

## "Gedehnte Zeit & Gekrümmte Räume - Eine Einführung in die Relativitätstheorie"

### Wundersame Einstein-Welt

Seit Albert Einstein beschreiben die Forscher das Universum mit einer ebenso faszinierenden wie bizarr anmutenden Theorie: Aus gerade wird krumm, aus lang wird kurz, aus schnell wird langsam, aus leicht wird schwer. So passt ein großes Auto plötzlich in eine zu kleine Parklücke, kosmische Reisen werden irdische Verjüngungskuren, wen andere für zu schwer halten, der ist vielleicht einfach nur zu schnell - und Bayern altern schneller als Ostfriesen. Ein Universum, dass sich die Räume biegen... Willkommen in der Welt der Relativitätstheorie!

### *Spezielle Relativitätstheorie*

#### **Neuer Blick auf Raum & Zeit**

Albert Einstein kam mit der Speziellen Relativitätstheorie keineswegs aus dem Nichts. Dass Raum und Zeit ganz merkwürdige Phänomene sind, war den Physikern spätestens seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert klar. Der Franzose Henri Poincaré und der Niederländer Hendrik A. Lorentz hatten sozusagen schon einige Teilaspekte der Relativitätstheorie entwickelt. Den US-Amerikanern Albert Michelson und Edward Morley war der experimentelle Nachweis gelungen, dass Licht unabhängig von der Bewegungsrichtung für einen Betrachter immer gleich schnell ist. Allerdings bereitete die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit der Fachwelt großes Kopfzerbrechen.

Denn in der klassischen Physik lassen sich Geschwindigkeiten simpel addieren: Zwei Autos, die sich auf der Landstraße mit jeweils Tempo 100 begegnen, haben relativ zueinander eine Geschwindigkeit von 200 Kilometern pro Stunde. Führen beide Autos nun fast mit Lichtgeschwindigkeit, so hätten sie der klassischen Physik zufolge relativ zueinander fast doppelte Geschwindigkeit. Einstein fand heraus, dass dies nicht so ist.

Er akzeptierte prinzipiell die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und machte sie zum Schlüssel für sein ganz anderes Weltverständnis. Seine Arbeit mit dem technisch klingenden Titel "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" erschien 1905. Damit begründete Einstein seine revolutionär neue Sichtweise auf Raum und Zeit, auf Materie und Energie.

### *Spezielle Relativitätstheorie*

#### **1. Relativität: Bewegung, Ort und Geschwindigkeiten sind relativ**

Oben und unten, links und rechts sind vertraute Begriffe. Doch wo ist oben? Wo unten? Das hängt vom Betrachter ab. Für Menschen in Europa ist Australien unten - aber die Australier sehen das genau umgekehrt. Auch wie man Bewegung wahr nimmt, hängt vom Standort ab: Ist man schnell oder langsam, wenn man durch einen fahrenden Zug geht? Langsam für die Mitreisenden, noch schneller als der Zug für Betrachter am Bahndamm. *Bewegung, Ort und Geschwindigkeiten sind relativ und hängen vom Standpunkt des Betrachters ab!* Wenn man nicht hinaus blicken kann, lässt sich während der Fahrt nicht einmal entscheiden, ob der Zug steht oder in konstantem Tempo unterwegs ist. Nach dem *Relativitätsprinzip* sind Ruhe und gleichmäßige Bewegung physikalisch nicht zu unterscheiden.

#### **Ortsangaben**

Zwei Menschen auf der Erde - der eine ist unten, der andere oben. Und jetzt? Nun ist der andere oben! Oben und unten, links oder rechts - solche Bezeichnungen sind nur eine Frage des Standpunkts. Diese Überlegung mag vielen sehr einfach vorkommen. Aber um die Relativitätstheorie in etwa zu erfassen, muss man sich zunächst ein paar grundlegende Dinge klar machen. Wenn man das tut, hat man plötzlich Zugang zu faszinierenden Phänomenen der Natur, wie sie kurioser und verblüffender kaum sein können. Man muss sich nur auf die Gedankenexperimente einlassen, die scheinbar Absolutes und vermeintlich Vertrautes in Frage stellen.

## Bewegung

Sind Sie in Ruhe? Vermutlich, ja. Bezogen auf den Schreibtisch sind Sie vielleicht in Ruhe, doch bezogen auf andere Himmelskörper sind Sie schneller unterwegs als Michael Schumacher. Sie drehen sich mit der Erde mit. Dann laufen Sie mit der Erde um die Sonne und schließlich mit der Sonne um das Zentrum der Milchstraße. Von hier aus gesehen wirbeln Sie in jeder Minute mehr als 12.000 Kilometer durch das Weltall. Ruhe und Bewegung sind im Alltag also sehr relativ...

Ortsangaben sind nicht absolut, sondern vom Standpunkt abhängig. Das gilt auch für Bewegungen. Man kann es gar nicht entscheiden. Ob wir am anderen Zug entlang fahren - oder ob der andere Zug an uns vorbei fährt: Beides sieht gleich aus. Denn gleichförmige Bewegung, also Bewegung im immer gleichen Tempo, ist physikalisch von Ruhe nicht zu unterscheiden. Man kennt das aus dem Zug - den Ruck beim Anfahren merkt man, aber Tempo 200 spürt man nicht.

## Geschwindigkeit

Wie schnell bewegt sich eine Person, die durch den Zug geht? Auch hier gibt es keine für alle gültige Antwort: *Im Zug* betrachtet geht die Person sehr langsam, vielleicht mit 5 Kilometern pro Stunde. Aber *von außen* ist die in Fahrtrichtung laufende Person sogar noch etwas schneller als der Zug, vielleicht 205 Kilometer pro Stunde. Beim Blick von außen kommt zur Geschwindigkeit des Zuges noch das Lauftempo der Person hinzu. Die Geschwindigkeiten addieren sich.

## Relativitätsprinzip

Wo landet ein Ball, den man im Zug senkrecht nach oben wirft? Wieder in der Hand - und zwar egal, ob der Zug im Bahnhof steht oder durch die Landschaft saust. Ob der Zug still steht oder sich gleichmäßig bewegt, spielt für den geworfenen Ball keine Rolle: Er verhält sich vom Zug aus gesehen stets gleich.

Was für eine Flugbahn legt der Ball zurück? Auf diese vermeintlich simple Frage gibt es keine klare Antwort: Mitreisende *im Zug* sehen, wie der Ball senkrecht nach oben fliegt und wieder nach unten fällt. Aber *von außen* - vom Bahnsteig aus - betrachtet, legt der Ball einen Bogen zurück. Umgekehrt: Wirft eine Person auf dem Bahnsteig den Ball hoch, so legt der Ball - vom fahrenden Zug aus betrachtet - einen Bogen zurück.

Bewegung ist also relativ: Wie man sie wahrnimmt, hängt allein vom Standpunkt des Betrachters ab - denken Sie an Ihren ehemals ruhenden Schreibtisch. Einig sind sich alle Betrachter nur darüber, dass der Ball geworfen und wieder gefangen wird - denn das ist ein Ereignis. Und Ereignisse sind für alle gleich. Aber Angaben zur Bewegung und zum Ort sind äußerst relativ. Ob man in Ruhe ist oder sich gleichmäßig bewegt - anhand von Experimenten lässt sich das nicht unterscheiden. Dem geworfenen Ball im Zug sieht man nicht an, ob sich der Zug bewegt oder ob er steht.

## Fazit

Nach dem Relativitätsprinzip sind gleichmäßige Bewegung und Ruhe physikalisch nicht zu unterscheiden. Geschwindigkeits- und Ortsangaben - bisher für die meisten sicher etwas sehr Absolutes - sind äußerst relativ: Unterschiedliche Beobachter nehmen Phänomene unterschiedlich wahr.

### Spezielle Relativitätstheorie

## 2. Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant - Licht lässt sich nicht beschleunigen

Eine Eisenbahnfahrt durchs Land. Geht man im Waggon spazieren, bewegt man sich noch schneller durch die Landschaft als der Zug selbst. Denn Zugtempo und Laufgeschwindigkeit addieren sich - so sieht es ein Beobachter außerhalb des Zuges. Wenn der Lokführer in voller Fahrt das Licht anschaltet, ist dann auch das Licht schneller als bei still stehender Lok? Nein! Für Licht gilt diese Regel nicht. Licht ist immer gleich schnell - denn *die Lichtgeschwindigkeit ist konstant*. Sie beträgt knapp 300.000 Kilometer pro Sekunde. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist *die* fundamentale Tatsache, auf der Einsteins Spezielle Relativitätstheorie aufbaut.

## Beispiel

Die Lichtgeschwindigkeit ist *immer* gleich. Der laufende Schaffner mag schneller als der Zug sein - das Licht aber ist immer gleich schnell, egal welches Tempo der Zug hat.

Dieser Zug rast mit 5 Kilometern pro Sekunde über die Gleise, also etwa 18.000 Kilometern pro Stunde. Trotzdem ist das Licht aus seinen Scheinwerfern "nur" die üblichen 300.000 Kilometer pro Sekunde schnell.

Das Zusammenzählen der Geschwindigkeiten gilt hier nicht. Diese Erkenntnis ist die entscheidende Basis für die Relativitätstheorie. Einstein hat erkannt, welche dramatischen Folgen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hat - und genau das führt zu den Effekten, wie sie in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

## Überlichtgeschwindigkeit

Immer wieder tauchen Meldungen von Überlichtgeschwindigkeiten auf, die Einstein vermeintlich widerlegen. Vergessen Sie's! Bisher hat sich alles als haltlos herausgestellt. Meistens geht es dabei um rein geometrische Effekte, wie die Bewegung eines Schnittpunktes. Man nennt sie nicht-physikalische Bewegungen.

Hier ein Beispiel: Der Trecker zieht eine Latte hinter sich her. Der Schnittpunkt der Latte mit dem Straßenrand bewegt sich mit höherer Geschwindigkeit als die Latte. Bei einem Trecker tempo von 25 Kilometern pro Stunde bewegt sich der Schnittpunkt bereits mit 44 Kilometern pro Stunde nach rechts.

Mithilfe der Geometrie kann so selbst ein langsamer Traktor scheinbar Überlichtgeschwindigkeit erzeugen: Je kleiner der Winkel zwischen Latte und Straßenrand ist, desto schneller bewegt sich der Schnittpunkt. Bei einem winzig kleinen Winkel von ein paar Tausendstel Bogensekunden - das ist hier im Bild nicht darstellbar - bewegt sich der Schnittpunkt mit mehr als Lichtgeschwindigkeit, obwohl der Trecker nur mit 25 Kilometern pro Stunde zieht.

Zwar bewegt sich der Schnittpunkt dann überlichtschnell nach rechts - aber am Schnittpunkt ist in jedem Moment ein anderes Stück Materie. Es läuft also keine Materie schneller als das Licht nach rechts. Echte Informationen, wie ein Lichtblitz, ein Funkspruch oder ähnliches laufen maximal mit Lichtgeschwindigkeit - schneller geht es nicht.

## Fazit

Licht ist immer gleich schnell - es lässt sich nicht beschleunigen oder verlangsamen. Das ist *die* entscheidende Basis für die Spezielle Relativitätstheorie, die man einfach akzeptieren muss, um den Rest zu verstehen. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wurde samt den daraus folgenden Konsequenzen millionenfach im Experiment überprüft und verifiziert. Was für erstaunliche Konsequenzen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gerade für unsere Vorstellungen von Raum und Zeit hat, wollen wir im folgenden Kapitel zeigen

### *Spezielle Relativitätstheorie*

#### **3. Zeitdehnung: Bewegte Uhren gehen langsamer**

Die Uhr am Handgelenk geht immer gleich schnell, so scheint es. Tatsächlich läuft die Zeit unterschiedlich schnell ab - je nachdem, wie schnell man sich bewegt. Faustregel: Je schneller man unterwegs ist, desto langsamer vergeht die Zeit - *bewegte Uhren gehen langsamer*, zumindest für ruhende Beobachter, nicht für die Reisenden selbst. Eine Reise zum nächsten Stern wird schnell zur himmlischen Verjüngungskur - jedenfalls dann, wenn man fast mit Lichtgeschwindigkeit hin und zurück reist. Darum geht es bei dem berühmten Zwillingsparadoxon.

## Herleitung

Mithilfe dieser Lichtuhr lässt sich das Phänomen herleiten: In der Lichtuhr läuft ein Lichtblitz nach oben, wird dort gespiegelt und läuft wieder nach unten, wird dort gespiegelt ... und so weiter. Der Lichtblitz läuft also hoch und wieder runter und wieder hoch- und immer wenn der Blitz oben oder unten ankommt, ist eine Zeiteinheit vorbei, zum Beispiel eine Sekunde.

Jetzt befindet sich die Uhr in einem fahrenden Zug. Für Beobachter *im Zug* ändert sich nichts. Nach dem Relativitätsprinzip laufen physikalische Vorgänge in Ruhe genauso ab, wie bei gleichmäßiger Bewegung. Aber ein Beobachter *von außen* sieht das alles etwas anders:

Während der Lichtblitz nach oben läuft, bewegt sich für ihn die Uhr nach rechts. *Im Zug* betrachtet läuft der Lichtblitz wie gehabt senkrecht von unten nach oben und wieder zurück. Aber *von außen* betrachtet legt der Lichtblitz eine schräge - und somit längere! - Strecke zurück.

Doch der wichtigste Grundsatz lautet: Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant: Also muss es entsprechend länger dauern, bis der Lichtblitz von außen gesehen auf der schrägen Bahn das Ziel oben in der Lichtuhr erreicht hat. Von außen betrachtet dauert eine Zeiteinheit auf der Lichtuhr im Zug also länger als auf dem Bahnsteig. Das heißt: Bewegte Uhren gehen – für einen ruhenden Beobachter – langsamer. Diesen Effekt sieht nur ein außenstehender Beobachter. Der Reisende selbst merkt von dieser Zeitdehnung nichts.

Das gilt nicht nur für die vielleicht etwas komisch anmutenden Lichtuhren, die hier zur Veranschaulichung gezeigt wurden. Es gilt generell, dass für einen außenstehenden, ruhenden Beobachter die Zeit in Bewegung langsamer abläuft - das betrifft jede beliebige Uhr, und jeden entsprechenden Prozess in der Natur oder im menschlichen Körper, einfach alles.

*Der Reisende im Zug* merkt davon nichts - aus seiner Sicht funktioniert die Uhr ganz normal. Blickt man aus dem gleichmäßig bewegten Zug nach außen kehren sich die Verhältnisse sogar um: Die Uhren draußen scheinen langsamer zu laufen als die im Zug.

Beide! Es ist eine Frage des Standpunktes. Solange sich alles gleichmäßig bewegt, kann man das nicht entscheiden - denn es ist eine Frage des Standpunktes. Auch wenn dieser Effekt der Zeitdehnung erst bei sehr großen Geschwindigkeiten, etwa ab 10 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, offensichtlich wird, ist er prinzipiell auch bei uns vertrauten Geschwindigkeiten vorhanden. Es ist aber kaum messbar.

## Zeit steht still

Wenn der Zug immer schneller fährt, dann wird *von außen* betrachtet die Strecke, die der Lichtblitz zurücklegt, immer schräger und immer länger. Das Licht braucht immer länger, bis es wieder oben ankommt und eine weitere Zeiteinheit verstrichen ist. Daraus ergibt sich: Je schneller man sich bewegt, desto langsamer vergeht - von außen gesehen - die Zeit.

Was passiert bei Lichtgeschwindigkeit, wenn man also auf den Lichtwellen mitreiten könnte? Bewegt man sich so schnell wie das Licht, so steht die Zeit still. Licht verbraucht keine Zeit, Licht altert nicht!

## Zwillingsparadoxon & Zeitreisen

Auf lichtschnellen Reisen ewig jung zu sein, bleibt ein Traum: Denn Materie kann niemals mit Lichtgeschwindigkeit reisen. Aber würde es ein Raumschiff auf 87 Prozent der Lichtgeschwindigkeit schaffen, so verginge an Bord nur ein Jahr, während auf der Erde zwei Jahre ins Land streichen. Eine Spritztour durch die Milchstraße in diesem Tempo ließe den zu Hause gebliebenen Zwilling nach der Rückkehr ganz schön alt aussehen.

Manche bezeichnen so etwas als Zeitreise. Doch man kann mit Hilfe sehr schneller Reisen in der Zukunft nur etwas jünger sein, als man ohne Reise gewesen wäre. Wieder einholen kann man diese Zeitdifferenz nicht mehr. Die Vergangenheit ist für Reiseabenteuer nicht zugänglich. Dazu müsste man schneller sein als das Licht - und genau das ist nicht möglich.

Die oben beschriebenen Effekte hat man übrigens mit Atomuhren nachweisen können, wie der folgende Abschnitt zeigt.

## Nachweis

Das Phänomen, wie es im Zwillingsparadoxon beschrieben wurde, ist gut zu messen, nicht mit Zwillingen, aber mit Atomuhren: Physiker haben zwei Uhren synchronisiert und dann die eine an Bord eines Flugzeuges auf Reisen geschickt. Als man nach der Rückkehr die Uhren verglichen hat, ging die Uhr, die im Flugzeug gewesen war, um etwa eine milliardstel Sekunde nach... Einstein bestätigt!

Aber warum geht die eine Uhr nach? Könnte man nicht genauso gut sagen, dass die Uhr im Flugzeug in Ruhe war und sich die am Boden bewegt hat? Ist es nicht egal, ob ich die Uhren in Bewegung oder in Ruhe betrachte? Achtung! Nur solange sich alle gleichmäßig und geradlinig zueinander bewegen, ist der Effekt austauschbar: Vom Flugzeug aus gesehen scheint die Uhr am Boden langsamer zu gehen, vom Boden aus gesehen die im Flugzeug. Kommt das Flugzeug aber zurück zum Ausgangspunkt, dann gilt das Relativitätsprinzip nicht mehr. Dann haben Kräfte auf das Flugzeug eingewirkt, damit es wenden konnte, es war sicher nicht gleichmäßig bewegt. Dann ist dieser Effekt nicht mehr allein vom Standort abhängig. Die Zeitdehnung ist nicht mehr austauschbar - mit den bekannten Konsequenzen. Nach der Landung sieht man, dass die Zeit an Bord ganz anders - eben langsamer - abgelaufen ist als am Boden.

## Fazit

Bewegte Uhren gehen langsamer - jedenfalls für außenstehende Beobachter. An Bord merkt man davon nichts - erst bei der Rückkehr wird der Unterschied offenbar. Je schneller man unterwegs war, desto größer wird der Unterschied. Bei Lichtgeschwindigkeit steht die Zeit sogar still. Auch Zeit ist also nichts Absolutes, sondern ziemlich relativ...

### *Spezielle Relativitätstheorie*

#### **4. Längenkontraktion: Bewegte Objekte schrumpfen**

Schnelle Bewegung lässt einen ruhenden Beobachter nicht nur die Zeit anders wahrnehmen - auch der Raum erscheint bei hohem Tempo ganz anders. Je schneller man sich bewegt, desto stärker verkürzen sich die Strecken und desto kürzer erscheint man einem außenstehenden Beobachter. *Bewegte Objekte schrumpfen in Bewegungsrichtung*. Das führt zu einem kuriosen Gedankenexperiment: Wenn man nur schnell genug einparkt, passt sogar ein fünf Meter langes Auto locker in eine drei Meter große Parklücke - ohne dass es kracht. Nur stehen bleiben darf man nicht...

## Herleitung

Hier bewegen sich Lichtsignale in einem Hohlspiegel. Im Innern werden Lichtblitze in alle vier Richtungen geschickt. Die Lichtblitze werden reflektiert und treffen sich wieder gemeinsam in der Mitte. Alles wie erwartet - so in Ruhe...

Nun bewegt sich der Hohlspiegel gleichmäßig nach rechts. Mitreisende nehmen natürlich keinen Unterschied wahr. Es gilt das Relativitätsprinzip: Alle Vorgänge laufen identisch ab, egal ob man in Ruhe ist oder gleichmäßig und geradlinig bewegt.

Aber für Beobachter *von außen* sieht die Situation anders aus: Die Lichtblitze starten und werden reflektiert. Aber nun zeigen sich Unterschiede zwischen den senkrecht und waagrecht laufenden Lichtblitzen. Sie treffen nicht mehr gemeinsam im Zentrum ein.

Für den außen stehenden Beobachter legen die senkrecht nach oben bzw. unten laufenden Blitze eine Zickzack-Strecke zurück - genau wie die Blitze der Lichtuhr bei der Zeitdehnung im vorangegangenen Kapitel. Auch diese Blitze brauchen also länger als beim ruhenden Spiegel.

Aber die waagrecht laufenden Blitze legen sogar einen noch längeren Weg zurück - und brauchen entsprechend länger. Das aber kann nicht sein. Denn das gemeinsame Eintreffen der vier Lichtblitze im Zentrum ist für alle Beobachter ein feststehendes Ereignis - und Ereignisse sind absolut, egal, von wo man sie beobachtet.

Wie lässt sich dieses Rätsel lösen? Auch hier gilt: Licht ist immer gleich schnell. Wenn alle Blitze gleichzeitig im Zentrum eintreffen sollen, muss sich der Hohlspiegel in Bewegungsrichtung verkürzen. Der Kreis wird für den außenstehenden Beobachter oval. Jetzt stimmt es wieder - alle Lichtblitze legen eine gleich lange Strecke zurück und treffen gleichzeitig wieder im Zentrum ein. In Bewegungsrichtung verkürzen sich die Strecken - oder: Bewegte Körper schrumpfen, jedenfalls für den ruhenden, außenstehenden Beobachter. Natürlich ist auch dieses Phänomen keine Besonderheit des Hohlspiegels, sondern gilt universell.

Alles Unsinn? Alles theoretischer Humbug, den nie jemand gemessen hat? Von wegen... Zeitdehnung und Längenkürzung sind alltägliche Effekte in der Natur - allerdings sind diese Effekte erst bei sehr großen Geschwindigkeiten auffällig. Das folgende Beispiel zeigt das.

## Beispiel

Aus dem Kosmos prasselt ständig "kosmische Strahlung" auf die Erdatmosphäre. In etwa 20 Kilometern Höhe stößt diese Strahlung mit den Luftteilchen zusammen. Dabei entstehen Müonen - unglaublich schnelle Teilchen mit einer extrem kurzen Lebensdauer. Sie bewegen sich mit 99,98 Prozent der Lichtgeschwindigkeit und zerfallen wieder innerhalb von nur zwei Mikrosekunden. Während ihrer extrem kurzen Lebensdauer legen sie gerade einmal 600 Meter zurück.

Ein trostloses Dasein am Rande der Atmosphäre? Nein, die Physiker messen die Müonen sogar am Erdboden. Wie kann das sein? Wie überbrückt ein Müon, das doch nur 600 Meter schaffen kann, die 20 Kilometer bis zum Erdboden? Hier hilft die Relativitätstheorie.

Bei 99,98 Prozent der Lichtgeschwindigkeit sind Zeitdehnung und Längenkürzung bedeutende Effekte. Bewegte Uhren gehen langsamer. Die Zeitdehnung macht hier etwa einen Faktor 50 aus! Für einen ruhenden Beobachter auf der Erde vergehen etwa 100 Mikrosekunden, bis auf der Uhr des Müons die Lebensdauer von zwei Mikrosekunden abgelaufen ist. In 100 Mikrosekunden legt das Müon aber 30 Kilometer zurück und schafft so locker die Distanz bis zum Erdboden.

Für das Müon selbst vergehen dennoch nur zwei Mikrosekunden - keine Chance, den Boden zu erreichen? Doch: Hier kommt die Längenkürzung ins Spiel. Aus Sicht der Müonen rast die Strecke in extremer Geschwindigkeit vorbei, die Strecke schrumpft also. Für das Müon ist der Detektor nur 400 Meter entfernt, deutlich innerhalb seiner Reichweite von 600 Metern.

Für den ruhenden Beobachter auf der Erde ist die Zeitdehnung der entscheidende Effekt. Für das Müon dagegen ist es die Längenkürzung. Doch im Ergebnis ist das gleich: Das Müon kommt unten an. Zeitdehnung und Längenkürzung sind an diesem Beispiel direkt zu sehen. Ein weiterer Beweis für die Gültigkeit der Relativitätstheorie.

## Fazit

Bei sehr schneller Bewegung verkürzen sich die Strecken, die man zurücklegt, stark. Umgekehrt erscheint einem ruhenden Beobachter ein schnell bewegtes Objekt in Bewegungsrichtung stark geschrumpft, gleichsam gestaucht. Längenkürzung und die im vorherigen Kapitel beschriebene Zeitdehnung treten immer gemeinsam auf. Zeit und Raum sind nichts Absolutes mehr.

### *Spezielle Relativitätstheorie*

## **5. Gleichzeitigkeit ist relativ**

Uhren gehen langsamer, Strecken schrumpfen - verrückte Einstein-Welt. Doch das war noch nicht alles: Denn auch unser "Jetzt", unsere *Gleichzeitigkeit ist relativ*. "Jetzt" ist immer etwas sehr Lokales. Für einen Fahrgast in der Mitte eines Eisenbahnwaggonns öffnen sich die Türen vorne und hinten gleichzeitig. Für einen Beobachter am Bahnsteig öffnet sich aber die ihm nähere Tür *vor* der anderen Tür, weil er die zuerst sieht. Zwei unterschiedliche Beobachter erleben die Gleichzeitigkeit eines Ereignisses also unterschiedlich. Denn Gleichzeitigkeit ist relativ - auch sie hängt vom Standort des Betrachters ab.

Herleitung

Hier haben wir es wieder mit dem Hohlspiegel aus dem vorangegangenen Kapitel zu tun. Vom Zentrum aus laufen Lichtblitze in alle vier Richtungen. Die Lichtblitze werden am Rand reflektiert und treffen sich wieder in der Mitte. Es finden sechs Ereignisse statt: Das Aussenden der Lichtblitze, vier Reflexionen am Rand und das Eintreffen in der Mitte.

Jetzt bewegt sich der Hohlspiegel gleichmäßig nach rechts. Ein Mitreisender nähme natürlich keinen Unterschied wahr. Aber für einen ruhenden Beobachter ist der Spiegel gemäß der Längenkontraktion in Bewegungsrichtung verkürzt.

Nun vergleichen wir, wie die beiden Beobachter die sechs Ereignisse wahrnehmen. Links ist der Anblick für den Mitreisenden dargestellt, rechts für den ruhenden Beobachter. Für den Mitreisenden werden die vier Blitze gleichzeitig am Rand reflektiert und erreichen gleichzeitig die Mitte.

Für den ruhenden Beobachter - rechts - treffen die Lichtblitze zwar auch gleichzeitig in der Mitte ein; dieses Ereignis sehen natürlich beide gleich. Aber der ruhende Beobachter nimmt die vier Reflexionen anders wahr. Für ihn erreichen die Blitze zu unterschiedlichen Zeiten den Rand. Der gegen die Bewegungsrichtung des Hohlspiegels laufende Lichtblitz erreicht zuerst den Rand, dann die beiden senkrecht laufenden Lichtblitze und zuletzt der Lichtblitz, der sich in Richtung des Spiegels bewegt.

Ereignisse - also *dass* etwas passiert - nehmen alle Beobachter identisch wahr. Aber die Gleichzeitigkeit von Ereignissen ist vom Standort des Beobachters abhängig. Ereignisse sind absolut - dagegen ist Gleichzeitigkeit relativ!

## Fazit

Licht, Zeit und Raum sind auf das engste miteinander verbunden. Ein überall gültiges "Jetzt" gibt es im Kosmos nicht. Was auch immer im Kosmos passiert - die Kunde davon breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Was immer wir sehen, ist schon vergangen. Gleichzeitigkeit ist nichts Absolutes, sie hängt vom Standort des Beobachters ab.

## Spezielle Relativitätstheorie

### 6. Raumzeit: Lichtgeschwindigkeit verbindet Ereignisse in Raum und Zeit

Raumzeit - ein Begriff, der überall herum schwirrt und den nur wenige verstehen. Dabei ist die Sache simpel: Um Raum zu überwinden, braucht man Zeit. Nichts gelangt "sofort" durch den Raum - denn die *Lichtgeschwindigkeit ist das universelle Tempolimit* für jede Art von Information. Durch die Bewegung im Raum verändert sich auch, wie man die Zeit wahrnimmt. Raum und Zeit sind nichts Absolutes mehr, sie sind nicht völlig unabhängig voneinander - und so hat der Mathematiker Hermann Minkowski den Begriff "Raumzeit" geprägt.

## Beispiel

Die Sonne und ihre Planeten. Seit viereinhalb Milliarden Jahren laufen die Planeten um die Sonne, die Anziehungskraft der Sonne erlaubt kein Entrinnen. Selbst wenn die Sonne jetzt schlagartig verschwände, dann würden Merkur, Venus, Erde & Co. nicht sofort ihren Halt verlieren. Denn, Achtung: *Lichtgeschwindigkeit verbindet Ereignisse in Raum und Zeit!* Es dauert eine Weile, bis die Planeten merken, dass die Anziehungskraft nicht mehr da ist. Merkur ist nach gut drei Minuten frei, Venus nach sechs Minuten. Die Erde verlässt nach knapp achteinhalb Minuten ihre Bahn. Der ferne Pluto - er ist hier nicht zu sehen - merkt's zuletzt: Während alle anderen längst auf und davon sind, kurvt er noch fünfeinhalb Stunden um die Sonne, die gar nicht mehr da ist...

## Blick in die Vergangenheit

Der Blick an den Himmel ist immer ein Blick in die Vergangenheit. Man sieht die Sonne so, wie sie vor acht Minuten war. Wenn nahe dem Zentrum unserer Milchstraße jemand mit einem Superteleskop zur Erde blicken könnte, dann sähe er jetzt nicht etwa uns, sondern die Erde so, wie sie vor 27.000 Jahren war. Da waren die Menschen noch Jäger und Sammler und erlegten Mammuts - noch keine Spur

von Pyramiden, Kolosseum oder chinesischer Mauer. Im Weltraum gilt: Je weiter die Entfernungen, desto unsichtbarer ist die "Gegenwart"...

## Fazit

Um Raum zu überwinden, braucht man Zeit - die Lichtgeschwindigkeit ist das absolute Tempolimit. Der Raum - und sei er noch so klein - lässt sich nicht "sofort" überwinden. Streng genommen ist jeder Blick - wohin man auch schaut - ein Blick in die Vergangenheit... Die Gegenwart ist ein unsichtbares Phänomen!

## Spezielle Relativitätstheorie

### 7. Massenzunahme: Je schneller man sich bewegt, desto größer wird die Masse

Wen andere für zu schwer halten, der ist vielleicht einfach nur zu schnell. *Denn je schneller man sich bewegt, desto größer erscheint anderen unsere Masse.* Egal wie klein die Masse anfangs in Ruhe ist - ganz nahe der Lichtgeschwindigkeit ist die Masse fast unendlich groß. Daher können materielle Körper sich der Lichtgeschwindigkeit nur annähern, sie aber niemals exakt erreichen.

## Vorbemerkung

Ein leerer Transporter fährt gegen eine Wand - der Wagen ist beschädigt, in der Wand ist ein kleines Loch. Jetzt fährt ein beladener, fünfmal schwererer Transporter mit der gleichen Geschwindigkeit gegen die Wand: Der Transporter ist zertrümmert, in der Wand klafft ein riesiges Loch. Kann auch der leere Transporter einen solch großen Schaden anrichten? Ja - wenn er nur schnell genug ist. Fährt der leere Transporter entsprechend schneller als der beladene Transporter gegen die Wand, so verursacht er einen gleich großen Schaden. Der Schaden hängt also von der *Masse und von der Geschwindigkeit* ab.

Bis hierhin bewegen wir uns im Rahmen der klassischen Physik. Einstein fand aber heraus, dass bei zunehmender Geschwindigkeit nicht nur die klassische Bewegungsenergie zunimmt, sondern zudem auch die Masse steigt. Dies verdeutlicht das folgende Beispiel.

## Herleitung

Eine Kollision etwas größeren Ausmaßes: Ein Meteorit schlägt auf einem Planeten auf. Ein ruhender Beobachter sieht sich das von einer Raumstation neben dem Planeten an - der Meteorit schlägt ein und hinterlässt einen gigantischen Krater.

Ein zweiter Beobachter reist mit 87 Prozent der Lichtgeschwindigkeit an diesem Planeten vorbei - er kreuzt die Bahn des Meteoriten im rechten Winkel und beobachtet das Geschehen. Was sieht er? Wegen seiner schnellen Bewegung kommt es zur Zeitdehnung - dadurch laufen für ihn die Ereignisse draußen viel langsamer ab. Für den bewegten Beobachter in der Rakete nähert sich der Meteorit nur halb so schnell dem Planeten wie für den ruhenden Beobachter auf der Raumstation. Doch der Krater, der beim Einschlag entsteht, ist für beide Beobachter gleich groß. Wie kann das sein?

Der Einschlag ist ein Ereignis - und Ereignisse sind absolut, sie hängen nicht von der Bewegung des Beobachters ab. Wenn aber bei langsamerem Tempo der Schaden gleich groß ist, dann muss die Masse des Meteoriten doppelt so groß gewesen sein - so wie bei den Transportern, die schnell und leer den gleichen Schaden verursachen wie langsam und beladen. Bei schneller Bewegung dehnt sich also nicht nur die Zeit - auch die Massen nehmen zu. Dieser Effekt hängt wieder vom Standpunkt ab: Für den ruhenden Beobachter auf der Raumstation läuft der Meteorit "ganz normal", dagegen scheinen die Uhren in der schnell vorbeiziehenden Rakete langsamer zu gehen - und die schnelle Rakete scheint mehr Masse zu haben.

## Anwendung

Diese "relativistische Massenzunahme" spielt vielleicht *genau jetzt* bei Ihnen auf dem Schreibtisch eine Rolle: Die Elektronen werden in den Bildröhren von Fernseh- und Computermonitoren so schnell beschleunigt, dass sie einige Prozent an Masse zunehmen. Wenn man diesen Effekt nicht berücksichtigt, wird das Bild auf dem Schirm nicht korrekt aufgebaut. Einstein macht das Bild scharf!

## Fazit

Bei schneller Bewegung nimmt die Masse für einen außen stehenden Beobachter zu. Wegen dieses Effekts ist es für materielle Körper unmöglich, sich so schnell wie das Licht zu bewegen: Denn je näher man an die Lichtgeschwindigkeit heran kommt, desto dramatischer nimmt die Masse zu. Für den "letzten Kick" bis zur Lichtgeschwindigkeit wäre dann eine unendlich hohe Kraft nötig.

## Spezielle Relativitätstheorie

### 8. $E = mc^2$ : Materie und Strahlung lassen sich ineinander umwandeln

Ein Bierkasten ist im Sommer schwerer als im Winter - heißes Wasser auf dem Herd wiegt mehr als das kalte Wasser frisch aus dem Hahn. Die Unterschiede sind extrem klein - aber sie lassen sich berechnen. Und zwar mit der bekanntesten Formel der Welt, die sogar die größten Mathematikmuffel kennen: *Energie gleich Masse mal Lichtgeschwindigkeit ins Quadrat*. Wenn man die Energie erhöht, dann nimmt nach Einstein auch die Masse zu. Umgekehrt steckt in Masse extrem viel Energie. Schon mit ein paar Tonnen Materie ließen sich die Energieprobleme der Welt lösen - wenn man die Energie nur nutzbar herausbekäme...

## Beispiele

Ein Topf mit kaltem Wasser steht auf dem Herd. Wird das Wasser erhitzt, nimmt seine Energie zu. Nach  $E = mc^2$  nimmt damit aber auch die Masse zu. Kochendes Wasser hat mehr Energie, also auch mehr Masse als kaltes Wasser! Doch der Effekt ist minimal: Bringt man drei Liter kaltes Wasser zum Kochen, so nimmt die Masse des Wassers um zehn Milliardstel Gramm zu.

Energie und Masse sind gewissermaßen zwei Seiten einer Medaille - man kann Strahlung und Materie ineinander umwandeln. Das ist ein für uns lebenswichtiger Effekt. Die Sonne ist eine gigantische Umwandlungsmaschine. In jeder Sekunde verschmilzt die Sonne in ihrem Innern etwa 600 Millionen Tonnen Wasserstoffkerne zu etwa 595 Millionen Tonnen Heliumkernen. Wo bleibt die Differenz von fünf Millionen Tonnen? Diese Materie wird in Strahlung umgewandelt, in den Weltraum abgestrahlt und landet zum Teil bei uns auf der Erde.

## Atombombe

Der Formel  $E = mc^2$  wird viel Unrecht angetan. Für viele stellt diese Formel *die* Relativitätstheorie dar - dabei ist sie nur ein Aspekt dieser Theorie, und sicher nicht der wichtigste. Zudem meinen manche, diese Formel sei die Erfindung der Atombombe gewesen. Das ist Unsinn - Einstein hat mit dem Bau der Atombombe nichts zu tun. Er hat nie an diesem Projekt mitgearbeitet. Einstein hatte - übrigens fast 40 Jahre vor der ersten Atombombe - nur erkannt, was an Energie in der Materie steckt.

## Energievergleich

Ließe sich die in Materie steckende Energie technisch nutzen,  $E = mc^2$  würde uns aller Energiesorgen entledigen. Ein Kilogramm Steinkohle liefert bei der Verbrennung knapp 10 Kilowattstunden. Ein Kilogramm Uran liefert bei der Kernspaltung in Atomkraftwerken etwa 20 Millionen Kilowattstunden.

Dabei stecken in einem Kilogramm Steinkohle, Uran oder einem Kilo eines beliebigen anderen Stoffes nach  $E = mc^2$  potenziell sage und schreibe 25 Milliarden Kilowattstunden.

Der Stromverbrauch in Deutschland beträgt pro Jahr knapp 600.000 Milliarden Kilowattstunden. Diese Energie steckt in 24 Tonnen Materie. Könnte man nach  $E = mc^2$  die Energie nutzen, die in 24 Tonnen Materie stecken, wäre Strom im Überfluss vorhanden.

## Fazit

Materie und Strahlung lassen sich ineinander umwandeln - das beschreibt  $E = mc^2$ . Aus Strahlung entstehen Elementarteilchen - aus Teilchen kann wieder Strahlung werden. So kam nach dem Urknall die Materie in den Kosmos - und so wird aus Materie lebenswichtige Sonnenstrahlung.  $E = mc^2$ , eine Formel für den Kosmos und das Leben! Und sie zeigt, dass in Materie unglaublich viel Energie steckt - wenn man die doch nur nutzen könnte....

## Allgemeine Relativitätstheorie

### Schwerkraft ist überall

Zeit, Bewegung, Strecken und Massen - all das ist relativ, jedenfalls bei gleichmäßiger Bewegung. Das sind die Kernpunkte der speziellen Relativitätstheorie. Doch streng genommen gibt es eine perfekt gleichmäßige und geradlinige Bewegung nicht: Alles im Kosmos wird immer irgendwie angezogen und dabei beschleunigt oder abgebremst - denn die Schwerkraft zerrt an allem. *Die Schwerkraft ist überall und sie reicht unendlich weit.* Sie lässt eine Tasse zu Boden fallen, schiebt den Mond um die Erde und lässt Galaxien umeinander wirbeln. Im gesamten Weltall, selbst im entferntesten Winkel, gibt es Schwerkraft. Daher muss die Spezielle Relativitätstheorie verallgemeinert werden, so dass die Schwerkraft ebenfalls berücksichtigt wird. Die Theorie der Schwerkraft

Der große britische Physiker Isaac Newton hat 1687 in seinem legendären Hauptwerk "Mathematische Prinzipien der Naturlehre" die im Weltall dominierende Kraft beschrieben: Die Gravitation, die Schwerkraft.

Einstein war klar, dass er seine 1905 veröffentlichte Relativitätstheorie so erweitern musste, dass die neue Theorie auch die Schwerkraft umfasste. So wurde die Erweiterung der Speziellen Relativitätstheorie zur Allgemeinen Relativitätstheorie schließlich zur Krönung von Einsteins Schaffen. In ihr wird die Schwerkraft durch die Raumkrümmung erklärt. Die Materie krümmt den Raum und der gekrümmte Raum schreibt der Materie vor, wie sie sich bewegen soll.

Um auf die richtigen Formeln zu kommen, quälte sich Einstein fast ein Jahrzehnt. Dass die Allgemeine Relativitätstheorie Einstein weltberühmt machte, liegt an einem wunderbaren Vorzug gegenüber der Speziellen: Ihre Phänomene sind im Kosmos bei großen Massen und weiten Entfernungen so offensichtlich, dass manche vorhergesagte Effekte bereits mit damaliger Technik zu messen waren - Einsteins Glück!

### *Allgemeine Relativitätstheorie*

#### **9. Äquivalenzprinzip: Beschleunigte Bewegung und Schwerkraft führen zu denselben physikalischen Effekten**

Fährt ein Fahrstuhl nach unten, fühlt man sich beim Anfahren federleicht. Für kurze Zeit ist die Kabine fast schwerelos - so als wäre sie im All. Umgekehrt könnten sich die Astronauten in der Internationalen Raumstation künstlich irdische Bedingungen schaffen, wenn sie die Triebwerke ständig brennen ließen - das heißt, ihre Station beschleunigen würden. Dann würden sie sozusagen in die Sitze gedrückt - wie beim anfahrenden Auto. *Ob man sich immer schneller bewegt oder ob ein Schwerkraftfeld auf einen wirkt, lässt sich physikalisch nicht unterscheiden.* Dieses "Äquivalenzprinzip" ist die entscheidende Grundlage für Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie.

#### **Herleitung: Fahrstuhl**

Sie steigen in einem stehenden Fahrstuhl auf die Waage. Ihr Gewicht beträgt 60 Kilogramm. Jetzt fährt der Fahrstuhl nach unten. Für einen Moment zeigt die Waage nur noch 50 Kilogramm. Die Freude ist nur von kurzer Dauer, denn während der gleichförmigen Bewegung des Fahrstuhls nach unten sind es wieder die gewohnten 60 Kilogramm. Der Schock kommt beim Abbremsen im Erdgeschoss: Für kurze Zeit zeigt die Waage jetzt sogar 70 Kilogramm. Wenn der Fahrstuhl steht, sind es aber wieder die gewohnten 60.

Fazit: Beim Anfahren nach unten wird das Gewicht kleiner, bei gleichmäßiger Fahrt ist es normal, beim Abbremsen unten wird das Gewicht größer. Beim Stillstand ist es wieder normal. Umgekehrt sieht es aus, wenn Sie nach oben fahren. Dann ist das Gewicht beim Anfahren höher und beim Abbremsen geringer.

Doch was passiert, wenn man das Seil kappt? Dann befindet sich der Fahrstuhl im freien Fall. Die Waage zeigt Null an - die Waage fällt sozusagen unter einem weg.

In einem schwerelosen Raumschiff ist eine Waage ziemlich sinnlos - sie würde ohnehin immer Null anzeigen. Wird aber das Raumschiff beschleunigt, dann wird der Astronaut gewissermaßen auf die Waage gedrückt, so wie beim Abbremsen des Fahrstuhls im Erdgeschoss. In einem beschleunigten Raumschiff gibt es also eine Art künstlicher Schwerkraft.

## Herleitung: Raumschiff

Den Zusammenhang von Beschleunigung und Schwerkraft zeigt auch folgendes Beispiel: Im gleichmäßig bewegten Raumschiff schwebt ein Ball. Jetzt zündet die Rakete die Triebwerke - sie wird beschleunigt. Dadurch holt der hintere Teil der Rakete den Ball langsam ein. Der Ball berührt schließlich den Boden der Rakete und prallt noch ein paar Mal auf, bevor er am Boden bleibt.

Steht die Rakete auf der Erde auf der Startrampe, so sieht das Fallen des Balles genauso aus: Der Ball fällt zu Boden, prallt noch ein paar Mal auf und bleibt dann am Boden liegen.

## Fazit

Beschleunigte Bewegung und Schwerkraft lassen sich nicht unterscheiden - die physikalischen Phänomene laufen identisch ab. Diese Wesensverwandtheit von beschleunigter Bewegung und Schwerfeld ist das so genannte *Äquivalenzprinzip*. Es ist die entscheidende Basis für die *Allgemeine* Relativitätstheorie - und diese Theorie hat es wahrlich in sich, denn jetzt kommen die ganz skurrilen Effekte...

## Allgemeine Relativitätstheorie

### 10. Zeitdehnung: Je stärker Anziehungskraft oder Beschleunigung wirken, desto langsamer vergeht die Zeit

Auf Uhren ist im Universum kein Verlass. Mal gehen sie schneller, mal langsamer - je nachdem, wie schnell sie in Bewegung sind. Aber auch still stehende Uhren haben ihre Tücken. Denn nicht nur Bewegung lässt Uhren anders laufen, auch die Schwerkraft, die Gravitation, hat einen messbaren Effekt. Eine Uhr im Hochgebirge geht schneller als eine am Meeresstrand. Je näher man an der Erde ist, das heißt *je stärker die Anziehungskraft wirkt, desto langsamer vergeht die Zeit*. Das hat kuriose Auswirkungen: Bayern altern schneller als Ostfriesen!

## Herleitung

In einer Rakete gibt es zwei Uhren - eine an der Spitze, eine am Boden. In periodischen Abständen schießt unten ein Ball mit immer gleicher Geschwindigkeit heraus. Der erste Ball schaltet die untere Uhr an, der zweite schaltet sie wieder aus, der dritte Ball schaltet die Uhr wieder an - und so weiter. Ist die Rakete in Ruhe oder bewegt sie sich mit konstanter Geschwindigkeit, sind die Abstände zwischen den Bällen für beide Uhren gleich lang.

Die Triebwerke zünden - die Rakete beschleunigt. Während der Ball von der Uhr am Boden zu der an der Spitze läuft, bewegt sich die Rakete immer schneller. Die Spitze flieht gewissermaßen vor dem Ball - der Ball muss stets eine längere Strecke zurücklegen, bis er die obere Uhr erreicht. Er läuft aber immer gleich schnell: Also braucht der Ball in einer beschleunigten Rakete länger, um die Uhr an der Spitze zu erreichen. Dadurch geraten die Uhren aus dem Takt. Die obere Uhr geht schneller: Während unten eine Sekunde zwischen den beiden Bällen verstreicht, vergehen oben zwei Sekunden.

In einer beschleunigten Rakete geht die obere Uhr, oder besser: die vordere Uhr, schneller als die untere bzw. hintere Uhr. Wie schon bei den vorherigen Beispielen. Das gilt nicht nur für die Uhren, mit denen hier experimentiert wird - das gilt für die Zeit allgemein!

## Nachweis

Da nach dem Äquivalenzprinzip im vorangegangenen Abschnitt beschleunigte Bewegung und Schwerfeld physikalisch nicht zu unterscheiden sind, laufen Uhren langsamer, je höher die Anziehungskraft ist. Das heißt, die Zeit vergeht langsamer, je näher man dem Erdmittelpunkt ist. Entsprechend gehen die Uhren im flachen ostfriesischen Emden langsamer als in einem Allgäuer Bergdorf.

Dass die Zeit näher am Erdmittelpunkt langsamer vergeht, ist keineswegs nur kryptische Theorie. Man hat diesen Effekt gemessen, als von zwei exakt gleich gestellten Atomuhren eine für einige Wochen auf die Zugspitze gebracht wurde, während die andere Uhr im Flachland blieb. Beim Vergleich nach der Rückkehr stellte sich

heraus, dass die Zugspitz-Uhr der anderen Uhr voraus war, also vor ging. Allerdings sind diese Effekte so gering, dass sie mit normalen Uhren nicht nachzuweisen sind.

Übrigens herrscht hier - anders als bei der Speziellen Relativitätstheorie - Einigkeit über die Effekte. Beide Beobachter sind sich einig, dass die obere Uhr schneller geht als die untere. Konnten sich in der Speziellen Relativitätstheorie die bewegten und die ruhenden Beobachter ständig in die Haare kriegen, für wen die Zeit nun langsamer verlaufe, die Masse zunähme oder sich die Strecken verkürzten, so vermeidet die Allgemeine Relativitätstheorie den Streit - ihre Aussagen sind für alle Beteiligten klar und eindeutig.

## Anwendung

Das GPS-Navigationssystem im Auto würde ohne Berücksichtigung der Zeitdehnung nicht funktionieren. Die GPS-Satelliten fliegen etwa 20.000 Kilometer hoch - bei der dort geringeren Schwerkraft laufen die äußerst exakten Satelliten-Uhren schneller als auf dem Boden, pro Tag um etwa 45 Mikrosekunden. Zwar kompensiert bei den sich schnell bewegenden Satelliten die Zeitdehnung der Speziellen Relativitätstheorie diesen Effekt ein wenig, aber es bleiben etwa 40 Mikrosekunden Unterschied pro Tag zwischen den Uhren auf den Satelliten und denen am Boden. Da die Positionsbestimmung beim GPS durch eine sehr genaue Zeitmessung erfolgt, muss dieser Effekt berücksichtigt werden. Hätten die Konstrukteure Einstein nicht verstanden, läge das Navigationssystem schon nach einem Tag kilometerweit daneben!

## Fazit

Anziehungskraft und Beschleunigung beeinflussen den Lauf der Uhren. Je stärker die Anziehungskraft ist, desto langsamer vergeht die Zeit. Diese Effekte werden auch bei der Satellitennavigation berücksichtigt.

## Allgemeine Relativitätstheorie

### 11. Lichtablenkung: Licht wird von der Schwerkraft abgelenkt

Laufen Lichtstrahlen nahe an massereichen Körpern vorbei, so werden sie abgelenkt. Der Lichtweg wird sozusagen gekrümmt. Für Einsteins Theorie war dies sehr wichtig - denn die Lichtablenkung nahe der Sonne war die erste Vorhersage der Allgemeine Relativitätstheorie, die experimentell bestätigt wurde.

## Nachweis

Am 29. Mai 1919 fand eine totale Sonnenfinsternis statt, die im Südatlantik zu sehen war. Der britische Physiker Sir Arthur Eddington beobachtete sie auf der Insel Principe. Wenn das Licht ferner Sterne knapp an der Sonne vorbei läuft, lenkt die Schwerkraft der Sonne das Licht etwas ab. Knapp neben der Sonnenscheibe scheinen die Sterne also eine etwas andere Position am Himmel zu haben, als wenn die Sonne in einer ganz anderen Himmelsregion steht - so war die Vorhersage Albert Einsteins.

Nur während einer totalen Sonnenfinsternis kann man Sterne knapp neben der Sonne sehen - und so warteten die Experten gespannt auf die Ergebnisse dieser Messungen. Die Vorhersage Einsteins wurde triumphal bestätigt. Es war die Beobachtung der Lichtablenkung im Schwerefeld, die der Relativitätstheorie zum Durchbruch in der Öffentlichkeit verhalf - und Einstein schlagartig berühmt machte.

## Herleitung

Wieder einmal hilft die Rakete, das Prinzip zu erklären. Dieses Mal läuft ein Lichtstrahl von der linken Wand zur rechten. Steht die Rakete auf der Rampe oder bewegt sie sich gleichmäßig durch das All, so läuft der Lichtstrahl in gerader Linie von einer Wand zur anderen.

Nun zünden die Triebwerke, die Rakete wird beschleunigt: Während das Licht unterwegs ist, bewegt sich die Rakete immer schneller nach vorne. Das Licht bleibt gegenüber der Rakete etwas zurück und trifft entsprechend die rechte Wand etwas weiter unterhalb. Das Licht legt eine gekrümmte Strecke zurück. Nach dem

Äquivalenzprinzip sind physikalische Effekte bei beschleunigter Bewegung und Schwerkrafteinfluss aber gleich - also wird Licht auch durch Schwerkraft abgelenkt.

## Fazit

Auch Licht wird von der Schwerkraft abgelenkt. Läuft ein Licht- oder Funksignal dicht an der Sonne vorbei, so wird der Laufweg des Strahls gekrümmt. Dieser Effekt spielt im Kosmos eine große Rolle. Einstein verdankt der Vorhersage dieses Effekts seinen Durchbruch zum ersten Popstar der Wissenschaft. Die Lichtablenkung - Einsteins Segen oder Fluch?

## Allgemeine Relativitätstheorie: Schwerkraft ist nichts anderes als Raumkrümmung

Himmliche Körper krümmen mit ihrer Anziehungskraft nicht nur den Laufweg von Lichtstrahlen - sie krümmen den ganzen Raum, ähnlich wie eine schwere Kugel eine auf weichem Grund liegende Decke eindrückt. Der Mond läuft um die Erde, weil die Erde ihn anzieht. Aber man könnte auch sagen, dass der Mond im "Raum-Trichter" der Erde gefangen ist... Nach Einstein ist die Anziehungskraft, die *Gravitation*, nichts anderes als *Raumkrümmung*. Weil im Universum überall Schwerkraft wirkt, mal mehr, mal weniger, ist der gesamte Weltraum voller Riffel, Wellen und Trichter.

## Herleitung

Große Massen lenken Lichtstrahlen ab, wie im vorangegangenen Kapitel gesehen. Materie krümmt aber nicht nur den Lichtweg, sondern den ganzen Raum. Das ist in etwa so, wie eine schwere Kugel ein Tuch auf weichem Grund einrückt. Je größer die Masse ist, desto tiefer ist die Mulde - und desto stärker ist die Anziehungskraft. Der so gekrümmte Raum sagt dem Licht, wo es auf kürzestem Weg entlang laufen muss - so wie eine Kugel in einer Mulde abgelenkt wird. Diese populäre Darstellung zeigt immer nur eine Ebene des Raumes - tatsächlich ist der Raum in der Umgebung der Masse in allen Richtungen gekrümmt. Nur ist das kaum darstellbar.

Der Mond läuft um die Erde - die Anziehungskraft der Erde zwingt den Mond auf seine Bahn. Man könnte aber auch sagen, dass die Raumkrümmung den Mond auf seiner Bahn hält. Der Mond läuft immer geradeaus - aber im Gravitationstrichter der Erde ist er damit gefangen wie ein Hamster im Laufrad. Wenn ihn niemand aus dem Trichter hebt, bleibt er für immer auf seiner Bahn um die Erde.

## Fazit

Nach Einstein ist also Gravitation nichts anderes als Raumkrümmung. Der Kosmos mit seinen vielen massereichen Körpern ist voll von Schwerkraft. Schwerkraft krümmt den Raum - und alle krümmen mit, ob es die kleine Erde ist oder eine riesige Galaxie. Das Universum ist mit seinen vielen Dellen also mehr eine Art Buckelpiste ...

## Allgemeine Relativitätstheorie

### 13. Ein Schwarzes Loch lässt nicht einmal Licht entkommen:

Würde man die Erde auf die Größe einer Kirsche zusammenquetschen, so wäre die Anziehungskraft an der Oberfläche so hoch, dass nichts, nicht einmal Licht, entkommen könnte. Die Erde wäre ein Schwarzes Loch - eine kosmische Einbahnstraße, in die alle Wege hinein führen, aber praktisch keiner heraus. Im Weltall gibt es viele Schwarze Löcher. Auch im Zentrum unserer Milchstraße sitzt eines von geradezu monströsen Ausmaßen:

Es hat zwei Millionen mal so viel Masse wie unsere Sonne. Aus gebührendem Abstand ist das ganz harmlos - nur sollte man einem Schwarzen Loch nie zu nahe kommen ...

## Beispiel

Schwarze Löcher sind keine bloße Theorie, keine Phantastereien von Science-Fiction-Autoren. Schwarze Löcher sind Endstadien von massereichen Sternen. Sterne, die mindestens achtmal so viel Masse wie die Sonne haben, sterben in einer gigantischen Supernova-Explosion - und hinterlassen ein Schwarzes Loch. Ein Schwarzes Loch lenkt mit seiner starken Anziehungskraft auch Licht ab und verformt die Bilder der hinter dem Schwarzen Loch liegenden Objekte zu charakteristischen Bögen.

Schwarze Löcher gibt es an vielen Stellen im Universum - und in vielen Größen. Die meisten Schwarzen Löcher haben einige Mal so viel Masse wie die Sonne. Aber im Zentrum fast jeder großen Galaxie sitzt ein Schwarzes Loch, das viel mehr Masse hat - auch im Zentrum unserer Milchstraße. Das Schwarze Loch dort hat gut zwei Millionen mal soviel Masse wie die Sonne und einen Durchmesser von etwa 12 Millionen Kilometern. Derzeit hungert es - denn in seiner Nähe sind nur einige Sterne und wenig Gas, das es verschlingen könnte.

## Herleitung

Schwarze Löcher haben eine extreme Anziehungskraft - wer ihnen zu nahe kommt, stürzt hinein. Das gilt auch für Licht...Lichtstrahlen laufen an einem Schwarzen Loch vorbei. Anfangs wird das Licht nur abgelenkt: Je näher das Licht das Schwarze Loch passiert, desto stärker wird es abgelenkt. Schließlich stürzt es ins Schwarze Loch - auf Nimmerwiedersehen. Die Grenze, ab der es kein Zurück mehr gibt, sondern ab der es nur noch hinein ins Schwarze Loch geht, heißt Schwarzschild-Radius, nach dem deutschen Astrophysiker und Zeitgenossen Einsteins Karl Schwarzschild.

Die Raumkrümmung eines Schwarzen Lochs ist extrem. Der Trichter wird zu einem schier endlosen Schlund. Was hinein fällt, kommt nicht mehr hinaus.

## Fazit & Ausblick

Vermutlich waren die extrem massereichen Schwarzen Löcher recht schnell nach dem Urknall vorhanden - und so etwas wie die Keimzellen, um die sich die großen Galaxien gebildet haben. Doch so faszinierend Schwarze Löcher auch sind - sie sind vor allem eines: rätselhaft. Was passiert im Innern eines Schwarzen Lochs? Dort, wo es keine Zeit mehr gibt?

Im Zentrum eines Schwarzen Lochs ist die aktuelle Physik zu Ende - weder mit der Relativitätstheorie noch mit der Quantentheorie, die die Vorgänge im ganz Kleinen beschreibt, kommen die Physiker weiter.

Beide Theorien in einer umfassenden Idee zu vereinen, ist das große Ziel, an dem sich die Forscher seit Jahrzehnten die Zähne ausbeißen. Es bleibt also genug zu tun für künftige Genies: Um die Theorien vom ganz Großen und vom ganz Kleinen zusammenzuführen, bräuchten die Physiker mal wieder einen Einstein...

## "14. Einstein-Diplom"

1. Frage:

Ein Zug fährt mit Tempo 200 durch das Land. Auf dem Gegengleis kommt ein Zug entgegen, ebenfalls mit Tempo 200. Wie hoch ist die Geschwindigkeit mit der ein Reisender in dem einen Zug den anderen Zug auf sich zukommen sieht?

- A: 200 km/h, es fahren schließlich beide Züge 200 km/h
- B: 0 km/h, die gegensätzlichen Geschwindigkeiten heben sich auf
- C: Nur 100 km/h, weil beide Züge Verspätung haben
- D: 400 km/h, weil sich die Geschwindigkeiten addieren

2. Frage:

Eine Lok rast durch einen Bahnhof - auf dem Bahnsteig steht ein Passant. Als Lokführer und Passant genau auf einer Höhe sind, geben beide mit identischen Pistolen einen Schuss auf ein Ziel einige hundert Meter vor dem Zug ab. Wann erreichen die Kugeln und die Lichtblitze vom Mündungsfeuer die Zielscheibe?

- A: Alle vier - die beiden Lichtblitze und die beiden Kugeln - kommen gleichzeitig an.
- B: Zuerst kommen die beiden Lichtblitze gemeinsam an, etwas später kommen gemeinsam die beiden Kugeln.
- C: Zuerst kommen die beiden Lichtblitze gemeinsam an, dann kommt die Kugel vom Lokführer, dann die vom Passanten.
- D: Zuerst kommen die beiden Lichtblitze gemeinsam an, dann kommt die Kugel

vom Passanten, dann die vom Lokführer.

3. Frage:

Eine Schulstunde zieht sich wieder einmal endlos hin. Die Zeit will und will nicht vergehen - für die Schüler eine Qual. Woran kann es liegen?

- A: Das Klassenzimmer bewegt sich mit fast Lichtgeschwindigkeit.
- B: Der Unterricht ist entsetzlich langweilig.
- C: Das Klassenzimmer steht still, aber die Umgebung zieht fast lichtschnell vorbei.
- D: Der Lehrer hat einen Zwilling, der fast lichtschnell unterwegs ist.

4. Frage:

Passt ein 150 Meter langer "Einstein-Zug" in einen 100 Meter langen Tunnel?

- A: Nein, der Zug ist zu lang, da hilft auch kein Einstein
- B: Nein, der Tunnel ist zu kurz – Rechnen zwecklos
- C: Ja, wenn der Zug mehr als 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit fährt
- D: Ja, denn wegen "Störungen im Betriebsablauf" hat die Bahn nur halb so viele Waggons wie geplant angehängt.

5. Frage:

Ein Zug ist 150 Meter lang und fährt mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Wenn er für den im Tunnel stehenden Beobachter genau im 100 Meter langen Tunnel verschwunden ist, so werden dort Falltüren ausgelöst, die für einen kurzen Moment den Tunnelein- und ausgang verschließen und kurz darauf sich wieder öffnen. Wie viele Türen fährt der Zug von den Reisenden im Zug aus betrachtet kaputt?

- A: Die Tür am Tunnelausgang
- B: Die Tür am Tunneleingang
- C: Beide Türen gehen kaputt
- D: Keine - denn die Türen schließen nicht gleichzeitig.

6. Frage :

Karl guckt die heute-Nachrichten um 19 Uhr auf 3sat. Seine Frau beschwert sich: "Das ist doch alles veraltet! Das läuft im ZDF fast eine Viertelsekunde früher". Er schaltet noch während der heute-Sendung auf das ZDF um und danach wieder auf 3sat. Tatsächlich - die letzte Silbe des Sprechers hört er bei 3sat noch einmal. Woran liegt das?

- A: 3sat wird über Satellit ausgestrahlt. Das Funksignal legt fast 80.000 km zurück - dafür braucht es Zeit.
- B: Im Kabelnetz dauert die Signalübertragung länger.
- C: Weil 3sat in drei Länder ausgestrahlt werden muss, kommt das Signal etwas später an.
- D: Karl hat einfach eine lange Leitung.

7. Frage :

Hans will bei der Bank eine kleine Goldmünze verkaufen und meint, die Münze habe mindestens 2 Kilogramm Masse. Die beiden Sachbearbeiter lachen. Daraufhin lädt Hans einen von ihnen zu einer viertelstündigen Probefahrt in seinem fast lichtschnellen "Einstein-Auto" ein - die Münze nimmt er natürlich mit ...

- A: Unterwegs wiegt die Münze plötzlich einige Kilogramm und fällt dem mitreisenden Bankangestellten auf den Fuß.
- B: Der in der Bank gebliebene Sachbearbeiter staunt, wie viel Masse die Münze an Bord plötzlich hat und stimmt dem Kauf zu.
- C: Die Münze hat für alle Beteiligten immer gleich viel Masse.
- D: Die relativistische Massenzunahme gibt es bei Edelmetallen nicht.

8. Frage:

Physiker wollen oft Elementarteilchen erforschen, die sehr schnell zerfallen - die es also "im Alltag" gar nicht gibt. Wo kriegen die Physiker die Teilchen trotzdem her?

- A: In großen Beschleunigern entstehen bei der Kollision z.B. von Protonen und Elektronen die gewünschten Teilchen.
- B: Aus dem Archiv sehr alter Institute - da schlummert noch mancher Schatz.
- C: Aus dem Sonnenwind, einem Teilchenstrom der Sonne
- D: Aus dem Kühlwasser eines Atomkraftwerks

9. Frage:

Eine Person steht auf einer Waage. Die Waage zeigt 60 Kilogramm. Plötzlich schießt ein Katapult die Person samt Waage nach oben. Was zeigt die Waage im Flug an?

- A: 0 Kilogramm - freier Fall
- B: 60 Kilogramm - keine Änderung, das Gewicht bleibt immer gleich.
- C: 120 Kilogramm - bei Beschleunigung verdoppelt sich die Masse.
- D: Minus 60 Kilogramm - beim Steigflug hat man negatives Gewicht.

10. Frage:

Im Bus gibt es zwei Uhren, eine vorne beim Fahrer, eine hinten in der letzten Bank. Beide Uhren befinden sich in gleicher Höhe über dem Straßenniveau. Plötzlich bremst der Bus - welche Uhr geht dabei schneller?

- A: Die vordere Uhr, weil der Bus ja nach vorne fährt und immer die vordere Uhr schneller geht.
- B: Beide Uhren gehen gleich schnell, weil die Uhren gleich weit von der Erde entfernt sind.
- C: Die hinten, weil immer die Uhr schneller geht, die in Bezug auf die Beschleunigung vorne ist.
- D: Bremsen dehnt die Zeit - daher gehen beide Uhren langsamer.

11. Frage:

Wenn das Licht ferner Sterne knapp an der Sonne vorbei läuft, lenkt die Schwerkraft der Sonne das Licht etwas ab - Arthur Eddington hat das zum ersten Mal bei der berühmten Sonnenfinsternis 1919 gemessen. Wie stark wird das Licht abgelenkt?

- A: Das Licht des Sterns wird so stark abgelenkt, dass der Stern dann hinter der Sonnenscheibe steht.
- B: Der Stern scheint um 1,75 Bogensekunden von der Sonne weg verschoben zu sein.
- C: Der Effekt ist so klein, dass er gar nicht zu messen ist.
- D: Die Ablenkung entspricht in etwa dem doppelten Vollmond Durchmesser an unserem Himmel.

12. Frage:

Welches Phänomen könnte man in der Nähe eines Schwarzen Lochs erleben?

- A: Es blubbert laut und alles stinkt ganz fürchterlich nach Schwefel.
- B: Am Himmel erscheinen alle Sterne doppelt - einmal blau und einmal rot.
- C: Um einen herum ist es komplett schwarz - es ist gar nichts zu erkennen.
- D: Man leuchtet mit einer Taschenlampe nach vorne und beleuchtet trotzdem seinen Hinterkopf.