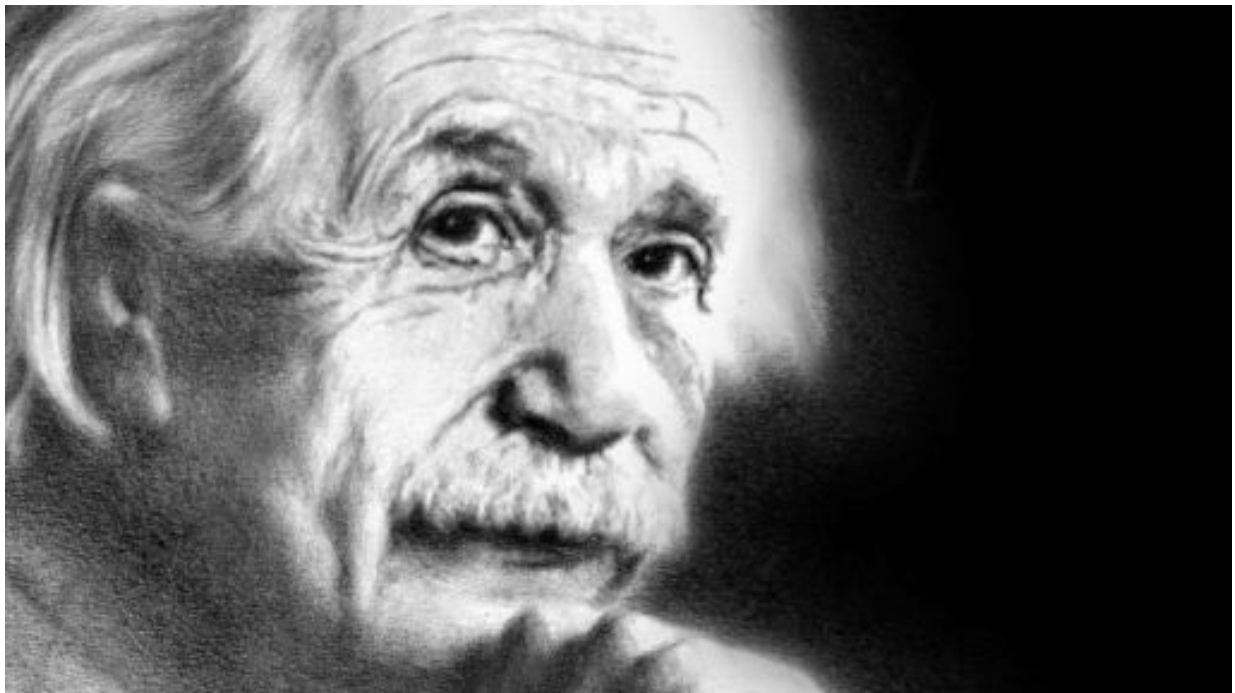


**EINSTEINS  
RELATIVITÄTSTHEORIE**

84058



**MEDIENBEGLEITHEFT** zur Videokassette  
61 Minuten (in drei Teilen), Produktionsjahr 2003

## DIE SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE – TEIL 1



Zeit fließt immer gleichmäßig schnell. Wir können sie weder verzögern noch anhalten. Der Lauf der Zeit scheint unbeirrbar. Auch der Raum ist eine unverrückbare Größe. An der Länge einer fix definierten Strecke ändert sich nichts, egal wie schnell wir uns bewegen.

Zeit und Raum scheinen unveränderlich. Doch Anfang des 20. Jahrhunderts wurde dies in Frage gestellt. Albert Einstein hatte entdeckt, dass Zeit und Raum keine absoluten Naturkonstanten sind, sondern Größen, die sich ändern. Obwohl schwer vorstellbar, so ist es doch das Wesen der Natur, dass die Zeit langsamer fließen und der Raum schrumpfen kann.

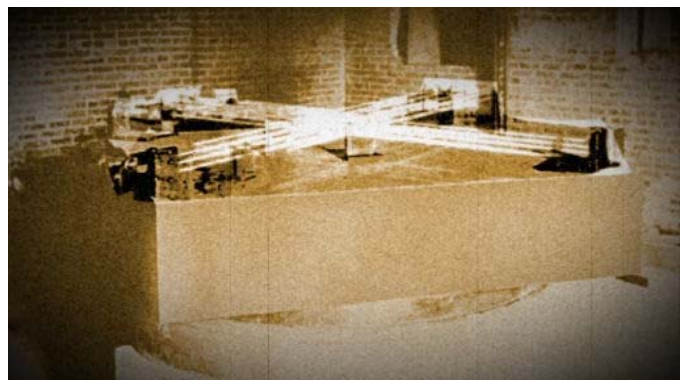
Mit seiner Relativitätstheorie brachte Einstein das Gefüge der klassischen physikalischen Gesetze durcheinander und schuf einen völlig neuen Blick auf die Welt.



Vor über 100 Jahren stießen zwei Physiker, Albert Michelson und Edward Morley, bei ihrem Versuch, die Geschwindigkeit des Lichts zu messen, auf ein überraschendes Phänomen. Damals glaubte man, im Kosmos würde ein Äther existieren, der die Lichtstrahlen in ihrer Bewegung beeinflusst.

Je nachdem, aus welcher Himmelsrichtung die Photonen auf die Erde treffen, sollten ihre Geschwindigkeiten unterschiedlich hoch sein.

Doch in welche Richtung die beiden Wissenschaftler ihr Gerät auch drehten, die Lichtgeschwindigkeit war immer gleich groß. Schon glaubten sie, falsch gemessen zu haben, denn dass das Licht nur eine einzige Geschwindigkeit hat, widersprach der damaligen Physik.



Die Methode der Geschwindigkeitsmessung basiert nämlich darauf, dass ein- und dieselbe Bewegung unterschiedlich schnell wahrgenommen werden kann, abhängig vom Standpunkt des Betrachters.



So sieht ein stehender Beobachter einen Jet schnell an sich vorbei fliegen,

während ein Passagier in einem parallel fliegenden Flugzeug aufgrund seiner eigenen Bewegung die Maschine nur langsam wahrnimmt.



Diese Gesetzmäßigkeit, dass Geschwindigkeiten relativ sind und vom Bewegungszustand des Beobachters abhängen, hatte man auch für die Bewegung des Lichts angenommen.

Man dachte, dass ein ruhender Beobachter eine höhere Lichtgeschwindigkeit und damit eine längere Strecke mißt, die die Photonen in einer vorgegebenen Zeiteinheit zurücklegen, als ein Betrachter, der sich relativ zu den Strahlen bewegt.



Wenn aber Licht nur eine einzige Geschwindigkeit hat, also für beide Beobachter gleich schnell ist, dann können die zwei Messstrecken unmöglich verschieden lang sein.

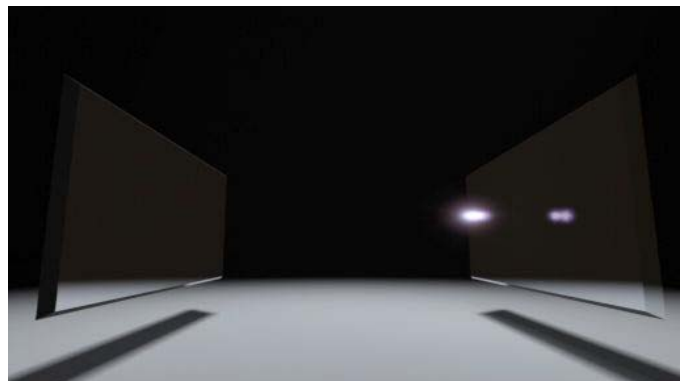
Tatsächlich wurde in den darauf folgenden Jahren unzweifelhaft bestätigt, dass das Licht nur eine einzige Geschwindigkeit kennt. Mit 299.792 Kilometern pro Sekunde breitet es sich immer gleich schnell aus, gleichgültig, ob der Beobachter mit seinem Messgerät stillsteht oder ob er sich bewegt. Das schien unnatürlich. Noch dazu, wo die Formel zur Berechnung von Geschwindigkeiten "Geschwindigkeit c ist Weg durch Zeit" - unbestritten blieb. Die Formel baut aber gerade darauf auf, dass 'c', der Wert für die Geschwindigkeit, variabel ist, während die Maßeinheit für die Weglänge, ein Meter, sich nie ändert, und auch die Zeit immer gleich schnell vergeht: eine Sekunde dauert immer eine Sekunde. Die Weglänge, also die zurückgelegte Strecke im Raum, und die Zeit galten als feste, unveränderliche Größen.

$$299\,792 \text{ km/s} = \frac{\text{RAUM}}{\text{ZEIT}}$$

Wenn nun aber aufgrund der absoluten Lichtgeschwindigkeit 'c' immer gleich groß ist, dann müssen wohl die beiden anderen Parameter der Gleichung, Raum und Zeit, variabel sein. Sind Raum und Zeit nicht jene fixen Naturkonstanten, für die man sie jahrtausendlang gehalten hatte?

Einstein war bereit, die klassische Definition von Raum und Zeit in Frage zu stellen. Zeit war für ihn kein metaphysisches Konzept, sondern ganz einfach das, was eine Uhr misst: eine periodische Abfolge festgelegter Einheiten in Form von Stunden, Minuten und Sekunden. Unter einer Uhr muss man sich aber nicht unbedingt ein mechanisches Gerät vorstellen. Jeder periodische Prozess kann eine Uhr sein.

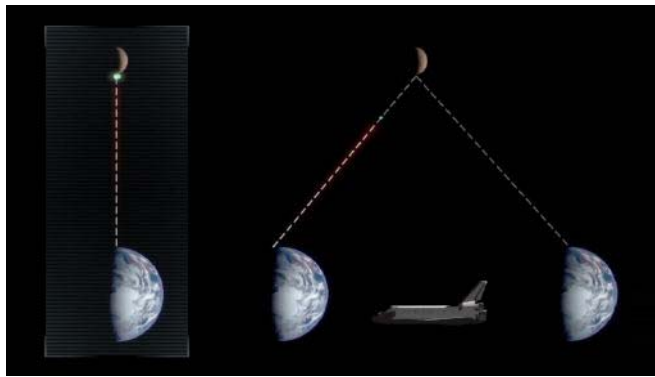
Ein Photon, das sich zwischen zwei Spiegeln hin- und herbewegt, stellt ebenfalls eine Uhr dar. Es verhält sich wie das Pendel einer Uhr. Und weil das Licht nur eine einzige Geschwindigkeit kennt, geht die Uhr sehr genau. So genau, dass man damit äußerst exakte Messungen durchführen kann.



Z.B. schießen Astronomen Laserlicht zum Mond, um anhand der Zeitspanne, die der Strahl für Hin- und Rückweg braucht, die Entfernung Erde - Mond zu messen.

Der Lichtstrahl bewegt sich wie das Pendel einer Uhr, Tik - Tak , hin und her, auf und ab. Der Laser wird am Mond reflektiert, und wandert zur Erde zurück. Die Wissenschaftler messen immer exakt die gleiche Zeit: 1,3 Sekunden in jede Richtung.

Was aber beobachtet ein Astronaut, der in einem Raumschiff an Erde und Mond vorbeifliegt? Er stößt auf ein seltsames Phänomen. Für ihn bewegt sich das Licht nämlich nicht senkrecht auf und ab, sondern im Zick-Zack-Kurs. Dadurch hat aber der Laserstrahl eine längere Wegstrecke zu überwinden, länger als für den Wissenschaftler auf der Erde.

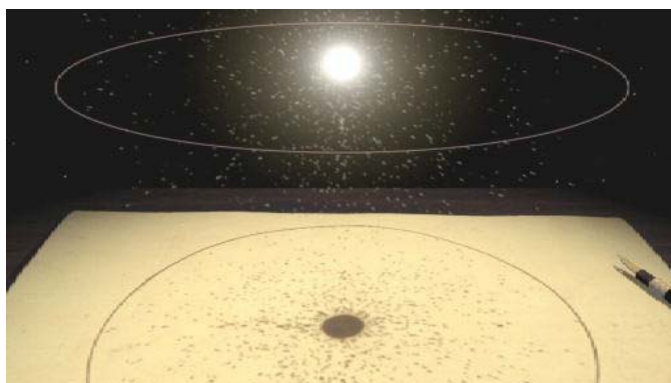


Vergleicht man die beiden Strecken, zeigt sich ein deutlicher Unterschied: für den unbewegten Beobachter auf der Erde ist der Weg kürzer, für den vorbeifliegenden Beobachter im Raumschiff länger. Und weil das Licht nur eine einzige Geschwindigkeit hat, kann es den Unterschied nicht ausgleichen. Für den längeren Weg benötigt es daher mehr Zeit.

Das bedeutet: Für den Astronauten fliegt das Photon zwischen Erde und Mond länger hin- und her. Für ihn dauert die Periode länger. In seinen Augen schlägt das Lichtpendel langsamer. Man kann sagen: vom Raumschiff aus gesehen läuft die Zeit zwischen Erde und Mond langsamer, als die Zeit an Bord.

Das war eine epochale Entdeckung. Wenn ich mich als Beobachter relativ zu einem anderen Bezugssystem bewege, dann messe ich innerhalb des beobachteten Systems eine Verlangsamung der Zeit. Einfach formuliert lautet die Schlussfolgerung daraus: „Bewegte Uhren gehen langsamer als in ihrem Ruhesystem.“ Das bedeutet: die Zeit dehnt sich. Das ist der erste Grundsatz der Relativitätstheorie. Dieses Phänomen nennt man Zeitdilatation.

Einstein hatte nicht die Möglichkeit, die Verlangsamung der Zeit praktisch nachzuweisen. Damals gab es noch kein Labor, in dem man mit Naturgrößen wie der Lichtgeschwindigkeit von über einer Milliarde Stundenkilometer hätte Experimente durchführen können. Seine Versuche fanden größtenteils im Kopf statt.



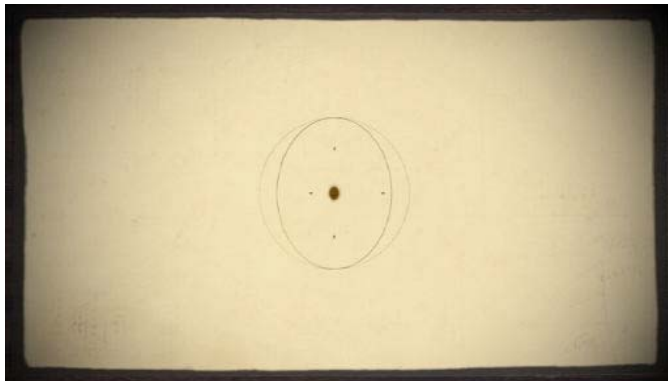
Er selbst sagte, sein Labor sei das Papier. Und auf diesem unternahm er Gedankenexperimente, die ihn eine weitere Besonderheit der Natur erkennen ließen, wie das folgende Beispiel an Hand unseres Sonnensystems zeigt.

Wenn die Sonne ihre Lichtstrahlen gleichzeitig nach allen Richtungen abstrahlt, und diese z.B. reflektiert werden, sobald sie die Erdbahn erreicht haben, dann ist es für einen unbewegten Beobachter logisch, dass alle Photonen gleichzeitig wieder im Zentrum ankommen.

Innerhalb des Ruhesystems der Sonne sieht er die Photonen synchron hin- und herlaufen. Doch wiederum spielt es eine Rolle, ob sich der Betrachter relativ zum System in Ruhe befindet oder ob er sich bewegt. Die Sonne und ihre Planeten verharren nämlich nicht starr an einem Ort im Kosmos, sondern rasen mit etwa 900.000 km/h durch die Milchstraße.

Sieht ein solcher Beobachter das System an sich vorüberziehen, dann beobachtet er zwar, dass alle Photonen gleichzeitig von der Sonne abgestrahlt werden, doch sie laufen nicht mehr synchron zurück. Für ihn treffen sie nicht mehr gleichzeitig im Zentrum ein. Zwischen den senkrechten und den waagrechten Photonen gibt es einen Unterschied. Die senkrechten Photonen bewegen sich im Zick-Zack. Nach dem gleichen Prinzip wie im System Erde - Mond. Das heißt, ihr Weg ist länger als im Ruhesystem, und ihre Zeit läuft langsamer. Die waagrechten Photonen brauchen aber noch mehr Zeit. Ihr Weg muss daher sogar noch länger sein. Und tatsächlich. Vergleicht man die beiden Strecken, zeigt sich, dass der Weg der waagrechten Photonen länger ist als der, den die senkrechten zurückgelegt haben.

Das ist allerdings paradox, und kann nicht sein, denn beide Beobachter, der ruhende, der sich innerhalb des Sonnensystems aufhält wie der bewegte außerhalb, betrachten ja dasselbe Ereignis. Das Zusammentreffen der Photonen ist ein Vorgang, und es ist unmöglich, dass er unterschiedlich wahrgenommen wird. Deshalb müssen auch im bewegten System alle Photonen gleichzeitig wieder im Zentrum ankommen. Wie lässt sich dieses Problem lösen? Da das Licht nur eine Geschwindigkeit kennt, besteht die einzige Möglichkeit darin, dass sich der Weg für die waagrechten Photonen verkürzt.



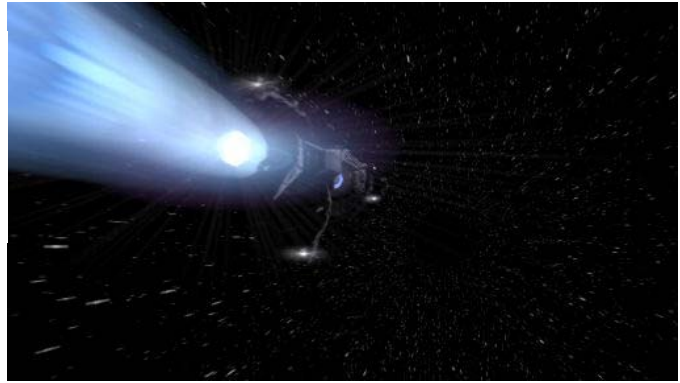
Dazu muss sich der Kreis verformen und zur Ellipse schrumpfen. Auf diese Weise gleichen sich die unterschiedlich langen Wege aneinander an und alle Photonen bewegen sich wieder synchron. Sie landen wieder zur selben Zeit im Zentrum.

Dieses Gedankenexperiment führte Einstein zu der verblüffenden Erkenntnis, dass ein Objekt, das sich bewegt, schrumpft. In unserem Fall das Sonnensystem. Es verkürzt sich in Bewegungsrichtung. Daraus leitete er seinen zweiten Grundsatz ab: "Bewegte Objekte schrumpfen". Diese so genannte Längskontraktion tritt nie allein auf. Zeit und Raum sind immer gleichzeitig betroffen. Zeitdilatation und Längskontraktion entstehen stets gemeinsam.

Erst 50 Jahre nach ihrer Entdeckung konnten die relativistischen Phänomene das erste Mal experimentell bestätigt werden. Dazu wurde eine der neu entwickelten Atomuhren in einem Flugzeug montiert, um sie zu bewegen.

Die Wissenschaftler unternahmen einen mehrstündigen Flug, um zu messen, wie sehr sich der Effekt der Zeitdilatation auswirkt. Über Funksignale hielten sie Kontakt zu einer zweiten Uhr, die unbewegt am Boden zurückgeblieben war. Als man am Ende die beiden Uhren verglich, wurde tatsächlich ein Zeitunterschied von einigen Milliardstel Sekunden festgestellt. Durch die Bewegung hatte sich die Zeit gedehnt und war langsamer verfließen. Aufgrund der geringen Fluggeschwindigkeit sind die Unterschiede minimal ausgefallen.

Wären die Wissenschaftler mit einem viel schnelleren Raumschiff geflogen, wäre die Zeitdifferenz größer gewesen.



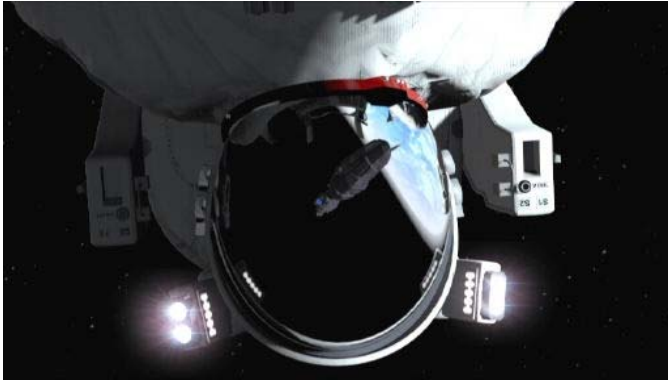
Die Uhren wären an Bord deutlich langsamer gelaufen, als jene, die man zum Vergleich auf der Erde zurückgelassen hätte. Die Zeitdilatation betrifft jeden Prozess im bewegten System.

So verlangsamen sich alle Abläufe im menschlichen Körper. Das Herz schlägt langsamer. Jede Bewegung, auch das Sprechen verlangsamt sich. Sogar der Alterungsprozess wird verzögert.

Da die kleinsten Teilchen wie die Elektronen sich langsamer bewegen, ist die Materie selbst betroffen. Deshalb verlangsamt sich auch eine altmodische Sanduhr um denselben Faktor. Zugleich schrumpfen alle Gegenstände. Auch das Raumschiff schrumpft. Je näher seine Bewegung an die Lichtgeschwindigkeit heranreicht, desto mehr verkürzt es sich.

Kehren die Astronauten nach Jahren zur Erde zurück, finden sie ihre Mitmenschen schneller gealtert vor als sich selbst.





Das ist der als Zwillingsparadoxon bekannt gewordene Effekt der Zeitdehnung. Der Astronaut im bewegten Raumschiff ist langsamer gealtert als sein Zwillingsbruder, der auf der Erde zurückgeblieben war. Trotzdem haben die Raumfahrer die Zeit ganz normal erlebt, genauso wie die auf der Erde zurückgelassenen Kollegen.

An Bord ist für sie immer alles gleich schnell geblieben. Der Zeitunterschied bleibt erhalten und kann nach der Rückkehr gemessen werden. Die Längenkontraktion verschwindet aber mit der Verlangsamung der Bewegung. Das Raumschiff hat unbewegt seine ursprüngliche Länge wieder.



Raum und Zeit sind also nicht jene Naturkonstanten, für die wir sie halten mögen. Ihre Veränderungen treten bei jeder Bewegung auf. Dass wir sie im Alltag nicht wahrnehmen können, rührt daher, dass unsere Geschwindigkeiten viel zu gering sind. Auch, wenn es sich für uns um hohe Geschwindigkeiten handelt. Deutlich treten die Effekte nämlich erst ab 10 % der Lichtgeschwindigkeit zutage. Doch selbst das schnellste Flugzeug ist Dreihunderttausend Mal langsamer als das Licht.

## DIE SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE – TEIL 2

Der Physiker Albert Einstein war zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf seltsame Naturphänomene gestoßen. In seiner Relativitätstheorie fasste er sie in zwei Grundsätzen zusammen:

Erstens Zeitdilatation: bewegte Uhren gehen langsamer  
Zweitens Längenkontraktion: bewegte Körper schrumpfen

Die Verlangsamung der Zeit und das Schrumpfen von Körpern treten mit jeder Bewegung auf. Auch beim Menschen. Allerdings sind die Effekte so klein, dass wir sie nicht bemerken. Zu gering sind unsere Geschwindigkeiten im Alltag. Selbst schnelle Bewegungen sind viel zu langsam.

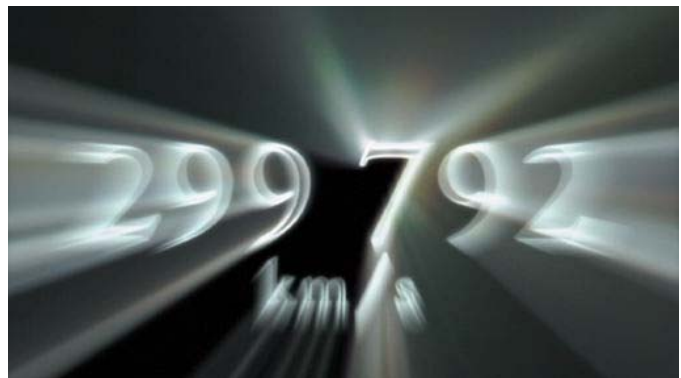
Deutlich zeigen sich die Phänomene nämlich erst ab 10 % der Lichtgeschwindigkeit. Das ist 30.000 Mal schneller als das schnellste Flugzeug. Doch Zeit und Raum sind nicht allein betroffen. Auch die Masse der Körper verändert sich durch Bewegung. Sie wächst mit der Geschwindigkeit.

Und Einstein hatte entdeckt, dass sich Masse in Energie umwandeln lässt. Die Entwicklung der Atombombe war eine Konsequenz dieser Erkenntnis. Bei der Explosion wird Materie in Energie transformiert.



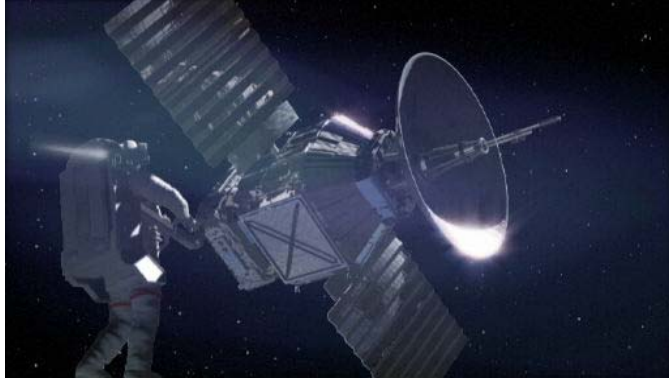
Es ist ein ähnlicher Prozess, der auch im Inneren der Sonne abläuft, und der sie bisher fünf Milliarden Jahre lang hat strahlen lassen.

Einstein's Relativitätstheorie baut auf einer simplen und doch überraschenden Tatsache auf, nämlich dass das Licht mit etwa 299.792 Kilometern pro Sekunde nur eine einzige, immer gleichbleibende Geschwindigkeit hat.



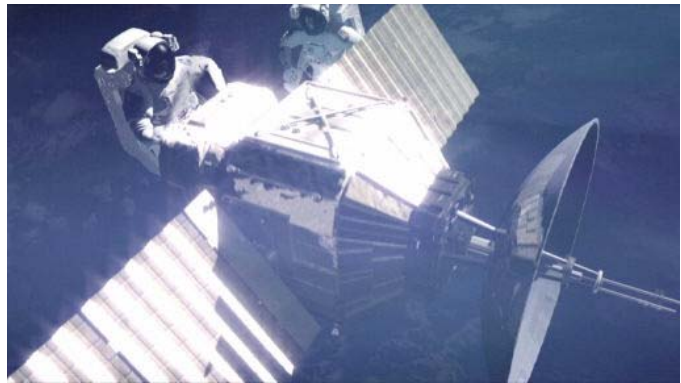
Gleichgültig, ob ein Beobachter mit seinem Messgerät stillsteht oder sich bewegt, die Lichtgeschwindigkeit hat immer denselben Wert.

Das hat verblüffende Konsequenzen. Denn wenn Licht für alle Beobachter gleich schnell ist, dann können die Lichtstrahlen logischerweise von niemandem eingeholt werden. Die Lichtgeschwindigkeit ist somit die schnellstmögliche Bewegung überhaupt. Kein Körper im gesamten Universum kann schneller sein als das Licht.



Dies überrascht, würde man doch annehmen, dass jede beliebige Geschwindigkeit möglich sein sollte. Doch die Begrenzung liegt in der Natur der Körper selbst. Wir wissen, dass jeder Körper die Tendenz hat, in dem Bewegungszustand zu verharren, in dem er sich gerade befindet.

Dieses Trägheitsprinzip lässt zum Beispiel einen Satelliten endlos um die Erde kreisen, bis eine Kraft von außen auf ihn einwirkt und ihn veranlasst, seinen Kurs zu ändern. Dabei wird ihm Energie zugeführt. Das Ausmaß der Energie muss groß genug sein, um seine Trägheit bzw. den daraus resultierenden Widerstand zu überwinden.



Wie stark dieser Widerstand ist, hängt von der Masse ab. Je größer die Masse, desto höher ist der Widerstand. Und desto mehr Energie muss aufgewendet werden. Kleine Massen, wie die Körper von Astronaut und Satellit, kommen daher mit einem kleinen Antrieb aus, während eine größere Masse, wie z.B. die eines Raumschiffs, einen viel stärkeren Schub benötigt, um dieselbe Beschleunigung zu erfahren.



Doch wie viel Energie dem Shuttle auch zugeführt wird, es kann niemals auf die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Der Widerstand seiner Masse wird also irgendwann so groß, dass er nicht mehr überwunden werden kann.

Das bedeutet aber, dass der Widerstand wächst. Er wird umso größer, je schneller die Rakete fliegt. Masse und Widerstand hängen jedoch zusammen, demnach muss auch die Masse wachsen. Man kann also sagen: je schneller die Bewegung eines Körpers ist, umso größer

wird seine Masse. Dieser Effekt heißt relativistische Massenzunahme. Deutlich zeigt er sich erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten.

Und wahrnehmen kann man ihn nur in einem System, das sich am Betrachter vorbeibewegt, wie das folgende Beispiel zeigt. Asteroiden, die seit Jahrmilliarden durch unser Sonnensystem kreisen, sind solche Systeme. Immer wieder kreuzen sie die Bahnen von Planeten und stürzen auf deren Oberfläche.



Je schneller diese kleinen Himmelskörper sind und je mehr Masse sie besitzen, desto größer ist der Schaden, den sie anrichten. Geschwindigkeit und Masse des Asteroiden bestimmen somit das Ausmaß der Katastrophe.

Fliegt nun ein Astronaut mit sehr hohem Tempo im Moment des Aufpralls an dem Ereignis vorbei, stellt sich ihm die Katastrophe anders dar. Für ihn bewegt sich der Asteroid langsamer. Der Grund ist die Zeitdilatation, Einsteins erster Grundsatz, nach dem die Zeit in einem System langsamer vergeht, wenn sich der Beobachter schnell an ihm vorbeibewegt.

Wenn sich der Schaden aus Geschwindigkeit und Masse des Asteroiden ergibt, dann muss wohl die Masse größer sein, wenn er langsamer fällt.



Vom Raumschiff aus gesehen fällt also der Asteroid wie in Zeitlupe. Trotzdem er den Boden fast sanft berührt, ist der Schaden, den er anrichtet, gleich groß wie mit normaler Geschwindigkeit.



Das heißt: vom bewegten System Raumschiff aus gesehen ist die Masse des Asteroiden größer

als für einen Beobachter, der sich im Ruhesystem des Planeten aufhält.



Die Masse eines Körpers ist also nicht konstant. Sie nimmt mit der Bewegungsgeschwindigkeit zu. Damit war Einstein auf ein drittes Naturphänomen gestoßen.

Die relativistische Massenzunahme kann in modernen Teilchenbeschleunigern beobachtet werden. Dort werden geladene Teilchen tief unter der Erde auf einer Kreisbahn auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Wenn sie mit entgegengesetzt fliegenden zusammenstoßen, kann ihre Masse bestimmt werden.





Nahe der Lichtgeschwindigkeit nimmt die Masse um das ca. 40.000-fache zu. Und bei Lichtgeschwindigkeit wäre sie unendlich groß. Als Einstein diesem Phänomen durch Berechnungen zu Leibe rückte, stellte sich heraus, dass es sich dabei um nichts anderes handelt als um eine besondere Form der Energiezunahme.

Die Energie, die z.B. eingesetzt wird, um eine Rakete in Bewegung zu setzen, geht nämlich nicht verloren. Sie überträgt sich auf deren Masse. Dadurch wächst die Masse an, obwohl die Anzahl der Atome, aus denen die Rakete besteht, unverändert bleibt.



Die Zunahme der Masse erfolgt allein durch die Zunahme an Energie. Wenn jedoch die Massenzunahme eine Form der Energiezunahme ist, dann muss die Masse an sich wohl ebenfalls eine Form von Energie sein. Damit hatte Einstein eine grundlegende Entdeckung der Natur gemacht: Masse und Energie sind äquivalent.

$$E = mc^2$$

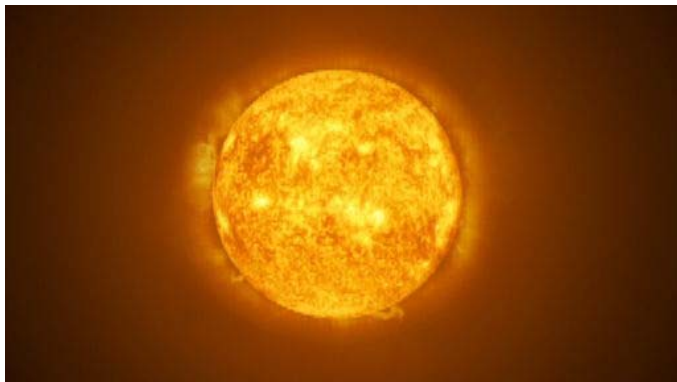
Mathematisch erhält man diese Energie, indem man die Masse mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit multipliziert:  $E = m c^2$  – Einsteins berühmte Formel.

Die Größe der Energie, um die es hier geht, ist atemberaubend. Selbst wenn sich ein Körper nicht bewegt, besitzt 1 Kilogramm seiner Ruhemasse die Energie von 100 Trillionen Joule. Das ist eine Zahl mit 17 Nullen.

Setzt man diese Energiemenge in Arbeitsleistung um, kann damit das Gewicht von 8 Kubikkilometer Wasser gehoben werden. 8 Kubikkilometer Wasser entsprechen der Menge eines durchschnittlich großen Alpensees. Das Ausmaß ist gewaltig. Das Gewicht, das der See auf die Waage bringt, beträgt Achttausend-Milliarden Kilogramm.

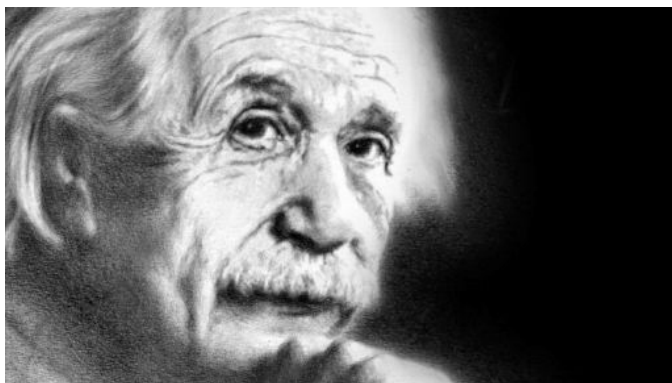
Geradezu unglaublich. Doch mit der Energie, die in einem einzigen Kilogramm Ruhemasse steckt, kann ein See, der 20 Kilometer lang, 2 Kilometer breit, und durchschnittlich 200 Meter tief ist, einen Kilometer hoch gehoben werden.

Zunächst war überhaupt nicht klar, wie diese Äquivalenz von Masse und Energie zu verstehen sei. Man hielt sie bloß für eine theoretische Möglichkeit, und nahm sie nicht besonders ernst. Bis Atomphysiker entdeckten, dass die beinahe kleinsten Teilchen, aus denen die Materie besteht, Protonen und Neutronen, die den Atomkern bilden, durch eine starke Kraft aneinander gebunden sind. Diese Bindungskraft entspricht einer gewissen Energiemenge. Verbinden sich zwei Atomkerne, so kann ein kleiner Teil dieser Bindungsenergie frei werden und entweicht in Form von Strahlung.



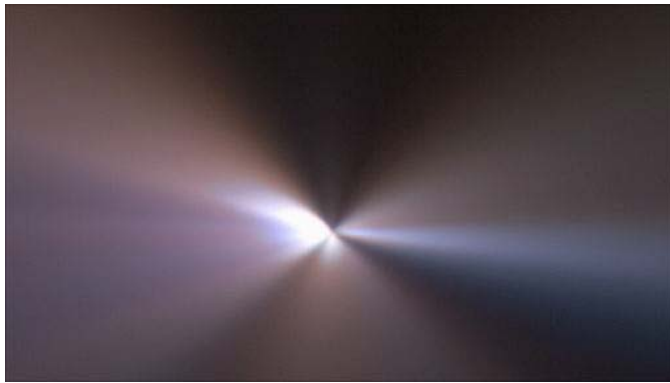
Nun war die Formel  $e=mc^2$  nicht mehr bloß graue Theorie, sondern fand sich in Prozessen in der Natur wieder. Im Inneren unserer Sonne verschmelzen Wasserstoffatome und bilden Heliumkerne. Die dabei frei werdende Energie wird in Form von Photonen freigesetzt. Jetzt konnte man sich endlich erklären, warum unsere Sonne strahlt.

Ähnlich verläuft der Prozess bei der Kernspaltung, der bei der Atombombe genutzt wird. An ihrer Zerstörungskraft können wir unmittelbar nachvollziehen, wie viel Energie in der Materie gebunden ist. Dieser Prozess wird auch in Atomkraftwerken genutzt.



Mit der Umsetzung der Theorie in die Praxis hat Einsteins Spezielle Relativitätstheorie Einzug in unseren Alltag gehalten und beweist so ihre Richtigkeit, auch wenn sie die Welt anders beschreibt, als wir sie erleben, und sie uns deshalb abstrakt und schwer verständlich erscheinen mag.

## DIE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE



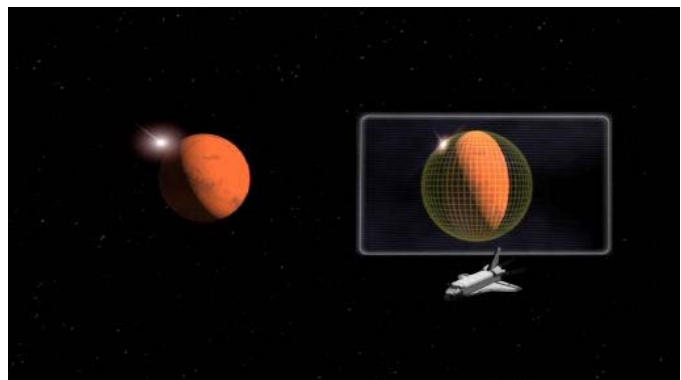
Die Tatsache, dass sich Licht mit nur einer einzigen, immer gleich bleibenden Geschwindigkeit ausbreitet, war für den Physiker Albert Einstein Ausgangspunkt für verblüffende Einsichten in das Wesen der Natur.

Er hatte erkannt, dass die Welt nicht das ist, was sie scheint. Ihre wahren Eigenschaften bleiben uns verborgen. Sichtbar werden sie erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten.

Könnte ein Raumschiff mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fliegen, würde sich den Astronauten eine Welt voll seltsamer physikalischer Phänomene auftun. Im Vorbeiflug an einem Planeten, auf dessen Oberfläche ein Asteroid fällt, würden sie z.B. den Impact wie in Zeitlupe ablaufen sehen.

Obwohl der Asteroid sehr langsam, fast sanft mit dem Planeten zusammenstößt, wäre die Zerstörung enorm, gleich groß wie mit normaler Geschwindigkeit. Daraus lässt sich schließen, dass seine Masse stark angewachsen ist.

Ferner sähen die Astronauten die Himmelskörper auffallend verändert an sich vorüberziehen. Die ursprünglichen Kugelformen wären zu Ellipsoiden geschrumpft.



Diese physikalischen Phänomene sind real: Sie zeigen sich aber nur den schnell fliegenden Raumfahrern. Ein Beobachter, der sich unbewegt am Planet aufhält, bemerkt sie nicht.

Er sieht den Asteroiden mit normaler Geschwindigkeit auf der Oberfläche aufschlagen. Für ihn verändert der Planet weder seine Kugelform noch seine Masse.



Hingegen verkürzt sich aus seiner Sicht das vorbeifliegende Raumschiff. Dessen Masse hat mit der Bewegungsgeschwindigkeit zugenommen, und die Uhr des Astronauten an Bord läuft für ihn langsamer, als seine eigene Uhr am Boden.

Albert Einstein war der Erste, der erkannte, dass Zeit, Raum und Masse nicht jene starren Naturkonstanten sind, für die man sie gehalten hatte.

Er beschrieb ihre Veränderungen in drei einfachen Grundsätzen. Der erste befasst sich mit der Zeit und lautet: bewegte Uhren gehen langsamer als ruhende. Damit ist gemeint, dass für einen Beobachter die Zeit in jenem System langsamer vergeht, das sich an ihm vorbeibewegt, während sich für ihn selbst nichts ändert. Dieses Phänomen nennt man Zeitdilatation.

Gleichzeitig ist die Materie betroffen, und zwar in der Weise, dass bewegte Körper schrumpfen. Das ist der zweite relativistische Effekt, die so genannte Längenkontraktion.

Die dritte Veränderung ist die Massenzunahme. Die Masse bewegter Körper wächst mit der Geschwindigkeit. Einstein beschreibt, dass diese relativistischen Effekte nur in Systemen auftreten, die sich aneinander vorbeibewegen

Wie der Planet und das Raumschiff. Beide Beobachter, der Besucher am Mars und der Astronaut im Raumschiff, sind mit ihrem eigenen Bezugssystem verbunden. Es sind Systeme, die sich dadurch definieren, dass keine äußeren Kräfte auf sie einwirken und daher in ihrem Inneren Schwerelosigkeit herrscht. Sie sind in sich geschlossene Systeme. So genannte Inertialsysteme.



Ein Raumschiff, das die Erde umkreist, scheint ein solches Inertialsystem zu sein. Alle Körper in seinem Inneren sind schwerelos.

Sie schweben geradlinig und mit gleich bleibender Geschwindigkeit. Offensichtlich wirkt keine äußere Kraft auf sie ein. Allerdings nur scheinbar.





Denn über einen längeren Zeitraum bewegen sich die beiden Bälle auseinander. Jener, der der Erde näher ist, überholt den weiter entfernten. Er ist schneller, weil er eine leicht kürzere Umlaufbahn hat. Der Grund ist die Schwerkraft der Erde, die von außen wirkt.

Damit ist das Innere des Raumschiffs aber nicht mehr gänzlich schwerelos. Wenn dieser Effekt auch sehr klein ist, so ist das Raumschiff dadurch kein perfektes Inertialsystem.

Für Einsteins Relativitätstheorie entsteht dadurch ein Problem, denn sie baut gerade darauf auf, dass es völlig kräftefreie Inertialsysteme gibt. Wie weit müsste sich nun das Shuttle von der Erde entfernen, um ihrer Schwerkraft zu entkommen? Die Gravitation nimmt zwar mit dem Quadrat der Entfernung ab, trotzdem wirkt sie unendlich weit.

Sie wird überlagert von der viel stärkeren Anziehungskraft der Sonne. Und das Sonnensystem wird von der noch mächtigeren Gravitation der Milchstraße in ihren Bann gezogen, obwohl ihr Kern 30.000 Lichtjahre weit entfernt ist.

Die Schwerkraft von Galaxien wirkt sich bis auf deren Nachbargalaxien aus. Dadurch bilden sie Galaxiehaufen, die mit anderen Haufen wechselwirken, selbst über Entfernungen von vielen Milliarden Lichtjahren hinweg, bis an den Rand des Universums. Alle gemeinsam beeinflussen sie sogar die Expansion des Kosmos.



Es gibt also keinen Ort im gesamten Universum, der frei von Schwerkraft wäre. Deshalb ist auch nirgendwo ein perfektes Inertialsystem möglich.

Und damit ist die Spezielle Relativitätstheorie nur eingeschränkt anwendbar. Einstein erkannte, dass er seine Theorie verallgemeinern musste, um die Veränderung von Zeit, Raum und Masse auch dann erklären zu können, wenn sie unter der Wirkung der Schwerkraft stehen.

Was ist die Schwerkraft eigentlich? Sollte man sich die Gravitation etwas naiv als unsichtbare Fäden vorstellen, die die Körper nach unten ziehen? Wenn man fällt, wird die Schwerkraft scheinbar wirkungslos. Man spürt sein eigenes Gewicht nicht mehr.



Im Inneren eines Flugzeuges, das den freien Fall simuliert, zeigt es sich deutlich. Während sich die Maschine für kurze Zeit kräftefrei bewegt, beginnen die angehenden Astronauten zu schweben. Sie bewegen sich, frei von jeder Schwerkrafteinwirkung, wie die Bälle im Raumschiff, das sich fern der Erde irgendwo in den Tiefen des Alls befindet.

Freier Fall und Schwerelosigkeit scheinen dasselbe zu sein. Und Einstein stieß auf noch eine Entsprechung, die ihn auf eine Spur für die Lösung seines Problems brachte.

Sie offenbart sich, wenn das Shuttle beschleunigt wird.

Während das Raumschiff schneller wird, behalten die Bälle aufgrund ihrer Trägheit ihren früheren Bewegungszustand bei. Das Schiff holt die Bälle also ein. Boden und Bälle nähern sich an. Sie tun dies immer schneller, solange das Shuttle weiter angetrieben wird.



Ohne Blick nach draußen könnte man allerdings auch meinen, dass das Raumschiff auf der Erde steht, und die Bälle, wie von der Schwerkraft angezogen, zu Boden fallen. Beschleunigung und Schwerkraft scheinen gleichfalls verwandt zu sein.

Diese Übereinstimmung brachte Einstein auf die Idee, den ersten Grundsatz seiner Speziellen Relativitätstheorie 'Bewegte Uhren gehen langsamer' zu verallgemeinern. "Bewegt" ersetzte er durch "Unter Einwirkung der Schwerkraft". 'Unter Einwirkung der Schwerkraft gehen Uhren langsamer'. Damit hatte er eine erste Teillösung gefunden. Der neue Grundsatz konnte nun für jede Situation angewendet werden.

Praktisch bedeutet das für unser Leben: Im Tal gehen Uhren langsamer als auf der Bergspitze. Die Zeit läuft umso langsamer, je näher wir dem Erdmittelpunkt sind.



Auf Meereshöhe kann man seinen Urlaub um den winzigen Bruchteil einer Sekunde länger genießen, als auf dem Gipfel eines Berges.

Für den Bergsteiger läuft die Zeit ein wenig schneller.



Im kleineren Ausmaß gilt dies auch für Menschen, die sich auf der Spitze eines Turms befinden. Auch für sie läuft die Zeit minimal schneller, als für die Passanten unter ihnen auf der Straße. Sogar deren Kopf altert etwas schneller als ihre Füße, weil er vom Erdmittelpunkt weiter entfernt ist. Die Unterschiede sind winzig, weil die Erde nur ein kleiner Himmelskörper mit relativ geringer Anziehungskraft ist. Dennoch sind die Effekte groß genug, um in der Realität eine Rolle zu spielen.



So würden die Satelliten des GPS-Systems falsche Daten liefern, wenn der etwas langsamere Zeitfluss am Erdboden im Verhältnis zur Umlaufbahn in 25.000 Kilometer Höhe unberücksichtigt bliebe.

Dass die Zeit von großen Himmelskörpern beeinflusst wird, war eine weitere große Entdeckung. Allerdings mit der Folge, dass sich neue Ungereimtheiten ergeben. Wieder ist es das Licht, das die Vorstellung von Raum und Zeit beeinflusst.

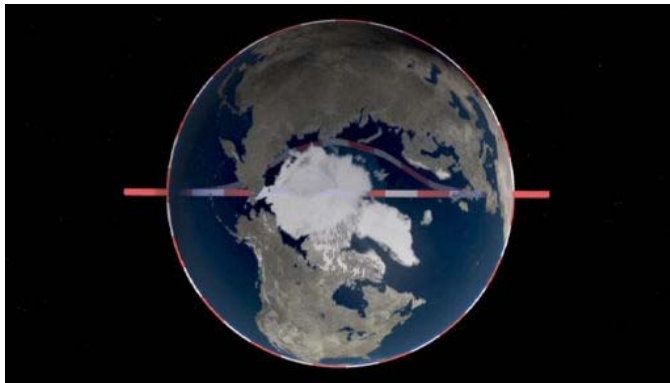
Aufgrund der immer gleich bleibenden Geschwindigkeit legen die Lichtphotonen in einer vorgegebenen Zeiteinheit stets dieselbe Strecke zurück. Die absolute Lichtgeschwindigkeit lässt keine unterschiedlichen Längen zu. Wenn die Massen großer Himmelskörper jedoch

bewirken, dass die Zeit in ihrer Nähe langsamer läuft, dann haben die Photonen mehr Zeit, sich auszubreiten, wenn sie sich nahe an ihnen vorbeibewegen.

Die längere Wegstrecke, die daraus resultiert, bedeutet jedoch eine höhere Geschwindigkeit. Es gibt aber nur eine Lichtgeschwindigkeit. Unterschiedlich lange Wegstrecken sind deshalb unmöglich.

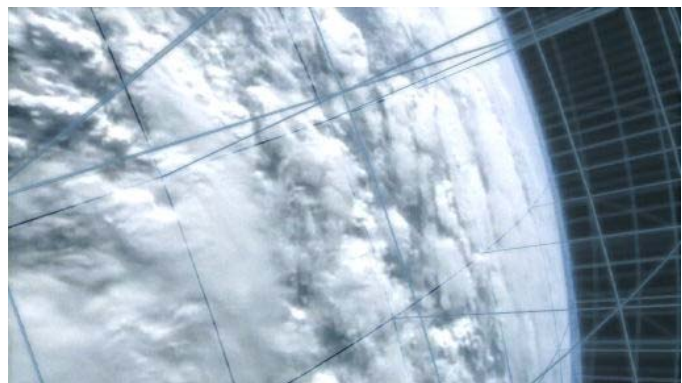
Eine denkbare Lösung für den Widerspruch wäre es, den Raum schrumpfen zu lassen. In diesem Sinn verallgemeinerte Einstein nun auch den zweiten Grundsatz seiner Speziellen Relativitätstheorie. Aus "Bewegte Körper schrumpfen." wurde: "Körper schrumpfen unter der Einwirkung der Schwerkraft".

Jetzt schienen alle Fragen gelöst. Die Gravitation lässt Körper schrumpfen und verlangsamt den Gang von Uhren. Mit den beiden neuen Grundsätzen kann jede erdenkliche Situation in der Natur erklärt und beschrieben werden. Allerdings war damit das Geheimnis der Gravitation noch nicht zur Gänze gelüftet. Denn wenn Körper in der Nähe großer Massen schrumpfen, entsteht ein neues Problem - mit verblüffenden Folgen.



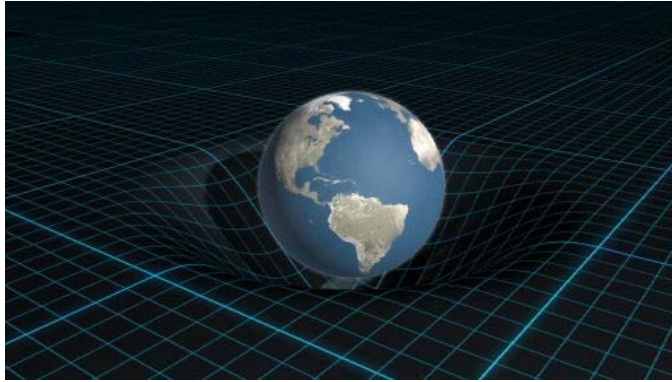
Legt man z.B. Maßstäbe durch das Innere der Erde, um ihren Durchmesser zu messen, dann schrumpfen sie, weil sie der Schwerkraft unterliegen. Dadurch passen aber mehr Maßstäbe ins Innere, und es errechnet sich ein größerer Durchmesser, als man aufgrund des Erdumfangs erwarten würde. Was bedeutet das? Ist innerhalb unseres Planeten mehr Platz vorhanden?

Einstein zog tatsächlich den Schluss, dass in der Nähe eines großen Himmelskörpers das Volumen innerhalb eines Raumgebiets zunimmt. Und sich damit die Geometrie des Raumes ändert. Einfach ausgedrückt kann man sagen: der Raum vergrößert sich.



Wie aber soll man sich das vorstellen? Wo ist Platz für mehr Raum? Einen dreidimensionalen Raum, in dem mehr Platz vorhanden ist, als man annehmen würde, können wir uns nicht vorstellen. Deshalb vereinfachen wir das Phänomen in einem zweidimensionalen Modell.

Die Ebene dient als Symbol für den Raum. Wenn man nun davon ausgeht, dass der Raum größer wird, dann dehnt er sich aus, und krümmt sich dabei.

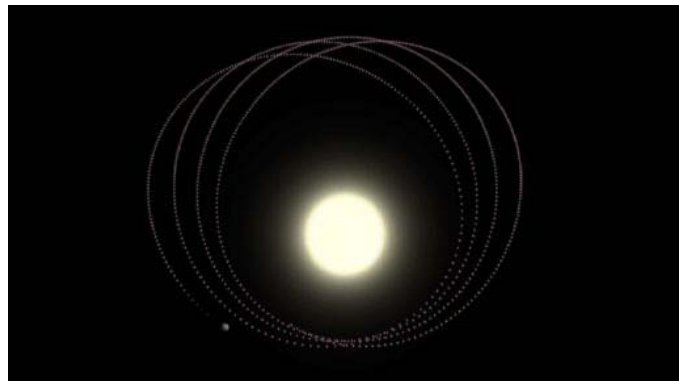


Durch die Krümmung entsteht der nötige Platz. Mit dieser Lösung hatte Einstein eine neue Sicht auf das Wesen der Natur geschaffen. Er sagt, dass große Massen, wie z.B. Himmelskörper, den Raum verändern. Oder einfach ausgedrückt: er erklärt die Schwerkraft als Krümmung des Raumes.

Diese Sichtweise ändert unser Verständnis von der Natur grundlegend. Ging das klassische Gravitationsgesetz Newtons davon aus, dass Himmelskörper ein Gravitationsfeld erzeugen, in dem alle Körper nach unten gezogen werden, so ersetzte Einstein dies durch die Vorstellung, dass Körper in der Krümmung der Raumzeit wie in einem Trichter nach unten fallen.

Nun kann die Erdumlaufbahn eines Objekts wie z.B. des GPS-Satelliten verstanden werden als eine Bewegung, die von der Raumkrümmung beeinflusst ist. Physikalisch ist der Satellit ein frei fallender Körper, der sich gleichförmig und geradeaus bewegt. Durch den Gravitationstrichter wird sein Weg jedoch in eine Kreisbahn gezwungen. Die Krümmung des Raumes hindert ihn daran, sich geradlinig fortzubewegen. Dasselbe gilt für die Planeten, die ebenfalls frei fallende Körper sind. Durch die Raumkrümmung sind sie jedoch in einer Umlaufbahn gefangen.

Mit dieser Erklärung konnte jetzt das Rätsel um den Merkur gelöst werden, der eine Besonderheit aufweist. In Sonnennähe fällt der Planet nämlich tiefer in den Trichter, wodurch sich seine Bahn um wenige Grade verschiebt. Die Bewegung des Planeten folgt damit keiner geschlossenen Bahn mehr, sondern zeichnet die Form einer Rosette.



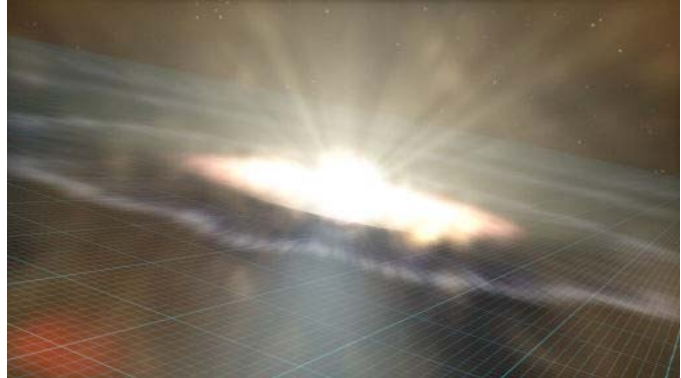
Dies konnte mit der Theorie Isaac Newtons, der 250 Jahre zuvor das klassische Gravitationsgesetz formuliert hatte, nicht erklärt werden. Erst Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie lieferte die Begründung. Die Raumkrümmung lenkt sogar Lichtstrahlen ab. Das ist nach Newton ebenfalls nicht möglich, denn die Photonen besitzen keine Masse und können deshalb gravitativ nicht beeinflusst werden.



Diese so genannte Lichtbeugung wurde 1919 anhand einer Sonnenfinsternis das erste Mal praktisch nachgewiesen. Wenn der Mond die Sonne abdunkelt, werden für wenige Minuten die dahinter liegenden Sterne sichtbar, sodass ihre Positionen vermessen werden können.

Und tatsächlich waren sie in Sonnennähe leicht verschoben. Ihre wahren Positionen und das Ausmaß ihrer Verschiebung hatte Einstein richtig voraus berechnet. Das Licht wird nahe der Sonnenmasse abgelenkt und bewegt sich auf einer gekrümmten Bahn. Ein Beobachter auf der Erde vermutet deshalb eine scheinbare Position, die mit der tatsächlichen aber nicht identisch ist. Einstein sagt Raumkrümmungen voraus, die noch viel extremer sind.

Wenn am Ende seines Lebenszyklus ein Stern unter dem enormen Druck der eigenen Schwerkraft in sich zusammen stürzt, krümmt er den Raum so stark, dass sich ein Teil der Raumzeit von der Aussenwelt abkapselt.



Aus dem Krümmungstrichter entkommt schließlich kein Licht mehr, und der Stern wird unsichtbar, ein so genanntes Schwarzes Loch.

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist nicht zuletzt eine Theorie des Kosmos. Sie bildet die Grundlage für die Frage nach der Herkunft und dem Schicksal des Universums. Ihre Gleichungen sagen uns, dass das Universum in einem Urknall entstanden ist und sich zu einer gekrümmten Raumzeit entwickelt hat.

Es ist erstaunlich, wie Einstein seine Relativitätstheorie ausarbeiten konnte, obwohl sie Ereignisse beschreibt, die gänzlich im Gegensatz zu unseren Erfahrungen im Alltag stehen. Er verdankte diese Leistung seiner unglaublichen Intuition und der Bereitschaft, Dinge aus einer anderen Perspektive zu betrachten. Einstein war eines der letzten Genies.

Medieninhaber und Herausgeber:

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG,  
WISSENSCHAFT UND KULTUR

Medienservice

A-1014 Wien, Minoritenplatz 5

Tel. 01/53 120 / 4829, Fax: 01/53 120 / 4848

**Bestellungen:**

Tel. 01/982 13 22-310, Fax: 01/982 13 22-311

E-Mail: [office@amedia.co.at](mailto:office@amedia.co.at)

Verlags- und Herstellungsort: Wien