

# Die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein

## **Womit beschäftigt sich die Allgemeine Relativitätstheorie?**

Die allgemeine Relativitätstheorie beschäftigt sich mit der Frage, welchen Einfluss die Gravitation auf Raum, Zeit und Maßstäbe hat.

- Was passiert in der Nähe von großen Massen mit der **Zeit**
- Was passiert in der Nähe von großen Massen mit den **Maßstäben**?
- Wie ändert sich die **Raumkrümmung** in der Nähe von großen Massen
- Wie regiert das **Licht** auf große Massen?

## **Was war der Anstoß für diese Theorie?**

Durch die Spezielle Relativitätstheorie entstand auch die Frage, wie die Effekte bei großen Massen sein müssten. Einstein überlegte sich, ob er als Blinder in einer Raumkapsel wohl unterscheiden könne, ob die Raumkapsel beschleunigt werde durch den Raketenantrieb oder durch den beschleunigten Fall auf die Erde. Und fand keinen Unterschied darin. Daraus entwickelte er die Allgemeine Relativitätstheorie.

## **Hauptaussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie**

- **Rotverschiebung von Lichtstrahlen, die sich von Massen weg bewegen.**

Ein Lichtstrahl der sich von einem Ort in der Nähe einer großen Masse wegbewegen will, muss Arbeit verrichten, die den Lichtstrahl (der aus Photonen besteht) Energie kostet. Nachdem die Energie des Lichtstrahls in Form der Gleichung:  $E = hf$  verringert wird, muss sich die Frequenz verringern ( $h$  ist eine Konstante). Die neue Frequenz ergibt sich mit der Gleichung:

$$\text{Für Bewegung von der Erdoberfläche weg: } f' = f \cdot \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

$g$  = Erdgravitation (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H$  = Höhe über der Erdoberfläche, in die der Lichtstrahl kommt

$c$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (300 000 km/s)

$f, f'$  = Frequenzen vor und nach dem Aufsteigen des Lichtstrahls

$$\text{Allgemein: } f' = f \cdot \left(1 - \frac{GM}{c^2 R}\right)$$

$G$  = Gravitationskonstante ( $6,67 \cdot 10^{-11}$ )

$M$  = Masse des Körpers, von dem der Lichtstrahl hochsteigt

$R$  = Radius des Körpers, von dem aus der Lichtstrahl hochsteigt

- **Zeitdilatation (=Zeitverlangsamung) in der Nähe von großen Massen.**

Da sich die Frequenzen von „Lichtuhren“ in der Nähe von großen Massen verringern, sind auch die Uhrzeiten verlangsamt.

$$\text{Zeitdilatation für Uhren am Erdboden: } T_A = T_B \cdot \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

$T_A$  = Zeit am Erdboden

$T_B$  = Zeit in der Höhe  $H$  über dem Erdboden (z.B. Flugzeug)

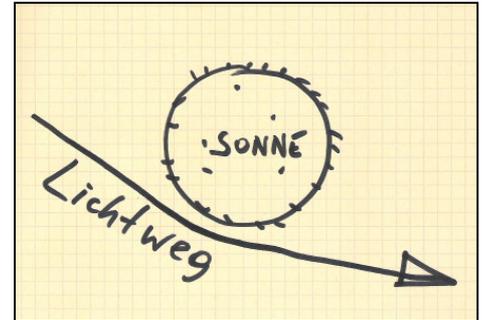
$$\text{Allgemeine Zeitdilatation: } T_A = T_B \cdot \left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

- **Raumkontraktion (=Raumkrümmung) in der Nähe von großen Massen.**

Die Maßstäbe werden in der Nähe von großen Massen verkleinert. Das kann man sich dadurch erklären, dass bei Messung einer Strecke mit einem Lichtstrahl – der Lichtstrahl ja länger braucht in der Nähe der Masse (Zeitdilatation) und es daher so aussieht, als ob der Weg länger gewesen wäre. Umgekehrt kann man sagen, dass die Maßstablänge verkleinert worden ist.

Nun lässt sich dieses Paradoxon – die Durchmesserstrecke eines Kreises durch die große Masse hindurch ist länger als es in der normalen Geometrie wäre – dadurch erklären, dass der Raum in der Nähe einer Masse stärker gekrümmt ist.

Das führt weiter zu der Überlegung, wie denn ein Lichtstrahl, der bei einer großen Masse vorbeifliegt, von dieser Masse in seiner Bahn abgelenkt wird. Es müsste der Lichtweg um die Masse herum gekrümmt sein, als wenn die Masse den Lichtstrahl anziehen würde.

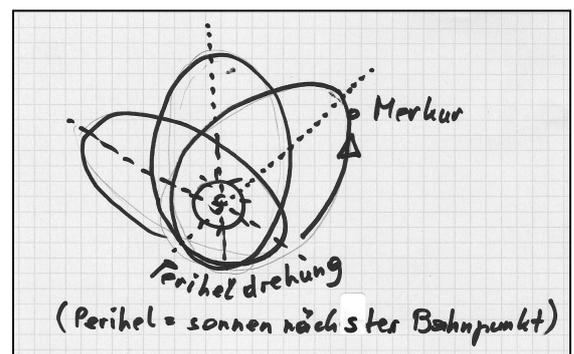


### ***Beweise der Allgemeinen Relativitätstheorie***

Im Jahre 1919 fand eine **Sonnenfinsternis** statt, die es ermöglichte, den Effekt der Lichtablenkung zu überprüfen. Einstein sagte voraus, dass ein Stern, der eigentlich hinter der Sonne steht, doch zu sehen sein wird, da sein Lichtweg um die Sonne gekrümmt ist. Tatsächlich konnte dieses Phänomen beobachtet werden und Einstein wurde dadurch berühmt und so gefeiert wie ein Popstar. Das war nach dem 1. Weltkrieg die erste positive Meldung, die die Massen begeisterte.

Im Jahre 1965 schlug der amerikanische Physiker Irwin I. **SHAPIRO** vor, den Abstand der Venus von der Erde mit einem **Radarsignal** zu messen – und zwar, wenn die Venus nahe der Sonne ist. Die Laufzeit müsste in Vergleich zur theoretischen Größe länger sein, da der Raum in der Nähe der Sonne gekrümmt ist. Das konnte auch bestätigt werden (35 km Verlängerung des Weges).

Auch die **Periheldrehung des Merkur** konnte mit der Allgemeinen Relativitätstheorie erklärt werden. Wenn der Merkur im Lauf seiner Ellipsenbahn in die Nähe der Sonne kommt, taucht er tiefer in den Raum ein und das ergibt einen Dreheffekt, so dass sich die Ellipsenbahn langsam dreht. Im Endeffekt macht der Merkur keine elliptische Bewegung um die Sonne, sondern eine rosettenförmige Schleifenbahn.



Die modernste Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie besteht in der Wirkungsweise auf Satelliten. **Die GPS-Positionssatelliten** senden Signale aus, die Positionsbestimmungen auf der Erde ermöglichen. Als man die ersten Satelliten aussandte, probierte man aus, ob man ohne Relativitätskorrektur auskommt und hat festgestellt, dass man dann Positionen um etliche Kilometer falsch bestimmt hatte. Daher musste die Relativitätskorrektur durchgeführt werden (Die Zeit vergeht bei einem Satelliten schneller als auf der Erde!)