

Die Allgemeine Relativitätstheorie

Bis ins 20. Jahrhundert hinein war man fest davon überzeugt, dass Raum und Zeit absolut und unveränderlich sind. Diese Vorstellung wurde durch Isaac Newton (1643 – 1727) zementiert, dessen Physik über mehr als zwei Jahrhunderte unantastbar war, und dessen Gesetze auch heute noch als Näherung Gültigkeit haben. Ende des 19. Jahrhunderts gab es dann allerdings ein Experiment, das die bis dahin klassische Physik in massive Probleme stürzte. Dieses von den Physikern Michelson und Morley durchgeführte Experiment zeigte nämlich ein völlig anderes Verhalten des Lichts, als man damals erwartete. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c erwies sich als eine absolut konstante Grenzgeschwindigkeit. Es gibt keinen materiellen Körper, der c je erreichen kann. Daraus folgte, dass Raum und Zeit von der Relativgeschwindigkeit der Bezugssysteme gegeneinander abhängig sind. Dies ist der Inhalt der *speziellen Relativitätstheorie* (SRT), die Albert Einstein (1879 – 1955) bereits im Jahr 1905 formulierte. „Speziell“ deshalb, weil die Theorie nur für sogenannte Inertialsysteme gilt, d. h. nur für kräftefreie, also ruhende oder gleichförmig bewegte Systeme. Die Erweiterung der Theorie auf beschleunigte, also Kräften unterworfenen Systeme, wurde von Einstein erst 10 Jahre später 1915 als *Allgemeine Relativitätstheorie* (ART) ausformuliert. Sie ist Grundlage aller Zusammenhänge zwischen Kräften, insbesondere zwischen Trägheitskräften und der Gravitation. Trägheitskräfte sind nämlich lokal nicht von Gravitationskräften zu unterscheiden. Das ist, in komprimierter Form, der Grund dafür, dass die ART im Wesentlichen als eine Theorie der Gravitation zu betrachten ist.

Zusammengefasst heißt das: Die Relativitätstheorie als Ganzes befasst sich mit der Struktur von Raum und Zeit im Verbund (SRT) sowie mit dem Wesen der Gravitation (ART).

Die ART ist heute die tragende Säule aller astrophysikalischer und kosmologischer Erkenntnisse. Der wesentliche Unterschied zwischen der Newtonschen Gravitationstheorie und der ART ist, dass Einstein die Gravitation nicht als Kraft auffasst, sondern als Raumzeit-Krümmung. Raum und Zeit bilden eine Einheit, deren „Kontur“ durch die Gravitation bestimmt wird. (Gravitation = Raumzeit-Krümmung). Abbildung 1 veranschaulicht die Wirkung der Gravitation mehrerer Massen durch die Verformung einer Ebene, z. B. analog einer Gummihaut.

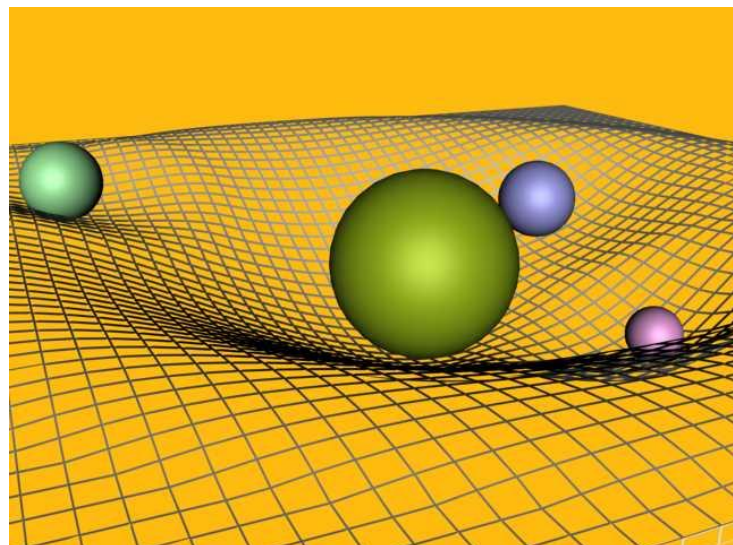


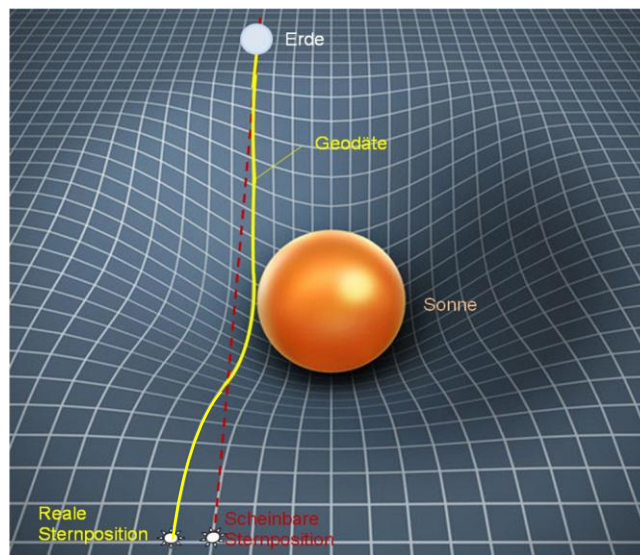
Abb. 1: Gravitationsmulden
verschiedener
massereicher Körper

Quelle: NASA
webspaces.utexas.edu

Obwohl diese einfache Analogie natürlich noch keine Theorie ist, verhilft sie doch schon zu Erkenntnissen, die weit über die Newtonsche Theorie hinaus gehen. Tritt nämlich in dieser Landschaft eine Störung auf z. B. eine gewaltige Explosion eines dieser Körper (vergl. Abbildung 1), dann kann man sich leicht vorstellen, dass ausgehend vom Zentrum dieses Ereignisses Schockwellen durch die Gummihaut, also den ganzen Raum laufen. Das heißt, die Gummihaut, sprich, der Raum als solcher wird durch die Explosion zu Schwingungen angeregt, die sich dann wellenförmig ausbreiten sollten. Diese Wellen sind nichts anderes als die von Einstein vorhergesagten und nun nach rund 100 Jahren 2016 nachgewiesenen Gravitationswellen. Eine andere Konsequenz aus der Gravitationsmulden-Vorstellung ist, dass das Licht, wenn es eine solche Mulde durchläuft, uns im Raum gekrümmt erscheint, also durch die Gravitation einer großen Masse, wie z. B. der Sonne abgelenkt wird. Diese Erscheinung wurde schon 1919 anlässlich einer totalen Sonnenfinsternis in Afrika durch den englischen Physiker Arthur Eddington nachgewiesen (siehe Abbildung 2).

Abb. 2: Lichtspur im Gravitationsfeld der Sonne

Quelle: Reinhard Herrmann (bearbeitet)



Weitere Beobachtungen und Vorhersagen der ART, wie beispielsweise die Periheldrehung des Merkur sind nicht in dieser einfachen Weise zu veranschaulichen, sondern nur durch die Theorie zu erklären. Diese lässt sich in ganz groben Zügen, wie folgt, darstellen:

Die ART beruht auf drei grundsätzlichen Prinzipien:

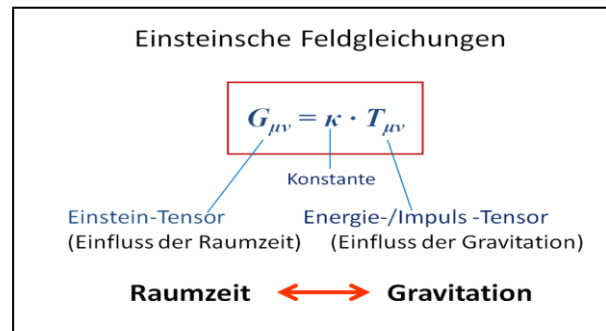
- | | |
|------------------------------------|---|
| 1) Allgemeines Relativitätsprinzip | Gleiche Gesetze in allen Koordinatensystemen. |
| 2) Machsches Prinzip | Es gibt keinen absoluten Raum. |
| 3) Äquivalenzprinzip | Schwere Masse = träge Masse |

Auf der Grundlage seines Lehrers **Hermann Minkowski** (deutscher Mathematiker und Physiker, 1864 – 1909), der erstmalig Raum und Zeit als nicht-euklidische 4-dim. Raumzeit, also als Einheit verstand, formulierte Einstein die mathematisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen der 4-dimensionalen Raumzeit und der Gravitation in Form der sogenannten Einstein-Gleichungen in der folgenden Weise:

$$\underline{G_{\mu\nu} = \kappa \cdot T_{\mu\nu}}$$

Dabei sind $G_{\mu\nu}$ und $T_{\mu\nu}$ Tensoren, κ ist eine Konstante. In der Gleichung beschreibt $G_{\mu\nu}$ den Einfluss der Raumzeit und $T_{\mu\nu}$ den der Gravitation (Abbildung 3).

Abb. 3:
Die Einstein-Gleichungen



Tensoren sind eine Erweiterung des Vektor-Begriffs durch eine Matrix. Sie beinhalten u. a. die Beschreibung von komplexen physikalischen Zusammenhängen in einfacher Darstellung durch ein ganzes System gekoppelter Einzelgleichungen. Im Fall der Einstein-Gleichungen besteht dieses System aus 16 gekoppelten Differentialgleichungen, die in voller Allgemeinheit nicht streng lösbar sind. Man hat deshalb eine Reihe von vereinfachenden Annahmen getroffen (Symmetrierung, **kosmologisches Prinzip**), so dass sich das System auf 4 gekoppelte Gleichungen reduzieren lässt. Auch diese Gleichungen sind nicht alle streng lösbar, sondern zumeist nur vereinfacht oder numerisch.

Auf dieser vereinfachten Grundlage hat der russische Physiker Alexander Friedmann eine Gleichung aus der ART abgeleitet, die unter der Annahme eines homogenen und isotropen Weltalls die Dynamik des Universums wie folgt beschreibt:

Friedmann-Gleichung

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi\rho}{3} - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3},$$

Dabei bedeuten:

$H(t)$ = Hubble-Parameter

$a(t)$ = Skalenfaktor*

\dot{a} = da/dt

$\rho(t)$ = Materie-/Energie-Dichte des Universums

K = Krümmungsparameter

Λ = kosmologische Konstante**

Aus dieser sogenannten **Friedmann-Gleichung** lassen sich je nach dem Materie-/Energiegehalt des Universums Voraussagen über die zeitliche Entwicklung des Weltalls und seine Metrik herleiten.

P. S.

* Der Skalenfaktor $a(t)$ beschreibt die einheitliche Zeitabhängigkeit aller Abstände zwischen kosmischen Objekten. Das heißt, alle Abstände ändern sich proportional zu $a(t)$.

** Die kosmologische Konstante Λ ist erst später in die Gleichung aufgenommen worden.