



Albert Einstein, Physiker

* 1879 Ulm

+ 1955 Princeton

Zeit

Auszug aus dem Buch *Galilei-Turm* “
Ein Panorama zur Entwicklungsgeschichte der Forschung
Zürcher Forum-Verlag
Hier zusammengestellt von: Silvia Spörk

Mit seiner Relativitätstheorie (1905) revolutionierte er die Ansichten über Raum und Zeit. Sie sind nichts Absolutes; unter bestimmten Umständen (Bewegung mit annähernder Lichtgeschwindigkeit) können Räume schrumpfen, die Zeit sich ausdehnen.

Der Raum ist relativ

Strecken, Längen, Distanzen, Abstände, Raketenlängen, Planetengrößen sind nichts Absolutes. Sie hängen davon ab, ob und wie wir uns relativ zu ihnen bewegen.

Eine Strecke erscheint uns dann am größten, wenn wir ihr gegenüber in Ruhe sind. Je schneller wir uns an ihr vorbeibewegen, um so verkürzter erscheint sie uns in Bewegungsrichtung. Nähern wir uns der Lichtgeschwindigkeit, wird diese Raumschrumpfung (Längenkontraktion)“für den Beobachter immer dramatischer. Im normalen Alltag sind wir hingegen so langsam, dass wir diesen Effekt nicht merken.

Wenn zwei sich aneinander vorbeibewegen, sieht jeder den anderen verkürzt .“Sobald sie aber beieinander in Ruhe sind, sehen sie sich wieder unverzerrt: Die Längenkontraktion kann man nicht behalten.

Die Zeit ist relativ

Zeitdauer, Zeitintervalle, Rhythmen, Lebensdauern, Reisezeiten sind nichts Absolutes. Sie hängen davon ab, ob und wie wir uns gegenüber dem Ort des Geschehens bewegen. Bewegt sich ein Beobachter gegenüber einem System, wo etwas passiert, so sieht er die Zeit im beobachteten System langsamer ablaufen als bei sich selbst.

Dasselbe passiert aber auch bei vertauschten Rollen (Zwillings-Paradoxon)“Solange zwei Systeme gegeneinander in Bewegung sind, sieht jeder im anderen die Zeit langsamer ablaufen als bei sich selbst. Und doch kann unter einer Bedingung diese Zeitdehnung in einem System behalten werden: Wenn ein System (der reisende Astronaut) mit Beschleunigung von einem anderen System aus (die Erde mit dem zurückbleibenden Zwillingsbruder) startet und später wieder bei ihm abbremst und landet, so ist in ihm tatsächlich weniger Zeit verstrichen. Wer bei Abfahrt und Rückkehr Beschleunigung spürt, ist derjenige, der die Zeitdehnung behält.

$E = mc^2$ - die Konsequenz

Die Lichtgeschwindigkeit ist überall gleich. Sie stellt in unserem Universum eine oberste, nicht überschreitbare Grenze dar. Wer immer einen Körper unter Kraftereinwirkung beschleunigen will, merkt, dass der Körper bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit immer träger wird, für eine weitere Geschwindigkeitszunahme also immer mehr Kraft nötig wäre. Die Masse des Körpers nimmt zu, was aber nicht bedeutet, dass der Körper größer wird (siehe Längenkontraktion). Die zugeführte Bewegungsenergie äußert sich als Massenzunahme. Aus der genauen Untersuchung dieses Zusammenhangs leitete Einstein 1905 die berühmte Gleichung ab: $E = mc^2$

Das bedeutet: Energie ist träge. Ein energiereicher Körper hat automatisch auch mehr Masse, er ist träger und schwerer. Selbst Licht als eine Energieform ist ein bisschen schwer ;“das von der Sonne pro Sekunde ausgestrahlte Licht macht 4,2 Millionen Tonnen aus. Masse ist eine Energieform. Masse (Materie) kann sich in andere Energieformen verwandeln. Bei Kernspaltung und Kernfusion nimmt die Masse ab, dafür entstehen andere Energieformen. Dank der dauernden Umwandlung von Masse in Strahlungsenergie, die im Innern unserer Sonne abläuft, können wir überhaupt leben. Nur wird dadurch die Sonne in jeder Sekunde um 4,2 Millionen Tonnen leichter.

Reise um die Erde mit vier Atomuhren im Gepäck

(Hafele/Keating, Oktober 1971)

Im Herbst 1971 flogen die beiden amerikanischen Physiker J. Hafele und R. Keating zweimal mit gewöhnlichen Verkehrsflugzeugen von Washington aus um die Erde –einmal ostwärts, einmal westwärts. Beide Male sind vier Cäsium-Atomuhren an Bord, mit einer Ganggenauigkeit von 2 Nanosekunden ($0,000000002 \text{ sec} = 2 \times 10^9 \text{ sec}$) pro Tag. Vier gleichartige Atomuhren bleiben jeweils zur Kontrolle in Washington zurück. Infolge der Erdrotation sind diese Uhren aber auch nicht in Ruhe, sondern bewegen sich mit rund 1.315 km/h Richtung Osten.

Was ist bei einem Flug in östlicher Richtung zu erwarten?

Beträgt die Fluggeschwindigkeit relativ zum Erdboden zB 860 km/h, so würde ein ruhender Beobachter am Nordpol eine Flugzeit von 36 Stunden 41 Minuten registrieren. Da die Atomuhren in Washington aber bewegt sind, läuft dort die Zeit etwas langsamer; sie zeigen am Schluss der Reise eine Reisezeit an, die 84 Nanosekunden kürzer wäre als die Zeitangabe am Nordpol. Die Uhren im Flugzeug bewegen sich aber noch schneller, nämlich 1.315 plus 860 km/h, also läuft im Flugzeug die Zeit noch langsamer, und zwar um 268 Nanosekunden langsamer als am Nordpol. Die fliegenden Atomuhren müssten also gegenüber den zurückgebliebenen Atomuhren in Washington um 268 minus 84 = 184 Nanosekunden hintennachgehen. Dieser Effekt wird tatsächlich nachgewiesen, mit einer Genauigkeit von einigen Prozenten. Hafele, Keating und ihre Atomuhren sind also auf ihrem Ostflug knapp 200 Nanosekunden weniger gealtert als Mensch und Uhren in Washington.

Was passiert nun auf dem Westflug?

Der Beobachter am Nordpol misst wieder 36 Stunden 41 Minuten für die Flugzeit. Die Atomuhren in Washington demgegenüber wieder 84 Nanosekunden hintennach. Da aber das Flugzeug einen Teil der Erdrotationsgeschwindigkeit aufhebt, fliegt es effektiv nur mit $1.315 \text{ minus } 860 = 475 \text{ km/h}$ ostwärts. Seine Uhren erleiden eine kleinere Zeitdehnung als die Washingtoner Uhren, nämlich nur 12 Nanosekunden. Die Uhren im Flugzeug gehen daher bei der Rückkehr nach Washington um $84 \text{ minus } 12 = 72 \text{ Nanosekunden}$ vor. Auch dieser Effekt wird tatsächlich mit einigen Prozenten Genauigkeit bestätigt.

Wer westwärts fliegt, altert ein bisschen schneller als die Leute am Boden. Und dieser Effekt ist mit heute käuflichen Cäsium-Atomuhren bereits messbar!

Und die Längenkontraktion?

Aus zwei Gründen sind bisher keine Messungen möglich:

- 2 Um die Länge eines Gegenstandes zu messen, muss er sichtbar sein. So große Körper aber kann man bis jetzt nicht annähernd auf die nötige große Geschwindigkeit bringen, bei der man den Effekt bemerken könnte.
- 2 Längenkontraktion existiert nur während des Flugs. Sie wird nicht behalten wie die Zeitdehnung und verschwindet beim Abstoppen wieder augenblicklich.

Aber es gibt einen indirekten Beweis

Weil die Zeitdehnung bewiesen ist, muss es die Längenkontraktion geben, sonst wäre die Natur widersprüchlich.

Ein Beispiel:

Die in der oberen Atmosphäre erzeugten Myonen (Myonen sind instabile, kurzlebige Teilchen, die in ein Elektron und zwei Neutrinos zerfallen; das geladene Zerfallselektron kann in einem Zähler nachgewiesen werden) leben in ihrem System 2,2 Mikrosekunden. In dieser Zeit kommen sie trotz ihrer gigantischen Geschwindigkeit von beinahe Lichtgeschwindigkeit (99,5 % Lichtgeschwindigkeit) nur 660 Meter weit. Tatsächlich schaffen sie es aber bis zur Erdoberfläche, also etwa 10 km, weil für sie die Atmosphäre nur wenige hundert Meter dick ist; sie sehen sie verkürzt.

**Möchten Sie die vorgestellten Effekte selber durchrechnen?
Hier die Formeln, die Sie dafür brauchen:**

Zeitdehnung (Zeitdilatation)

T_{eigen} : die Dauer eines Vorganges, gemessen mit einer Uhr, die am Ort des Geschehens ruht

T_{fremd} : die Dauer des gleichen Vorganges, aber gemessen mit einer Uhr, die sich mit der Geschwindigkeit V gegenüber dem Ort des Geschehens bewegt

C : Lichtgeschwindigkeit = 300.000 km/sec

Die Formel: $T_{\text{fremd}} = \frac{T_{\text{eigen}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Rechenbeispiel:

Ein Astronaut reist mit 99 % c , $\frac{v}{c} = 0,99$

Auf der Erde vergehen 30 Jahre = T_{fremd}
Wieviel altert der Astronaut inzwischen (T_{eigen})?

Lösung: $T_{\text{eigen}} = 30 \text{ Jahre} \times \sqrt{1 - 0,99^2} = 4,23 \text{ Jahre}$

Raumverkürzung (Längenkontraktion)

L_{eigen} : die Länge eines Objektes oder einer Strecke, gemessen mit einem Maßstab, der sich gegenüber dem Objekt oder der Strecke nicht bewegt

L_{fremd} : die Länge des gleichen Objektes (Strecke), aber gemessen mit einem Maßstab, der sich mit der Geschwindigkeit V am Objekt (Strecke) vorbeibewegt

C : Lichtgeschwindigkeit = 300.000 km/sec

Die Formel: $L_{\text{fremd}} = L_{\text{eigen}} \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Rechenbeispiel:

Eine Rakete fliegt mit 99 % c an der Erde vorbei,

$$\frac{v}{c} = 0,99$$

Länge der ruhenden Rakete: 100 m = L_{eigen}

Welche Länge hat die vorbeifliegende Rakete von der Erde aus gemessen (L_{fremd})?

Lösung: $L_{\text{fremd}} = 100 \text{ m} \times \sqrt{1 - 0,99^2} = 14,1 \text{ m}$