensterne dazu bringen, synchron mit mehreren Milliarden Umdrehungen pro Minute zu rotieren?

Die Allgemeine Relativitätstheorie birgt vielleicht noch manches Geheimnis, dessen Entdeckung uns dennoch irgendwann Reisen in der Zeit und vor allem auch in interstellaren Distanzen erlauben wird.

Natürliche Zeitmaschinen

Eine bessere Ausgabe des Tipler- Zylinders könnte sogar in der Natur vorkommen, so dass man sich die Mühe zum Einfang der Neutronensterne ersparen kann: [kosmische Strings!](#)

Zwar sind dies bislang rein theoretische Gebilde, die aber quasi als Überbleibsel des Urknalls durchaus existieren könnten.



Schleifen kosmischer Strings könnten sich zusammenlagern und dabei Energie in Form von Gravitationswellen verlieren, wie hier in einer Simulation von [Richard Battye](#) und [Paul Shellard](#). Trotz hoher innerer Spannung könnten sich Strings auflösen. Sie müssen aber nicht unbedingt in Form der hier gezeigten Schleifen vorliegen, sondern könnten auch Lichtjahre lange Fäden bilden. Dann wären sie genau passend für unsere Zeitmaschine.

Während ein Schwarzes Loch eine eindimensionale, punktförmige Singularität im Raumzeitkontinuum darstellt, ist ein kosmischer String zweidimensional. Zwar auch fast unendlich dünn, kann er sich aber über viele Lichtjahre weit erstrecken und hätte weitaus massivere Wirkungen auf die umgebende Raumzeit. Bis heute hat leider noch niemand einen kosmischen String nachgewiesen, das könnte aber vielleicht irgendwann über den [Gravitationslinseneffekt](#) gelingen. Sollten sie wirklich existieren, wären hochentwickelte Intelligenzen eventuell in der Lage, zwei kosmische Strings nebeneinander zu arrangieren, oder einen mit einem Schwarzen Loch zu koppeln. Noch besser wäre, könnte man zwei dieser Exoten mit hoher Geschwindigkeit aufeinander prallen lassen. Durch ein vorsichtiges Manöver in die Nähe des Geschehens würde man dann in die Lage versetzt, jeden Ort im All und zu jeder beliebigen Zeit zu besuchen. Sagt die Theorie...

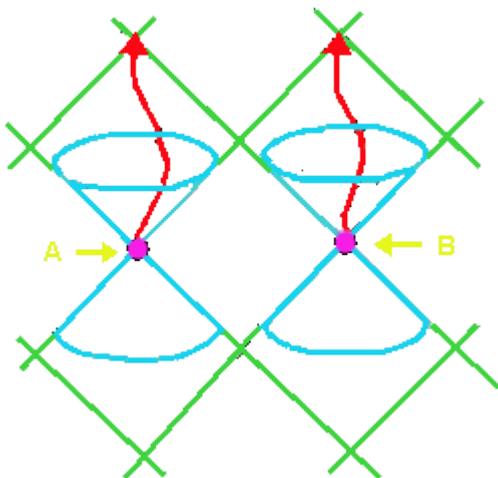
Gödels Zeitmaschine

Das Einsteins Relativitätstheorie grundsätzlich Zeitreisen nicht verbietet, bewies schon 1949 der Mathematiker **Kurt Gödel** (1906 bis 1978).



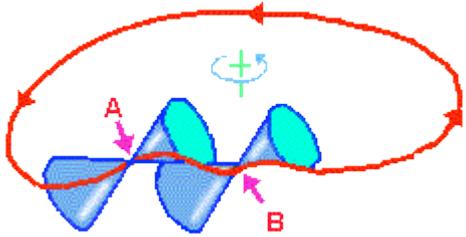
Zu Beginn der Nazi- Herrschaft emigrierte er in die USA, wo er als Professor in Princeton arbeitete und ihn eine innige Freundschaft mit Einstein verband. Während er neue Lösungen Einsteinscher Gleichungen fand kam ihm der Gedanke, dass der Kosmos rotieren könnte. Die Schwerkraft, die das Universum zusammenhält und vielleicht eines Tages wieder zu dessen Kollaps führt, könnte durch eine Zentrifugalkraft ausgeglichen werden. Wenn das der Fall ist, muss nicht zwangsläufig ein beobachtbares Rotationszentrum existieren, sondern jeder beliebige Beobachter im All sieht das Universum um sich herum rotieren. Genauso, wie sich alles von jedem Beobachter durch die Expansion entfernt.

Wenn massive Objekte rotieren, das haben wir schon bei den [Schwarzen Löchern](#) gesehen, ziehen sie die umgebende Raumzeit in dieser Rotation mit. Das macht jeder sich drehende Körper, aber dieser Effekt ist bei sehr kleinen Massen, wie z.B. derjenigen der Erde, kaum nachweisbar. Sollte aber das Universum rotieren, könnten die Auswirkungen auf die Raumzeit sehr ausgeprägt sein.



Betrachten wir hierzu noch einmal zwei Lichtkegel. Jedem Punkt in der Raumzeit kommt ein eigener Lichtkegel zu (nach oben öffnet sich jeweils der Zukunftskegel, nach unten geht es in die Vergangenheit). Zwei entfernte Ereignisse **A** und **B** können nichts voneinander erfahren (ihre Weltlinien sind nochmals rot angedeutet). Erst wenn sich in der Zukunft die Lichtkegel überschneiden, können die Beobachter **A** und **B** Informationen voneinander erhalten. Wenn z.B. jetzt im Augenblick eine Supernova in der Andromeda- Galaxie explodiert, können wir erst in $2\frac{1}{2}$ Millionen Jahren davon erfahren, nämlich erst wenn sich dann unsere Lichtkegel überlappen.

Falls wir in einem rotierenden Universum leben, könnten die Lichtkegel durch die in der Rotation mitgerissene Raumzeit geneigt oder sogar gekippt werden.



Sollte das geschehen, dann kann ein Beobachter von **A** nach **B** gelangen, ohne dass hierzu Überlichtgeschwindigkeit erforderlich wäre. Mehr noch, das ganze Universum könnte von einer umlaufenden Reihe gekippter Lichtkegel auf einer geschlossenen zeitartigen Schleife umspannt sein! Ein Beobachter wäre so imstande, von **A** ausgehend das ganze Universum zu durchlaufen und exakt zu seiner eigenen Startzeit wieder am Ausgangspunkt anzukommen. Das ganze Universum könnte nach Gödels Ansicht eine riesige Zeitmaschine sein.

Aber auch diese Sache hat leider einen Haken:

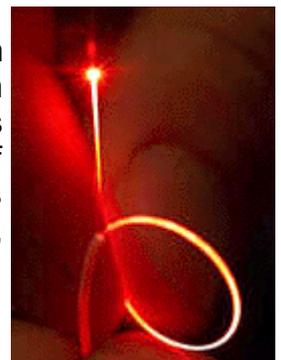
Falls sich wirklich eine zeitartige Schleife ausbildet, muss der Kosmos etwa eine Umdrehung in 70 Millionen Jahren machen. Wir können nur schwerlich eine Rotation nachweisen, falls sie aber stattfindet, ist diese Geschwindigkeit viel zu schnell und damit eher unwahrscheinlich. Und bei einem Alter des Universums von 13,7 Milliarden Jahren würde die kürzeste zeitartige Schleife einen Umfang von etwa 100 Milliarden Lichtjahren haben. Es wäre damit eine recht langweilige Zeitmaschine!

Dennoch geht auch aus Gödels Gleichungen hervor, dass die Relativitätstheorie Zeitreisen durchaus gestattet. Und aus seinen Berechnungen folgt, dass große rotierende Massen die Raumzeit mitreißen und dadurch Lichtkegel kippen können und geschlossene zeitartige Schleifen entstehen. Wie schon weiter oben gesehen, hat das Tipler auch für seine Maschine genutzt. Gegen das Gödel- Universum spricht zudem noch die Erkenntnis, dass ein expandierender Kosmos nicht rotieren kann. Dessen ungeachtet wird Gödels Modell immer wieder zu Betrachtungen über die Möglichkeit von Zeitreisen zu Rate gezogen.

Zeitreisen eiskalt

Wie Sie vielleicht schon dem Abschnitt über [Wurmlöcher](#) entnehmen konnten, sind solche Gebilde ebenfalls bestens als Zeitmaschine geeignet. Dass es aber noch einfacher geht, will Prof. **Ronald Mallett**, ein (vielleicht nicht ganz ernst zu nehmender?) theoretischer Physiker, beweisen: Er lässt das Licht eines Lasers im Kreis zirkulieren. Zwar hat Licht keine Masse, aber es soll seinen Berechnungen nach im Quantenbereich ebenfalls Auswirkungen auf die Raumzeit haben. Er hat schon nachgewiesen, dass zirkulierendes Licht in seiner Umgebung eine Art Strudel hervorruft.

Nun will Mallett den Strudel auf die Zeit ausdehnen, indem er einen zweiten Laser gegenläufig einsetzt. Das Problem, das sich aus seinen Formeln ergibt, liegt in den extrem hohen Energieverbräuchen. Doch auch hierzu hat der Wissenschaftler eine Lösung parat: Er will das Licht durch ultrakalte Substanzen nahe dem absoluten Nullpunkt auf Schritt- Tempo verlangsamen (was tatsächlich funktioniert). Malletts Zeitmaschine scheint daher vorerst weniger für eher warmblütige, zeitreisewillige Menschen geeignet zu sein. Er will auch erst klein beginnen und das Verhalten einzelner Atome untersuchen.



Hintergrund seines Forschungstriebes ist sein im Alter von 33 Jahren zu früh verstorbener Vater, der sich allzu sehr dem Zigaretten- und Alkoholkonsum gewidmet hatte. Mallett will ihn nun nachträglich davon abhalten...

Man sieht, es ist nicht sehr einfach mit unseren irdischen Mitteln durch die Zeit zu reisen. Von der Vorstellung, wie sie in manchen Filmen oder der SF- Literatur dargestellt wird, dass man sich in eine "Maschine" setzt, die Zeit einstellt und die Reise schon beginnen kann, muss man sich ein für alle Mal trennen. Möglicherweise werden sich in der Zukunft ungeahnte Tore öffnen, von denen wir heute noch nichts wissen. Jedoch bleibt dann die Frage offen, wenn Zeitreisen wirklich von Physik und Mathematik erlaubt sind, warum wir noch keinen Besuch aus der Zukunft bekamen! So bleibt uns vorerst nur die Hoffnung, dass eines Tages **Doc Emmitt Brown** den *Flux- Kompensator* entwickelt und diesen in einen DeLorean einbaut. Zumindest wäre dies eine attraktive und ansprechende Methode, Reisen auf angenehme Weise in die Zeit zu unternehmen!



Der Raum

Was ist Raum?

Minkowski- Raum

Raumzeit

Krümmungen

Raumstauchung!

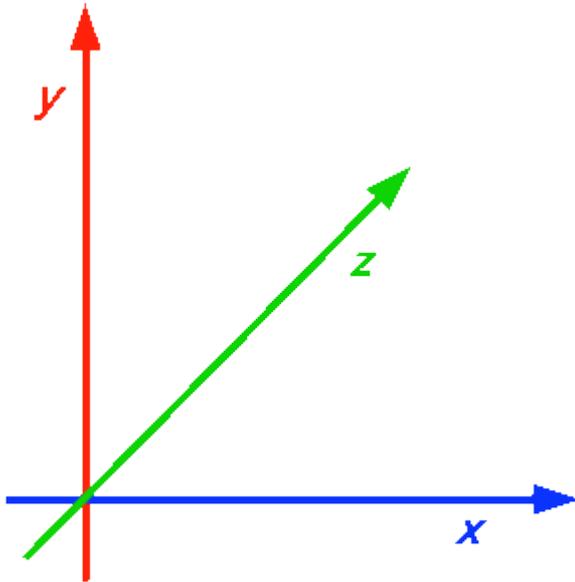
Was ist Raum?

Das, was wir heute unter Raum verstehen, entstand erst mit dem Urknall. Und mit diesem Ereignis begann auch die Zeit, es war die Geburtsstunde unseres Kosmos. Wir wissen heute, dass vor etwa 13,7 Milliarden Jahren alle Materie des Kosmos wahrscheinlich aus einem Punkt unendlicher Dichte entstand, so sagt es uns das Standardmodell des Urknalls. Erst mit der explosionsartigen Ausdehnung konnte sich der uns geläufige Raum entfalten. Aufgrund unserer Beobachtungen ist es nicht möglich auf Ereignisse zu schließen, die vor diesem Zeitpunkt stattfanden. Deshalb ist es völlig sinnlos darüber zu spekulieren, was vor diesem Zeitpunkt gewesen sein könnte. Denn Ereignisse vor dieser unserer Zeit können in keiner Weise einen Einfluss auf die Entwicklung des Universums haben, und so ist die Frage, ob es vorher schon Raum (oder Zeit) gab, absolut unbeantwortbar. Verschiedene Hypothesen deuten zwar darauf hin, dass unser Universum aus einer Fluktuation, einer plötzlichen Schwankung des Zustandes eines übergeordneten Universums ("*Multiversum*", "*Hyperraum*") entstand. Was immer man darunter verstehen mag, bleibt dies vorerst nicht mehr als Spekulation. Hier wollen wir nun versuchen, ein wenig "Licht" in das Wesen des uns scheinbar so vertrauten Raums zu bringen.

Einstein formulierte einmal: *Da wo Materie oder Energie ist, da ist auch Raum*. Oder anders betrachtet: Erst durch die Anwesenheit von Materie und Energie spannt sich der Raum auf. So kam er auch zur folgerichtigen Feststellung:

Ein Raum ohne jegliche Materie ist sinnlos!

Eine weitere seiner Definitionen ist: *Raum ist da, wo sich Licht bewegt* (und Zeit ist, wie lange es sich bewegt). Seit **Euklid** (300 v. Chr.) wissen wir, dass eine Gerade die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten ist. Und bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts war man überzeugt, dass zwei Geraden als Parallele unendlich weit ins Universum verlaufen, ohne sich je zu schneiden. Deshalb sollte sich auch das Licht im Kosmos absolut geradlinig ausbreiten. Doch stimmt dies immer noch?



Die drei Dimensionen des euklidischen Raums stellt man im so genannten **kartesischen Koordinatensystem** dar. Alle 3 Raumachsen (Länge, Breite, Höhe) stehen senkrecht aufeinander. Jede Achse stellt eine Gerade dar, die sich grundsätzlich unendlich weit ins All erstreckt. Nehmen Sie sich einmal ein großes Blatt Papier, ein Lineal und einen Bleistift.

Nun zeichnen Sie eine hübsche Gerade auf und überlegen einmal, ob diese auch wirklich *gerade* ist. Denken Sie dabei an die Gestalt unseres Planeten...

Sicher sind Sie auch zu dem Ergebnis gekommen, dass diese schöne Gerade eigentlich eine "Krumme" sein müsste, denn wenn das Lineal lang genug wäre, würde nach rund 40 000 km die "Gerade" exakt wieder in ihren Ausgangspunkt laufen. Sie hätte dann nämlich die Erde umrundet und wäre ein Kreis! Jede Gerade, die wir auf der Erdoberfläche ziehen, ist Teil eines (Groß-) Kreises und man nennt sie deshalb nicht "Krumme", sondern **Geodäte** (siehe hierzu auch [Krumme Sachen](#)).

Halten wir also fest, dass Raum nur dort ist, wo auch Materie und/oder Energie anwesend sind, und wo sich Licht ausbreiten kann. Das aber gilt für unser gesamtes Universum! Gibt es denn nun überhaupt Geraden und damit Parallelen? Im Prinzip nicht, denn sie sind nur in einem Raum ohne Materie möglich. Jede Anwesenheit von Materie aber krümmt den Raum und daher muss alles was sich im Raum bewegt diesen Krümmungen folgen, selbst das Licht. Das Bild eines absolut euklidischen Raums sollte man also tunlichst aufgeben. Das gilt vor allem in Bereichen hoher Massedichten, in der Umgebung von Neutronensternen oder gar Schwarzen Löchern wirken sich die Raum (zeit)krümmungen z.T. verheerend aus. Großräumig gesehen, beispielsweise in den riesigen Leerräumen des Universums, spielen die Krümmungen keine bedeutende Rolle. Wir können sie vernachlässigen und von einer euklidischen, flachen Raumzeit ausgehen, solange wir von großen Skalen sprechen.

Sir Isaac Newton hatte seinerzeit den Raum als absolut bezeichnet, womit er meinte, dass der Raum durch nichts und niemand beeinflussbar und damit unveränderlich ist. Wir werden noch sehen, dass diese Aussage nicht mehr haltbar ist.

Minkowski- Raum

Hermann Minkowski (1864-1909), wie schon im Abschnitt über die [Zeit](#) angedeutet, war einer von Einsteins Professoren und ein sehr bedeutender deutscher Mathematiker seiner Zeit.



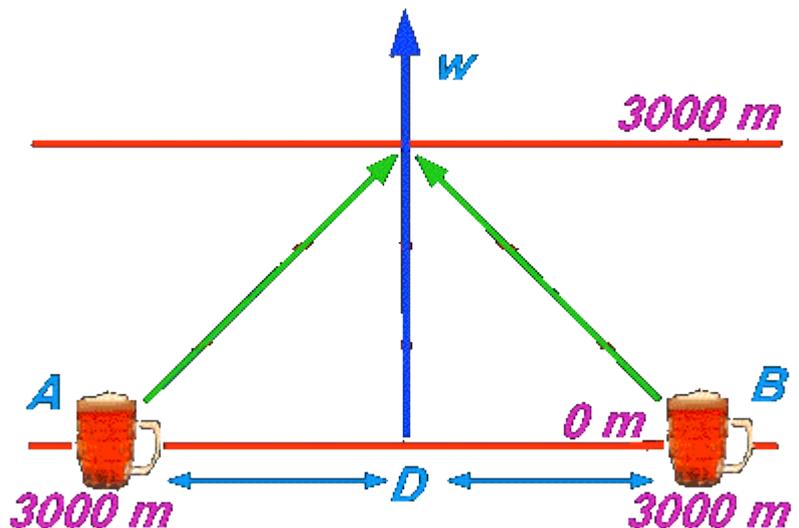
Unter vielen anderen Arbeiten ist er besonders bekannt geworden durch die Einführung einer vierten Dimension in den euklidischen Raum, weshalb man ihn heute kurzerhand als *Minkowski-Raum* bezeichnet.

Wenn in einer Nachbargalaxie eine Supernova explodiert, so werden wir erst dann eine Information über dieses Ereignis bekommen, wenn das Signal (*Licht*) die Distanz zu uns überbrückt hat. Das Licht (*die Information*) bewegt sich mit der Geschwindigkeit c durch den Raum und benötigt dazu die Zeit t . Damit ist $c \cdot t$ also die zeitliche Distanz des Ereignisses von unserem Standpunkt aus und genau genommen eine

Entfernungsangabe! Diese hat Minkowski als vierte Dimension w in den dreidimensionalen euklidischen Raum eingeführt und ist damit die Zeitdimension umgangen: $w = c \cdot t$. Ist so etwas gerechtfertigt? Wir wissen doch, dass alle unsere Empfindungen, unser Herzschlag, jedes Ereignis in unserem Leben in exakter zeitlicher Abfolge stattfinden. Das alles spielt sich in unserem Erfahrungsraum mit den 3 uns vertrauten Raumkoordinaten x , y , z ab. Nun soll noch eine Raumkoordinate hinzukommen, und die Zeit wird nicht mehr berücksichtigt?

Genau so ist Minkowski mit seiner neuen Ansicht des Raumes verfahren. Durch die Verwendung der vierten Dimension w braucht man nicht mehr die Zeit, um ein Ereignis im dreidimensionalen Raum zu beschreiben, sondern man gibt nur den Ort im vierdimensionalen Minkowski-Raum an. Folgendes, aus dem "harten" Leben gegriffene Beispiel mag dies verdeutlichen:

Ein Wanderer, nennen wir ihn treffend D (= *durstig*), irrt orientierungslos durch die Wüste und ist dem Tod durch Verdursten nah. Glücklicherweise melden sich auf seinem Handy gleich zwei Kneipenwirte, A und B , die jeweils genau 3 [km] von seinem Standort entfernt sind und bereits gezapft haben. Weil die Funkwellen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, treffen beide Signale (grüne Pfeile) den Wanderer, wenn er sich auf der w -Koordinate im Punkt

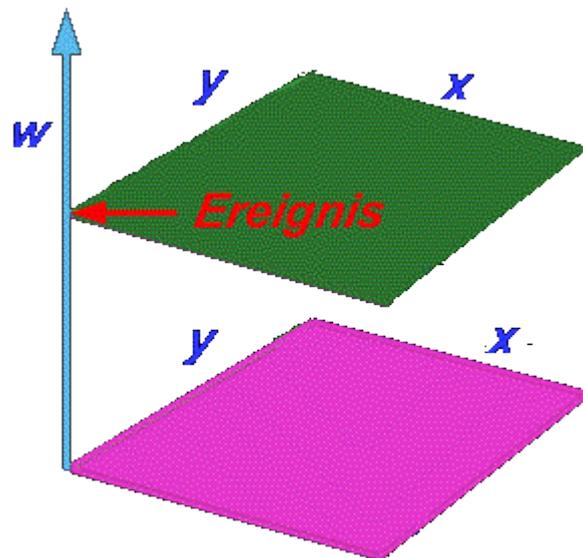


$w = 3000$ [m] befindet. In dem Moment, als beide Wirte das Bier fertig haben und die SMS gleichzeitig senden, befindet sich der Wanderer im Punkt D , hier aber sind beide Signale noch 3000 [m] von ihm entfernt. Er kann sie erst empfangen, wenn er sich im Minkowski-Raum auf der Koordinate w 3000 [m] weiter bewegt hat.

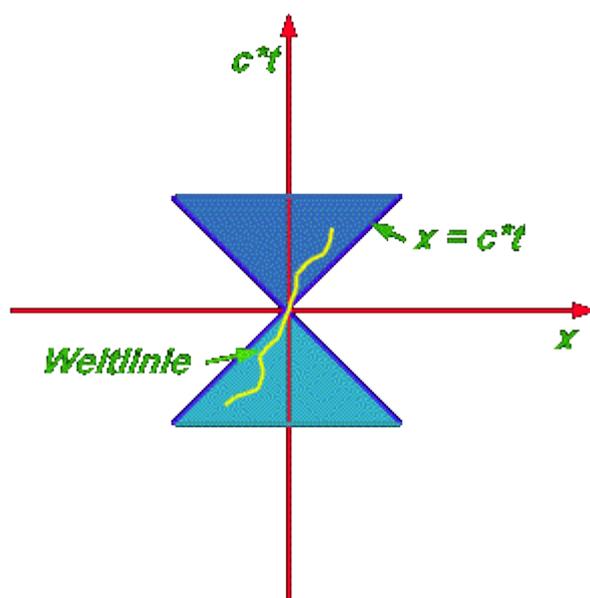
Wir erkennen, dass eine Zeitangabe zur Beschreibung dieses (wichtigen) Ereignisses keinesfalls erforderlich ist!

(Anmerkung: es ist hier nicht gefragt, für welchen Wirt sich der Wanderer entscheidet!)

Man kann also durchaus die Zeit und den Ort eines Ereignisses durch eine (vierdimensionale) Ortsangabe beschreiben. Wir leben in einem für uns verständlichen dreidimensionalen Erfahrungsraum und können uns sicher nicht vorstellen, wie dieser sich nach Minkowskis Ansicht mit Lichtgeschwindigkeit durch den vierdimensionalen Minkowski-Raum bewegt (selbst die umgekehrte Betrachtung ist erlaubt, dass der vierdimensionale Minkowski-Raum sich mit Lichtgeschwindigkeit durch unseren 3-dimensionalen Raum bewegt!). Wir können nichts wahrnehmen, was nicht momentan in unserem "Gegenwartsraum" existiert. Unser dreidimensionaler Raum bewegt sich entlang der w -Koordinate durch den Minkowski-Raum. Dargestellt sind nur 2 Dimensionen als Fläche. Wenn dieser dreidimensionale Raum einen bestimmten Punkt auf der w -Koordinate schneidet, findet ein Ereignis statt. Genau das ist unser "Gegenwartsraum", der in diesem Moment die selbe w -Koordinate hat wie der Minkowski-Raum. Alles, was darüber liegt, ist die Zukunft, unterhalb des Punktes liegt die Vergangenheit.



Vielleicht ist diese Art der Darstellung des Minkowski-Raums etwas anschaulicher. Dargestellt sind nur 2 Koordinaten, x und $ct = w$. Die Winkelhalbierende zwischen diesen Koordinaten ($x = ct$) entspricht dabei der Ausbreitung des Lichts. Diese Art der Darstellung nennt man **Lichtkegel**. Wenn man das Diagramm der Realität entsprechend gestaltet, und das ist hier der Fall, wird die zeitartige Achse (ct) in Sekunden unterteilt und die Raumachse (x) in Lichtsekunden (die Strecke, die das Licht in 1 s zurücklegt, also 300 000 [km]). Die Winkelhalbierende entspricht dann den so genannten **Weltlinien** von Photonen, sie steigen in einem Winkel von 45° an. Größer kann dieser Winkel niemals werden, sonst hätten die Teilchen mehr als Lichtgeschwindigkeit!



Alles, was sich außerhalb dieser Weltlinien befindet, bleibt für immer unerreichbar. Ereignisse, die dort stattfinden nennt man **raumartig**. Innerhalb der blauen Kegel liegen die **zeitartigen** Ereignisse. Sie können in irgendeinem Zusammenhang stehen, weil innerhalb der Kegel gilt

$x < ct$, was einfach bedeutet, dass sich nichts schneller als das Licht bewegt. Außerhalb der Kegel gilt $x > ct$, dieses "Irgendwo" ist für uns nicht mehr fassbar. Die Gegenwart liegt auf dem Schnittpunkt von x/ct , alles was oberhalb ist liegt in der Zukunft, unterhalb geht es in die Vergangenheit. Eingezeichnet ist noch eine Weltlinie, z.B. die eines Teilchens oder Menschen, welche sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch den Minkowski-Raum bewegen.

Vielleicht hat Minkowski bei der Bezeichnung des nach ihm benannten Raums einen Fehler gemacht, als er ihn nämlich ein raum- zeitliches Kontinuum nannte.

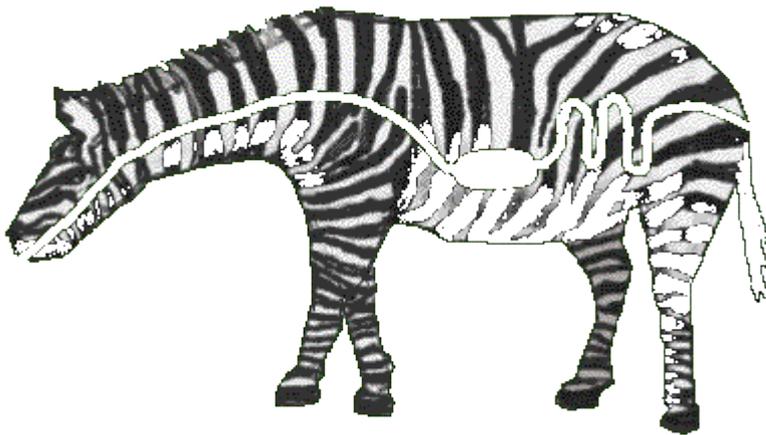
Haben wir doch gesehen, dass es sich bei der vierten Dimension um eine Längenangabe, und nicht um eine Zeitangabe handelt. Vielleicht war es jedoch auch Absicht von Minkowski als auch von Einstein, dass sie den Begriff beibehielten, weil dieser "Irrtum" keine praktische Auswirkung hat.

Raumzeit

Verlassen wir nun Minkowkis Raum und wenden uns wieder Einsteins vierdimensionaler Raumzeit zu. Wie schon oben erwähnt, ist nach unserem alltäglichen Empfinden der Raum dreidimensional, man kann durch jeden Punkt im Raum drei senkrecht zueinander stehende Koordinaten ziehen (Länge, Breite, Höhe), es ist ein **euklidischer Raum**. Albert Einstein hat uns in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie jedoch gezeigt, dass Raum und Zeit untrennbar miteinander zur vierdimensionalen Raumzeit verbunden sind.

Das ist im Grunde auch sehr einleuchtend und leicht zu verstehen: Stellen Sie sich einmal ein Universum ohne Zeit vor. Es wäre völlig fremdartig, denn darin gäbe es keine Entwicklung, ja man sagt, ein solcher Kosmos hat keine Geschichte! Nichts könnte sich hier bewegen, Wolken aus Gas und Staub könnten nicht zu Sternen kontrahieren, es gäbe weder Planeten noch Leben. Viel schlimmer noch, nicht nur dass es absolut finster und kalt wäre (es gäbe ja weder Licht noch Wärmebewegung von Molekülen), selbst Materie könnte nicht existieren. Denn die Elektronen um jeden Atomkern sind in ständiger Bewegung, das aber wäre in einem Universum ohne Zeit nicht möglich.

Weil in der Raumzeit alle 4 Dimensionen gleichberechtigt sind, denken wir uns nun einmal anstatt der Zeit eine der Raumdimensionen weg. Es könnten in einem solchen Kosmos demnach nur zweidimensionale Wesen auf einem zweidimensionalen Planeten leben. Diese "Flachländer" würden also nur eine Länge und eine Breite kennen, sie könnten weder Wolkenkratzer bauen noch bequem im Fernsehsessel sitzen. Höher entwickelte Lebewesen mit einem durchgehenden Verdauungstrakt würden einfach auseinanderfallen! Es sei denn, sie hätten die unappetitliche Variante entwickelt, bei welcher verdaute Nahrung denselben Weg nimmt wie die frische Kost. Wollten diese Wesen aneinander vorbei kommen, müssten sie übereinander kriechen, aber selbst das wäre schon ungeheuer problematisch ohne die Raumdimension "Höhe". Zumal ein Fortbewegungsapparat wie z.B. Beine, Flossen oder Flügel kaum denkbar wäre, der in 2 Dimensionen funktioniert. Es wäre sicher ein beschwerliches Leben in einem Kosmos, dem nur eine der vier Dimensionen fehlt. Diese Beispiele halten uns vor Augen, dass die 3 Raumdimensionen wie auch die Zeit untrennbar und gleichberechtigt miteinander verbunden sind und wir auch auf jede einzelne unbedingt angewiesen sind.



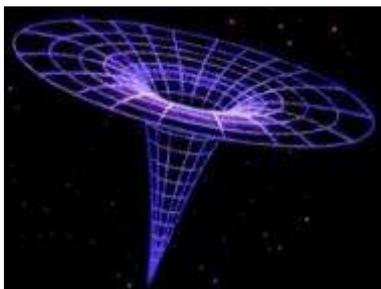
Krümmungen

Finden wir uns also damit ab, in einer vierdimensionalen Raumzeit zu leben. Sie wird allerdings durch die Anwesenheit von Materie gekrümmt, und zwar umso mehr, je größer die Masse ist. Nun muss alles, was sich in der Raumzeit bewegt, diesen Krümmungen folgen, selbst das Licht. Es kann nicht einfach geradeaus laufen, wie man vielleicht im ersten Moment vermuten würde.

Diese Voraussage der Einsteinschen Relativitätstheorie sollte zugleich auch den ersten Beweis für deren Richtigkeit liefern. Im März 1919 wurden dazu gleich 2 Expeditionen unternommen, um die stattfindende totale Sonnenfinsternis zu beobachten. Laut Einstein sollte man nämlich einen Stern nahe am Sonnenrand in einer etwas anderen Position vorfinden, als wenn man ihn nachts beobachtet. Einfach aus dem Grund, weil das Licht des Sterns den durch die Sonnenmasse verursachten Raumzeitkrümmungen folgen muss. Man fand tatsächlich die von Einstein vorausgesagten Positionsabweichungen! Seitdem wurden ungezählte Experimente unternommen und noch nicht ein einziges Ergebnis gefunden, welches an der Relativitätstheorie zweifeln ließe.



Raumzeitkrümmungen fallen naturgemäß gering aus bei Körpern kleiner Masse. Unsere Erde, erst recht der Mond, sind solch kleine Massen mit geringem Gravitationsfeld. Sie verursachen daher kaum nachweisbare Krümmungen. Anders sieht es bei extrem großen Massen aus, die über entsprechend starke Gravitationskräfte verfügen.



Ihren Sieg über alle anderen Naturkräfte feiert die Gravitation bei den [Schwarzen Löchern](#). Hier herrscht an deren Ereignishorizont eine Gravitationsgewalt, welche die umgebende Raumzeit in sich selbst krümmt. Das bedeutet (zumindest bei nichtrotierenden Schwarzen Löchern) ein kugelförmiges Gebilde, welches das Loch vom restlichen Universum vollkommen abschneidet. Man kann sich dabei die Raumzeit auf 2 Dimensionen reduziert vorstellen, als ein gespanntes Tuch, auf das man eine schwere Kugel legt. Das

Tuch wird nach unten immer mehr ausgebeult (gekrümmt), in der Spitze endlich umschließt die Raumzeit das Schwarze Loch vollständig. Aber wie verhält es sich dann mit den Raumzeitkrümmungen auf großen Skalen?

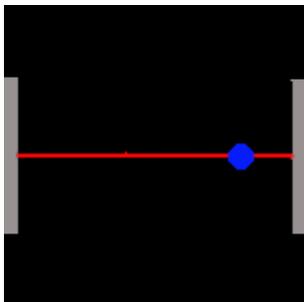


Wie bereits oben angedeutet, kann man bei relativ kurzen Distanzen bequem von einem euklidischen Raum sprechen. Den Strich auf unserem Blatt Papier sehen wir ohne Reue als Gerade an. Aber machen Sie den Spaziergang um die Erde und schon werden Sie sehen, dass es keine Geraden gibt! Einen Laserstrahl, auf den Mond gerichtet, können wir ebenfalls durchaus als Gerade akzeptieren. Auch noch, wenn wir größere Distanzen im Kosmos betrachten, hier ist die Materiedichte und damit die Krümmung nur gering. Doch ein (Super-) Laserstrahl,

zum "Ende" des Universums gesendet, wird allen Raumzeitkrümmungen folgen und vielleicht irgendwann zu uns zurück kehren. Man mag sich hierzu vereinfacht das Universum als riesigen Luftballon vorstellen, es ist vollständig in sich selbst gekrümmt. Darin gibt es nichts "Gerades", denn jede Linie muss diesen Krümmungen gehorchen.

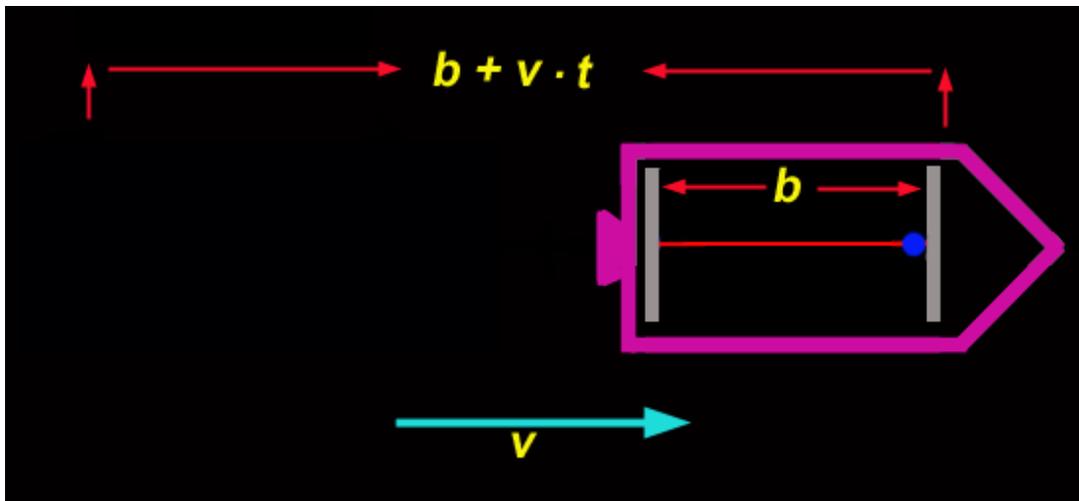
Raumstauchung!

Alle bisherigen Betrachtungen haben wir als ruhende Beobachter gemacht. Aber nun wollen wir uns fragen, was passiert mit dem Raum, wenn man sich schnell bewegt? Um das zu verstehen, benutzen wir wieder unsere Photonen- Uhr, bestehend aus 2 Spiegeln und einem Photon, die wir schon im Abschnitt über die [Zeitdilatation](#) kennen lernten:



Für die folgende Betrachtung ist es günstiger, dass wir die Uhr um 90° drehen. Den Weg, den das Photon von einem zum anderen Spiegel zurücklegt, wollen wir **b** nennen. Da im folgenden Abschnitt ein wenig Mathematik eine Rolle spielen wird, können Sie diese Erklärungen bei Nichtinteresse auch überschlagen und gleich [weiter unten](#) mit dem Lesen fortfahren.

Unsere Präzisionsuhr funktioniert prächtig, und so werden wir nun ein Exemplar in die Rakete unseres überstrapazierten Astronauten einbauen und ihn wieder einmal auf die Reise schicken. Die Uhr ist so angebracht, dass sich das Photon längs zur Flugrichtung bewegt und wir die Uhr beobachten können. Eine baugleiche Lichtuhr haben wir natürlich neben uns auf der Erde.



Zunächst beobachten wir, wie sich das Photon vom linken Spiegel in Flugrichtung bewegt. Es benötigt die Zeit t , um bis zum rechten Spiegel zu gelangen, wobei es natürlich mit der Lichtgeschwindigkeit c fliegt. Wir erkennen, dass das Photon zusätzlich zu seinem Weg b auch die Bewegung der Rakete aufholen muss.

Die Rakete hat die Geschwindigkeit v und der Gesamtweg des Photons ist daher $b + v \cdot t$.

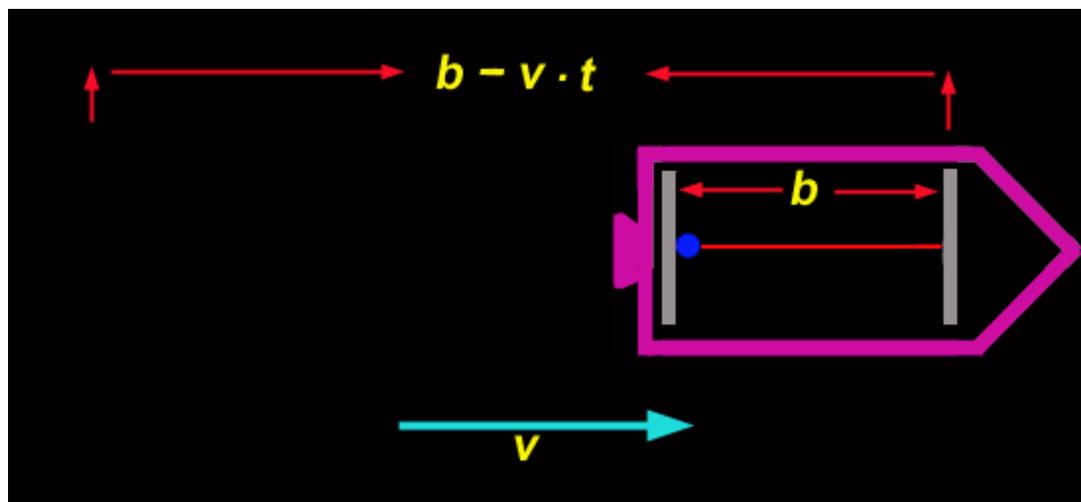
Die Flugzeit des Photons berechnet sich wie üblich aus dem Weg, dividiert durch die Geschwindigkeit, also:

$$t = \frac{b}{c}$$

Da sein Gesamtweg aber $b + v \cdot t$ ist, beträgt die von uns beobachtete Flugzeit

$$t = \frac{b + v \cdot t}{c}$$

Wir haben bis jetzt nur den Weg des Photons in Flugrichtung untersucht, auf dem Rückflug vom rechten zum linken Spiegel ergibt sich allerdings eine etwas andere Situation. Sehen wir uns noch mal die Rakete an:



Wenn das Photon vom rechten Spiegel startet, kommt ihm der linke Spiegel durch die Bewegung der Rakete entgegen. Dadurch verkürzt sich sein Weg, so dass sich dieser nun aus $b - v \cdot t$ zusammensetzt. Weil die Zeit t nun eine andere Größe hat, nennen wir die Zeit für den Rückflug nun t' .

Analog zur obigen Rechnung ergibt sich nun für den Rückweg des Photons die Zeit

$$t' = \frac{b - v \cdot t'}{c}$$

Aus diesen Formeln können wir aber t bzw. t' nicht berechnen und müssen sie deshalb nach t umstellen:

$$t \cdot c = b + v \cdot t$$

$$t \cdot c - v \cdot t = b$$

$$t \cdot (c - v) = b$$

$$t = \frac{b}{c - v}$$

und analog für den Rückweg

$$t' = \frac{b}{c + v}$$

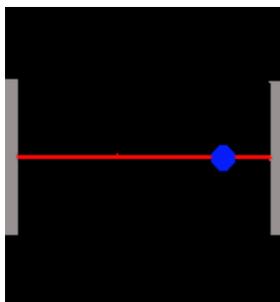
Damit sind wir nun in der Lage, die Gesamtflugzeit - nennen wir sie t_G - auszurechnen:

$$t_G = t + t'$$

Nun können wir schreiben:

$$t_G = \frac{b}{c - v} + \frac{b}{c + v}$$

Lassen wir unseren Astronauten einen Moment allein durchs All fliegen und sehen uns noch mal näher unsere eigene Photonenuhr an:



Wir haben ja eine baugleiche Uhr wie unser Astronaut, aber sie ruht. Weil das Photon keinen zusätzlichen Weg wie in der bewegten Rakete zurücklegen muss, ist die Berechnung der Zeit für den Hin- und Rückweg viel einfacher. Zur besseren Unterscheidung nennen wir jetzt den Weg unseres Photons b_E (E für Erde) und die Zeit, die es für beide Strecken braucht, t_E .

Die Zeit, die das Photon für den Hin- und Rückweg benötigt ist dann ganz einfach:

$$t_E = \frac{2 b_E}{c}$$

Im Abschnitt über die [Zeitdehnung](#) haben wir bereits gesehen, wie man die Zeit der schnell bewegten Rakete gegenüber unserer eigenen Zeit korrigieren muss, nämlich mit dem γ -Faktor. Die Gesamtflugzeit des Photons in der Rakete t_G berechnet sich demnach wie folgt:

$$t_G = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot t_E$$

In diese Gleichung können wir jetzt die oben gefundenen Ausdrücke einsetzen und erhalten als Ergebnis:

$$\frac{b}{c-v} + \frac{b}{c+v} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot \frac{2 b_E}{c}$$

Unser Ziel ist zu untersuchen, wie sich der Weg des bewegten Photons verhält. Dazu müssen wir die gefundene Gleichung nach b umstellen. Hierzu klammern wir zuerst b auf der linken Seite aus:

$$b \left(\frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v} \right) = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot \frac{2 b_E}{c}$$

...und bringen die Brüche auf den gemeinsamen Hauptnenner...

$$b \cdot \frac{c+v + c-v}{(c-v)(c+v)} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot \frac{2 b_E}{c}$$

...den Bruch auf der linken Seite fassen wir weiter zusammen...

$$b \cdot \frac{2c}{c^2 - v^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot \frac{2 b_E}{c}$$

um ihn nun auf die rechte Seite zu bringen, wo wir die 2 kürzen können und c zusammenfassen...

$$b = \frac{c^2 - v^2}{c^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot b_E$$

Wenn man den ersten Bruch auf der rechten Seite auflöst, kommt man zu folgendem Bild:

$$b = (1 - (v/c)^2) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot b_E$$

Den Ausdruck $1 - (v/c)^2$ kann man auch als Produkt zweier Quadratwurzeln darstellen:

$$b = \sqrt{1 - (v/c)^2} \cdot \sqrt{1 - (v/c)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot b_E$$

So dass wir jetzt eine Wurzel kürzen können:

$$b = \sqrt{1 - (v/c)^2} \cdot b_E$$

Aus dem Abschnitt über die [Zeitdilatation](#) haben wir ja bereits den Gamma- Faktor kennen gelernt

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

Womit wir jetzt eine recht einfache und bequeme Form haben, den Weg des bewegten Photons zu berechnen:

$$b = \frac{1}{\gamma} \cdot b_E$$

Was sagt uns nun eigentlich die gefundene Formel? Sie gibt uns eine Aussage darüber, dass dieselbe Strecke, wenn man sich mit relativistischer Geschwindigkeit in Bezug auf ein ruhendes System bewegt, viel kürzer erscheint! Der Weg des Photons in der Rakete hat eine weit geringere Länge als diejenige des Photons in unserer irdischen Lichtuhr. Alle Längen, die wir in Flugrichtung der Rakete messen, sind gestaucht. Die Größe der Stauchung ist direkt abhängig von der Geschwindigkeit und wird durch den Gamma- Faktor beschrieben. In Analogie zur Zeitdilatation bedeutet dies, dass wir bei Bewegung mit relativistischen Geschwindigkeiten in gleichen Zeiten viel größere Strecken zurück legen.

Gibt es denn quer zur Flugrichtung auch eine Stauchung? Nein, denn in dieser Richtung ist die Geschwindigkeit ja gleich Null. Wenn man das in unsere Korrekturformel für die Länge einsetzt, ergibt sich:

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - (0/c)^2} = 1$$

In dieser Raumrichtung gibt es damit keinen Korrekturfaktor, die Stauchung findet nur in Flugrichtung statt.



So wird unser geplagter Astronaut die Erde sehen, wenn er der Lichtgeschwindigkeit näher kommt. Je größer seine Geschwindigkeit, umso "schmäler" wird er die Erde sehen. Aber wieso schrumpft sie nicht komplett, in allen Raumrichtungen? Wir haben ja die Uhr des Astronauten in Flugrichtung beobachtet und gesehen, dass nur in dieser Richtung eine Stauchung erfolgt. Wenn wir die Breite der Rakete messen bzw. der Astronaut die "Breite" der Erde, finden beide die selben Werte als wenn sie sich in Ruhe befänden.

Man darf nun allerdings nicht glauben, dass sich alle schnell bewegten Gegenstände in ihrer Größe verkleinern.

Aus unserer Sicht macht der tapfere Astronaut zwar eine "relativistische Diät", aber leider spürt er selbst nichts davon. Das, was wir von ihm sehen, ist nicht eine Schrumpfung seines Körpers, sondern eine Stauchung der Raumzeit! Nicht sein Körper wird schmaler, was wir sehen ist eine Schrumpfung der Maßstäbe. Derselbe Zollstock, der auf der Erde 1 [m] anzeigt, zeigt uns das auch in der Rakete des Astronauten, aber er hat eine andere, viel kürzere Länge als hier bei uns.



Auch in seiner Flugrichtung sieht der Astronaut die Raumzeit gestaucht vor sich, je schneller er fliegt, umso kürzer werden seine Wege. Das hat auch einen Einfluss auf seine "Sicht der Dinge": Sein Sehfeld wird immer schmaler, alle Sterne rücken in seinem Sichtkegel immer näher zusammen, je schneller er fliegt.

Ähnlich wie bei unseren Feststellungen, dass es keine "universelle" Zeit im Kosmos gibt, also in jedem unterschiedlich bewegten Bezugssystem die Zeit anders verläuft, verhält es sich auch mit dem Raum. Raum ist genau wie die Zeit eine reine Privatangelegenheit, es gibt keinen absoluten Raum.

Jeder Beobachter im Kosmos hat damit eine andere Sicht der Dinge. Denn in der Regel wird sich jedes Bezugssystem im All unterschiedlich verhalten, so dass jeder Beobachter andere Entfernungen und Abmessungen wahrnimmt, wie er auch andere Zeitverläufe misst.

Nun abschließend noch einmal zum Begriff Raum: Stellen Sie sich vor, jemand würde das Universum über Nacht ausräumen. Was bliebe übrig? Nur Raumzeit? Nein, eigentlich absolut nichts! Ohne die Materie, ohne Sterne, Strahlung, Gas, Staub und Atome gäbe es keinen Raum. Raum ist eine Bezeichnung für alle Abmessungen, alle Entfernungen zu irgendwelchen Objekten. Wenn Sie das Innenleben Ihres Computers komplett ausräumen (wovon dringend abgeraten wird), befindet sich **NICHTS** mehr in dem Gehäuse (abgesehen von der Luft), Sie können darin nichts mehr lokalisieren. Allerdings belehrt uns hier wieder mit einem kräftigen Einspruch die Quantenphysik: sie sagt, es gibt kein "leeres" Vakuum, keinen leeren Raum, denn ständig entstehen in diesem so genannte [virtuelle Teilchenpaare](#). Das Vakuum ist ein brodelnder See ständig neu entstehender und sich wieder vernichtender Teilchen. Der Raum ist also aus Sicht der Quantenphysik etwas völlig anderes. Ja, auf der Quantenebene wird womöglich sogar die Raumzeit selbst einem ständigen Auf und Ab unterliegen, so genannten [Fluktuationen](#). Sie wird dann nicht mehr so ruhig und glatt sein, wie wir sie bis jetzt sahen, sondern eher eine schaumartige, unruhige Struktur haben.

Schwenkt man, wo wir gerade dabei sind, von den gigantischen kosmischen Entfernungen in den Mikrokosmos, so kommt man zur Frage: Gibt es eigentlich auch eine kleinste Ausdehnung? Bereits Werner Heisenberg hat diese Frage bei der Entwicklung der Quantentheorie aufgegriffen und eine "kleinste Länge" postuliert. Darunter versteht man eine gequantelte Länge L_0 , die es nicht gestattet, kleinere Abstände zu messen. Danach sind auch nur ganzzahlige Vielfache von L_0 zulässig.

Heute verwendet man die so genannte [Planck- Wheeler- Länge](#), um die kleinste mögliche Ausdehnung aufzuzeigen. Sie hat die unvorstellbar kleine Länge von nur 10^{-35} m. Das ist quantenphysikalisch die kleinste noch sinnvolle Distanz.

Die Äquivalenz von Energie und Materie

Energie

Masse

Die Vereinigung

Energie

Im physikalischen Sinn ist Energie das in einem System gespeicherte potentielle Arbeitsvermögen, es stellt einen Vorrat dar, der bei Abruf Arbeit verrichten kann. Gemessen wird deshalb die Energie in gleichen Einheiten wie die Arbeit, nämlich in **Joule**:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ [Nm]} \text{ (Newtonmeter)} = 1 \text{ [Ws]} \text{ (Wattsekunde)} = 1 \text{ [m}^2\text{kg s}^{-2}\text{]}.$$

Energie kann in den verschiedensten Formen auftreten und (teilweise) von uns wahrgenommen werden: *Wärme, Licht, Elektrizität, Gammastrahlung* usw. Ein bewegter Körper speichert die ihm durch die Beschleunigung zugeführte Energie als **kinetische** (Bewegungs-) Energie. Diese kann bei einem Aufprall auf einen massiven Gegenstand sehr plötzlich freigegeben werden, zum Beispiel beim Einschlag eines Meteoriten auf einen Himmelskörper oder dem unglücklichen Zusammenstoß zweier Fahrzeuge.

Doch beinhaltet jeder Gegenstand auch eine **potentielle** Energie, die *Energie der Lage*. Kernbindungsenergie, Gravitationswellen und Rotationsenergie sind weitere Erscheinungsformen. Alle diese Energien sind *ohne Einschränkung* und vollständig ineinander umwandelbar!

Masse

Die Masse eines Körpers lässt sich aufteilen in die *schwere* und die *träge* Masse. Die schwere Masse ist diejenige der Ruhelage, die träge Masse ist die bewegte. Allerdings unterscheiden wir heute nicht mehr, wie weiter unten noch zu sehen, träge und schwere Masse, sondern sprechen lediglich von der **Ruhemasse** eines Körpers. Das ist auch leicht einzusehen, wenn wir uns einmal vor Augen halten, woraus Materie besteht. Jeder weiß, dass sie aus Molekülen oder Atomen aufgebaut ist, welche sich wiederum aus Protonen, Neutronen und Elektronen zusammensetzen. Nehmen wir als Beispiel einen Apfel. Wir können ihn einfach auf die Waage legen und seine Masse feststellen (genau genommen ist das nur sein Gewicht). Wenn wir viel Zeit hätten, könnten wir jedoch auch zählen, aus wie viel Protonen, Neutronen und Elektronen unser Obst besteht. Wir kennen ja die Ruhemasse jedes dieser Teilchen und müssen nun nur noch die Massen addieren, um die Gesamtmasse des Apfels zu erhalten. Wenn wir jetzt den Apfel mit einer Rakete ins Weltall schießen, wird dann seine Masse zunehmen? Wird aus der schweren Masse die größere träge Masse?

Sicher nicht. Wie sollte durch eine bloße Beschleunigung die Anzahl der Apfel- Teilchen zunehmen? Wir können den Apfel so schnell beschleunigen oder abbremsen wie wir wollen, die Anzahl der Atome, aus denen er besteht, bleibt unveränderlich. Damit bleibt auch seine Masse gleich und unveränderlich. Deshalb ist die Masse des unbewegten Körpers, die Ruhemasse, die einzig relevante.

Es gibt nur eine bekannte Variante, bei der unser Apfel doch an Masse zunehmen könnte, aber die ist sehr unphysikalisch: Wenn sich eine fette Made ungeniert hineinfuttert...

Die Vereinigung

Albert Einstein hat sich überlegt, dass man Experimente in einem ruhenden und einem beschleunigten System durchführen kann, und man in jedem Fall zum gleichen Ergebnis kommen muss. Als Beispiel dachte er an ein Labor auf der Erde und eins in einem Raumschiff. In beiden ist an der Decke eine (supergenaue) Federwaage aufgehängt, an denen ein Körper von jeweils genau gleicher Masse befestigt ist. Nun wird dieser Körper mit je einem Photon beschossen, welches von ihm absorbiert wird. Die Rakete wird ja in Richtung Boden- Decke mit g beschleunigt, so dass die Waage eine Kraft mg (Masse mal Beschleunigung) anzeigt.

Das Photon mit der Energie ΔE wird nun absorbiert, so dass die Raumschiffwaage eine Zunahme der trägen Masse um den Betrag $\Delta E/c^2$ registriert, die angezeigte Kraft ist dann $(m + \Delta E/c^2)g$.

Die Physiker im Erdlabor lesen an ihrer Waage genau dieselbe Kraft $(m + \Delta E/c^2)g$ ab, nur dass hier nicht die träge Masse, sondern das *Gewicht* des Körpers um den Betrag $\Delta E/c^2$ zugenommen hat.

Was soll uns dieses Gedankenexperiment zeigen? Ganz einfach, wie schon eingangs angedeutet, dass schwere und träge Masse und auch Energie ein und dasselbe sind! Die Energie wird oben ja als Photon symbolisiert, durch deren Absorption der Körper tatsächlich an Masse zunimmt. Das führt letztendlich zu der Aussage, dass Energie und Materie dasselbe sind, was Einstein in seiner wohl weltberühmtesten Formel $E = mc^2$ ausgedrückt hat.

Man kann vielleicht erahnen, welchen ungeheuren Energieinhalt eine Handvoll Materie hat, wenn man die Masse mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit (das ist immerhin ein Betrag von rund $9 \times 10^{16} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$!) multipliziert. Als makabres Beispiel mag die Explosion der Hiroshima- Bombe dienen, bei der nur etwa 1 [g] Materie in Energie umgewandelt wurde.

Materie kann man sich vorstellen als eine Art "*ausgefrorene*" Energie. Wir können heute in den großen Teilchenbeschleunigern Einsteins Gesetz beweisen, indem wir auf hohe Energien aufgeladene Kernteilchen aufeinander prallen lassen, wobei neue Teilchen entstehen. Andersherum kann man sie auch wieder zu Energie zerstrahlen. Das Leben auf unserem Planeten ist nur möglich, weil die Sonne in ihrem Kern bei der Wasserstoff- Fusion einen wenn auch nur geringen Teil der Materie in Energie zerstrahlt. Noch viel besser können [Schwarze Löcher](#) in ihren Akkretionsscheiben Materie in Energie umwandeln, der freigesetzte Energiebetrag kann bis zu 40% der Ruhemasse betragen.

Einsteins Theorien zeigen uns aber noch mehr: Wir werden (weil wir aus Materie sind) niemals die Lichtgeschwindigkeit erreichen. Wie im obigen Beispiel gesehen, führt jede einem Körper zugeführte Energie zu einem scheinbaren Anstieg der Masse. Der zum Erreichen dieser Geschwindigkeit erforderliche Energiebetrag würde gegen Unendlich gehen, und damit auch die (träge) Masse unendlich groß werden. Besser gesagt: Die kinetische Energie des Teilchens oder Körpers steigt ins Unendliche an (die Ruhemasse bleibt ja unverändert). Selbst ein so leichtes Teilchen wie ein Elektron kann deshalb niemals Lichtgeschwindigkeit erreichen, geschweige denn eine Rakete. Im gesamten Universum gibt es keine Energiequelle, mit der ein Teilchen auf unendlich hohe kinetische Energie aufgeladen werden könnte.

Der bekannte Erhaltungssatz, dass im Universum keine Materie verloren geht und auch keine hinzugewonnen werden kann, muss nun in einem anderen Licht gesehen werden. Man spricht deshalb heute vom Gesetz der Energieerhaltung, denn unser Kosmos besteht *nicht* aus unzerstörbaren (Kern-)Teilchen. Wir wissen ja, dass beispielsweise beim Zusammentreffen eines Protons mit einem Antiproton beide zu Energie zerstrahlen. Auch wissen wir um die begrenzte Lebensdauer der Neutronen (diese haben eine Halbwertszeit von 16,8 min, wenn sie frei auftreten) und vermuten, dass auch die Protonen nicht ewig existieren können. Selbst Eisen (Fe) hat wahrscheinlich eine Halbwertszeit von 10^{500} Jahren. In jedem Fall aber geht nichts verloren, selbst wenn Materie vollständig in Energie umgewandelt wird.

Aufgrund der Äquivalenz von Materie und Energie bleibt also der **Energieinhalt** des Universums unveränderlich. Selbst wenn es ewig weiter expandiert, alle Materie zerfällt und sich alles auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt hat, bleibt der Gesamt-Energieinhalt unverändert gleich, auch wenn er dann vielleicht nur noch aus den energieärmsten Photonen besteht.

Egal, in welcher Form man die Energie auch sieht, eines bewirkt sie immer: sie ist eine Quelle von Gravitationsfeldern. Wir haben jetzt ja erkannt, dass Masse und Energie im Grunde dasselbe sind. Da von Masse eine Gravitationswirkung ausgeht, gilt dies auch für die Energie. Diese vielleicht etwas erstaunliche Erkenntnis fällt uns etwas leichter, wenn wir uns vor Augen halten, dass der frühe, ultraheiße Kosmos aus purer Energie bestand - Materie konnte noch gar nicht existieren. Sie konnte erst gebildet werden, nachdem sich das All entsprechend abgekühlt hatte.