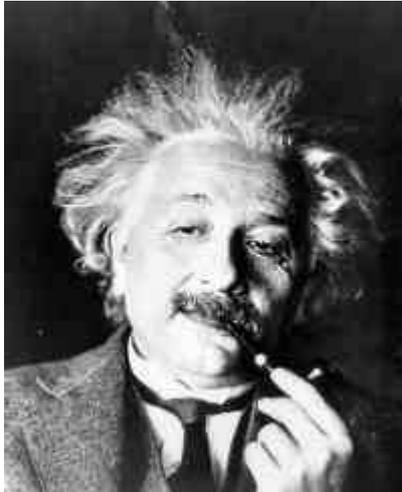


Universität Hannover  
Institut für Soziologie  
Seminar: Naturwissenschaft und Technik  
Dozent: Lutz Hieber  
Referent: Felix Tietje



*Albert Einstein*

Moderne physikalische Theorie – ein allgemeinverständliches Beispiel:

## Die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins

---

### **Gliederung:**

1. Zur Person Albert Einstein (1879-1955)
  2. Die Relativitätstheorie
    - 2.1 Die spezielle Relativitätstheorie
    - 2.2 Die allgemeine Relativitätstheorie
  3. Literaturverzeichnis
-

## 1. Zur Person Albert Einstein (1879-1955)

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Seine Jugend verbrachte er in München, wo sein Vater zusammen mit seinem Onkel eine Fabrik für elektrische Geräte gegründet hatte. Einstein lernte erst mit drei Jahren sprechen, der Unterricht in der Volksschule war ihm zuwider und er hatte Probleme mit dem Klassenlehrer. Er verließ 1894 vorzeitig und ohne Abschluss das Gymnasium. Allerdings zeigte er ein außergewöhnliches Wissen über die Vorgänge in der Natur sowie die Fähigkeit, schwierige mathematische Auffassungen zu verstehen. Mit zwölf Jahren lernte er autodidaktisch die euklidische Geometrie.

1895 bewarb er sich an der Eidgenössischen Polytechnischen Hochschule (später ETH) in Zürich, fiel jedoch durch die Aufnahmeprüfung. Daraufhin machte er an der Kantonsschule in Aarau sein Abitur nach und immatrikulierte sich kurze Zeit später am Polytechnikum. Studienziel war das Diplom eines Fachlehrers für Mathematik und Physik. Einstein begnügte sich damit, ein mittelmäßiger Student zu sein, und beendete im Juli 1900 erfolgreich sein Studium mit der Diplomprüfung.

Am 6. Januar 1903 heiratete er gegen den Willen der Familien Mileva Maric, eine ehemalige Kommilitonin.

Nach kurzer Lehrtätigkeit fand Einstein von 1902 bis 1909 eine Stelle als technischer Vorprüfer am Eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum (Patentamt) in Bern. Trotz der Arbeit im Patentamt arbeitete er weiter auf dem Gebiet der theoretischen Physik. Im April 1905 reichte Einstein seine Dissertation *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* an der Universität in Zürich ein. Im gleichen Jahr veröffentlichte er fünf bahnbrechende Arbeiten in der Fachzeitschrift „Annalen der Physik“, die die Grundlagen der Physik um 1900 revolutionierten.

Drei dieser Arbeiten sollen hier kurz erwähnt werden: In dem ersten Artikel *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* stellte Einstein u.a. den Satz auf, dass elektromagnetische Strahlung aus Lichtquanten bzw. Photonen bestehen muss. Obwohl diese Theorie u.a. den photoelektrischen Effekt erklärte, wurde sie von anderen Physikern – vorneweg vom Pionier der modernen Physik, Max Planck – zuerst abgelehnt, später dann jedoch bestätigt. Mit dieser Arbeit wurde die Grundlage einer Quantentheorie der Strahlung gelegt, und ausdrücklich für sie erhielt Einstein den Nobelpreis im Jahre 1921.

Der Artikel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* enthält die Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie, auf die weiter unten noch detaillierter eingegangen werden soll. Es folgt kurze Zeit später der Artikel *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig*. Er enthält die berühmte Formel von der Äquivalenz von Masse und Energie:  $E = m \cdot c^2$ .

Durch diese Arbeiten hat Einstein die wissenschaftliche Welt auf sich aufmerksam gemacht.

Anfang 1908 wurde Einstein an der Berner Universität habilitiert; Ende des Jahres hielt er seine erste Vorlesung. Da er sich nun ganz der Wissenschaft widmen wollte, kündigte Einstein im Oktober 1909 seine Stelle am Patentamt und nahm im gleichen Monat eine Tätigkeit als außerordentlicher Professor für theoretische Physik an der Universität Zürich auf. 1911 wurde Einstein als ordentlicher Professor an die Deutsche Universität Prag berufen, dem er auch Folge leistete. Aber schon ein Jahr später kehrte er in die Schweiz zurück, da er nun einen Ruf an die Züricher ETH erhielt.

Auf Einsteins Leistungen aufmerksam geworden, holten Max Planck und der Physikochemiker Walther Nernst den jungen Einstein 1914 nach Berlin. Dort machte man ihn zum Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften, er erhielt eine Professur ohne Lehrverpflichtung an

der Universität Berlin und wurde zum Direktor des gerade gegründeten Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik berufen.

Im Gegensatz zum beruflichen Erfolg Einsteins traten vermehrt Probleme in der Ehe auf. Sie führten dazu, dass seine Frau im Juni 1914 mit den Söhnen wieder nach Zürich zurückkehrte. Im Februar 1919 wurde die Ehe geschieden. Ab 1917 litt Einstein an verschiedenen Krankheiten und dadurch an einer allgemeinen Schwäche, die bis 1920 andauerte. Während dieser Zeit wurde er von seiner Cousine Elsa Löwenthal gepflegt. Die beiden kamen sich näher und am 2. Juni 1919 heirateten sie.

In den Jahren 1909 bis 1916 arbeitete Albert Einstein an einer Verallgemeinerung der speziellen Relativitätstheorie, die er im März 1916 in dem Artikel *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* veröffentlichte.

In den Jahren 1921 bis 1923 reiste er viel, u.a. nach Amerika, England, Frankreich, Japan und Palästina. Seit dieser Zeit nahm er auch immer häufiger zu politischen Fragen Stellung, wobei er einen pazifistischen Standpunkt einnahm. 1922 wurde Einstein Mitglied der Völkerbundkommission für Intellektuelle Zusammenarbeit. Als Gegner jeder Art von Gewalt förderte Einstein pazifistische Bewegungen wo er konnte. Außerdem unterstützte er die Zionisten. Er setzte sich sehr für die geplante Hebräische Universität in Jerusalem ein, der er auch per Testament seinen gesamten schriftlichen Nachlass vererbte. Im November 1952 erhielt Einstein sogar das Angebot, Staatspräsident von Israel zu werden, was er jedoch ablehnte, mit der Begründung, er sei zu naiv für die Politik. Später äußerte er: „Gleichungen sind wichtiger für mich, weil Politik für die Gegenwart ist, aber eine Gleichung ist etwas für die Ewigkeit.“

Als Einstein und seine Frau im Dezember 1932 zu einer Vortragsreise in die USA reisten, hatten sich die politischen Verhältnisse in Deutschland stark verändert. Bei den Wahlen 1932 etablierten sich die Nationalsozialisten als stärkste politische Partei und im Januar 1933 kam es zur nationalsozialistischen Machtergreifung. Bedingt durch die politischen Machtverhältnisse und die damit verbundenen Geschehnisse im Nazi-Deutschland nach 1933 hat Albert Einstein nie wieder deutschen Boden betreten. Im März 1933 erklärte er seinen Austritt aus der Preußischen Akademie der Wissenschaften und brach alle Kontakte zu deutschen Institutionen ab, mit denen er zu tun hatte. Die Nazis plünderten Einsteins Haus und zogen sein Bankguthaben ein.

Albert Einstein fand eine neue Heimat in den USA. Er arbeitete ab November 1933 am Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey. Im Dezember 1936 starb Einsteins Frau Elsa.

Seit 1939 wütete in Europa der Krieg. Aus Angst davor, dass in Deutschland an der Entwicklung einer Atombombe gearbeitet wird, schrieb Einstein am 2. August 1939 einen Brief an den amerikanischen Präsidenten Franklin Roosevelt, um ihn auf die Möglichkeit einer atomaren Gefahr hinzuweisen. In dem Brief wies er den Präsidenten auf die militärische Bedeutung der Atomenergie hin und mahnte, dieses Problem ernst zu nehmen. Er gab ihm die Anregung, dass auch die USA ihre kerntechnischen Forschungen forcieren sollten. Dies war die einzige Beteiligung Einsteins im Zusammenhang mit der Atombombe. Noch bevor die erste Atombombe explodierte, warnte Einstein öffentlich vor den Gefahren eines Atomkrieges und schlug eine internationale Kernwaffenkontrolle vor.

Am 1. Oktober 1940 wurde Einstein als amerikanischer Staatsbürger vereidigt, behielt jedoch die Schweizer Staatsbürgerschaft. 1946 schlug Einstein in einem offenen Brief an die Vereinten Nationen die Bildung einer Weltregierung vor, in der er die einzige Möglichkeit für einen dauerhaften Frieden sah. Diese Bestrebungen verstärkte er in den darauffolgenden Jahren.

Im August 1948 starb Einsteins erste Frau Mileva Maric in Zürich, er selbst musste sich im Dezember des gleichen Jahres einer Unterleibsoperation unterziehen. Im März 1950 verfasste er sein Testament. Noch 1953 schrieb Einstein die letzte Fassung der Relativitätstheorie. Am 18. April 1955 starb er im Alter von 76 Jahren.

Einstein erhielt im Laufe seines Lebens ca. 25 Ehrendokortitel und den Nobelpreis für Physik im Jahre 1922. Er ist wohl der berühmteste Naturwissenschaftler des 20. Jahrhunderts. Sein Leben war, wie er selbst über sich aussagte, „hin- und hergerissen zwischen Politik und Gleichungen.“ Einsteins politische Auffassungen, wie auch seine wissenschaftlichen Arbeiten, waren meist zunächst alles andere als populär. Er wurde Zeit seines Lebens angegriffen – was ihn jedoch nicht aus der Ruhe brachte, oder daran hinderte, offen seine Meinung zu sagen.

**„Woher kommt es, dass mich niemand versteht und jeder mag?“ Albert Einstein, 1944**

## 2. Die Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie ist eine physikalische Theorie über die Struktur von Raum und Zeit. Sie wird unterschieden in die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie.

Die spezielle Relativitätstheorie behandelt Fragen von sich gegeneinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegenden Bezugssystemen. Sie führte zu einer Neufassung der Begriffe Raum und Zeit und beruht auf dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und auf dem Relativitätsprinzip, das die Unmöglichkeit der Bestimmung einer absoluten Bewegung postuliert, d.h. ein sich bewegendes Objekt kann immer nur in Relation zu etwas anderem gesehen werden (das sich auch in einer Bewegung befindet). Des Weiteren zog sie neue Vorstellungen von Masse und Energie nach sich.

Die allgemeine Relativitätstheorie untersucht relativ zueinander beschleunigte Bezugssysteme sowie den Einfluss von Gravitationsfeldern auf Uhren und Maßstäbe. Ist die spezielle Relativitätstheorie für den Laien noch zu verstehen – die allgemeine Relativitätstheorie ist es nicht mehr, weshalb sie auch in diesem kurzen Referat nicht vollständig erläutert werden kann und nur kurz erwähnt werden soll.

Es war zudem für Einstein schwierig, wegen der geringen relativistischen Effekte bei niedrigen Bezugsgrößen, seine Theorie im Experiment zu bestätigen. Zum Beispiel die von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie besagte Tatsache, dass eine bewegte Uhr langsamer geht als eine ruhende, konnte erst mit Hilfe hochgenauer Messapparaturen (Präzisionsuhren, sog. „Atomuhren“) und schnell fliegenden Flugzeugen im Jahre 1971 experimentell nachgewiesen werden.

Die spezielle Relativitätstheorie formulierte Einstein vor der allgemeinen Relativitätstheorie; die spezielle Relativitätstheorie ist jedoch vollständig in der allgemeinen Relativitätstheorie enthalten. Die spezielle Relativitätstheorie ist ein Spezialfall der allgemeinen Relativitätstheorie. Die allgemeine Theorie beschäftigt sich kurz gesagt mit der Gravitation, oder allgemeiner, mit beschleunigten Bezugssystemen; die spezielle Relativitätstheorie hingegen mit Inertialsystemen. Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem keine Kräfte wirken, also z.B. die Schwerelosigkeit im All, oder näherungsweise der Freie Fall. Einstein kam zu der Idee der speziellen Relativitätstheorie, als er einen Maler traf, der vom Dach gefallen war. Er fragte den Mann, wie er sich während des freien Falles gefühlt habe. Der Mann antwortete, es sei ein Gefühl der Schwerelosigkeit gewesen, er habe geglaubt, zu schweben.

Was es zunächst schwierig macht, Einsteins Relativitätstheorien zu verstehen, ist, dass ihre Aussagen mit den Sinnesorganen kaum zu begreifen ist. Für die Orientierung im Raum hat der Mensch ein Gleichgewichtsorgan im Innenohr („die drei Bögen“, ausgerichtet in drei senkrecht zueinander stehenden Richtungen – wie ein dreidimensionales Koordinatensystem in x-, y-, und z-Richtung). Doch ein Sinnesorgan für die Zeit haben wir nicht. Zeit ist ein menschliches Konstrukt. Wir haben zwar eine "innere Uhr", aber diese ist leicht zu täuschen. Wir können Veränderungen wahrnehmen und daraufhin die Zeit schätzen, wir können sie mit Apparaturen messbar machen – doch die Wahrnehmung und Bedeutung von Zeit ist von Gesellschaft zu Gesellschaft, und auch von Individuum zu Individuum sehr unterschiedlich. Die Eigen-Zeit spielt eine wichtige Rolle in der Relativitätstheorie.

Die Relativitätstheorie führte zu einem neuen wissenschaftlichen Verständnis von Raum und Zeit; sie reformierte das newtonsche Weltbild. Einsteins Theorie rüttelte damit an den Fundamenten der Physik, wenn nicht sogar der gesamten abendländischen Welt. Die absolute Angabe von Orts- und Zeitangaben verliert endgültig ihre Bedeutung. Einstein zeigte, dass es nur sinnvoll ist, zeitliche und räumliche Maßstäbe zweier Beobachter **relativ zueinander** zu vergleichen.

## 2.1 Die spezielle Relativitätstheorie

Der Begründer der klassischen Mechanik, Isaac Newton, formulierte die Gravitationslehre, die ihre Gültigkeit bis heute beibehalten hat. Ein Apfel fällt vom Baum, weil die Erde den Apfel anzieht. Der Mond verschwindet nicht in den Weiten des Alls, weil die Erde ihn anzieht; die Fliehkraft des Mondes bei der Bewegung um die Erde verhindert seinen Absturz. Die Gravitation ist nach Newton eine anziehende Kraft, die proportional der Masse der beteiligten Körper zunimmt und im Quadrat der Entfernung abnimmt.

In der Zeit vor Einstein nahm man einen absoluten Raum und eine absolute Zeit an. Newton bezeichnete das Universum als einen absoluten Raum, der für sich allein vorhanden ist und ohne Bezug auf irgendeinen Gegenstand existiert. Dieser Weltraum wurde unendlich groß gedacht und mit unendlich vielen Sternen besetzt. Dies musste in Newtons Theorie so sein, um ein Zusammenfallen des Raumes auszuschließen: In einem endlichen Raum würden die Gravitationskräfte der Gestirne die gesamte darin enthaltene Masse an einem Punkt zusammenziehen.

Genauso betrachtete Newton die Zeit als absolute Zeit im absoluten Raum: Sie ist unbeeinflusst von Gegenständen und deren Bewegung. Unter einer absoluten Zeit kann man sich folgendes vorstellen: Alle Uhren gleicher Bauweise gehen überall im Weltraum und für jeden Beobachter gleich schnell. Einsteins Theorie führt jedoch zu der Konsequenz: Der Gang einer Uhr ist von ihrem Bewegungszustand oder dem Schwerfeld eines Himmelskörpers abhängig.

Nach Newtons Vorstellung sind innerhalb des absoluten Raumes bewegliche Teile enthalten, die er als relative Räume bezeichnete. Mit Hilfe der relativen Räume konnte man Bezugssysteme bilden und damit Naturvorgänge beschreiben. Eine besondere Form von Bezugssystemen stellen die Inertialsysteme dar. Dies sind geschlossene Bezugs- oder Koordinatensysteme, in denen sich ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ohne von außen hinzukommende Kräfte (also auch Körper mit der Geschwindigkeit 0, im Ruhezustand). Für diese Systeme gelten bestimmte Gesetzmäßigkeiten, z.B. das Trägheitsprinzip.

Eine zentrale Aussage der galilei-newtonschen Mechanik ist das Relativitätsprinzip der Mechanik. Es besagt, dass alle konstanten Geschwindigkeiten relativ sind, es gibt kein absolutes Bezugssystem, das einem erlauben würde, eine Geschwindigkeit absolut festzulegen. Die gleichförmige Bewegung eines Körpers kann niemals absolut, sondern immer nur in Bezug eines anderen Körpers festgestellt werden. Wenn also ein Zug sich räumlich von einem Bahnhof entfernt, spielt es im Ergebnis keine Rolle, ob man annimmt, dass sich der Zug bewegt und der Bahnhof am selben Ort bleibt (der Zug bewegt sich relativ zum Bahndamm) oder ob der Zug konstant ist und der Bahnhof sich bewegt (der Bahndamm bewegt sich relativ zum Zug).

Das newtonsche Weltbild behielt viele Jahre lang seine Gültigkeit. Man begann, sich Gedanken über die Eigenschaften elektromagnetischer Wellen zu machen, insbesondere der Eigenschaften des Lichts. Man stellte sich vor, dass das Licht eine Welle ist, wie der Schall, und ein Medium zur Ausbreitung benötigte: den Äther. Äther wurde hypothetisch als eine sehr feine, dünne Substanz gedacht, die den gesamten, absoluten Raum (also auch ein erzeugtes Vakuum) ausfüllt. Durch immer genauere Versuche und Messungen erkannte man, dass das Licht nicht unendlich schnell ist, sondern sich mit einer sehr hohen, aber endlichen Geschwindigkeit durch Anregung des Äthers fortpflanzt. 1801 bestätigte Thomas Young experimentell die Welleneigenschaft von Licht mit seinem Doppelspaltversuch. Die Interferenzeigenschaften des Lichtes wurden entdeckt.

Die Lichtgeschwindigkeit wurde jedoch noch nicht als Konstante gesehen. Erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts gab es an der Äthertheorie erste Zweifel. Als die Messungen der Lichtgeschwindigkeit immer genauere Ergebnisse lieferten, und sie schließlich als konstant angesehen werden musste, gerieten diese Vorstellungen ins Wanken.

Die Wurzeln der speziellen Relativitätstheorie liegen in einem Widerspruch zwischen dem Relativitätsprinzip der Mechanik und der Maxwellschen Theorie der Elektrodynamik:

Maxwell entwickelte zwischen 1864 und 1865 die Theorie der Elektrodynamik – die berühmten Maxwellschen Gleichungen. Diese Gleichungen zur Beschreibung elektrischer und magnetischer Felder haben die Eigenart, dass sie ihre Form unabhängig vom gewählten Bezugssystem beibehalten. Die vier Gleichungen (Einstein machte daraus später zwei Gleichungen, da er Raum und Zeit zu einer Einheit zusammenfasste) vereinheitlichen elektrische und magnetische Felder und ergeben als wesentliche Konsequenz, dass sich die elektromagnetischen Wellen des Lichtes mit **konstanter** Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

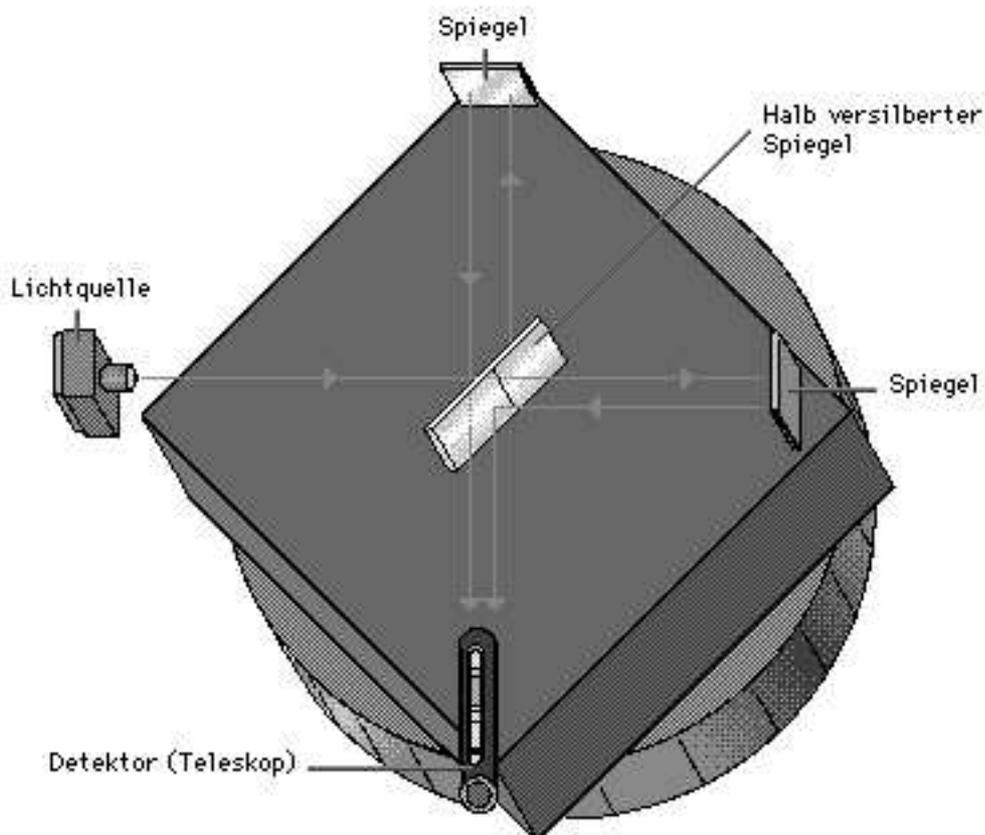
Nach der newtonschen Theorie der Mechanik sollte jedoch die Lichtgeschwindigkeit keineswegs konstant sein. Hierzu zwei Beispiele: Das erste Beispiel handelt von zwei Steinwürfen: Beim ersten Wurf wird der Stein aus dem Stand geworfen, beim zweiten Mal schleudert ihn der Werfer aus einem fahrenden Auto heraus. Im zweiten Fall fliegt der Stein mit der Geschwindigkeit des Wagens plus der Wurfgeschwindigkeit.

Nun übertragen wir dieses Beispiel auf die Geschwindigkeit von Licht: In diesem Beispiel nehmen wir zwei Lampen (L und L'). Lampe L' bewegt sich gegenüber Lampe L mit der Geschwindigkeit v. Der Beobachter befindet sich relativ zur Lampe L in Ruhe. Der Beobachter sollte nun nach der klassischen Theorie der Mechanik zwei unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten messen (c und c'): Wäre die Lichtgeschwindigkeit der Lampe L = c, dann sollte die Lichtgeschwindigkeit von L' nach Newton und Galilei  $c' = c + v$  sein.

Die klassische Mechanik vor Einstein stand also im Widerspruch zu der Maxwellschen Theorie.

Dieser Sachverhalt wurde 1887 durch das amerikanische Michelson-Morley-Experiment bestätigt: Der Physiker Edward Morley bestimmte mit Hilfe eines Interferometers, das der Physiker Albert Michelson entwickelt hatte, die Lichtgeschwindigkeit mit einer besonders hohen Genauigkeit. Da sich das Licht (nach damaligen Vorstellungen) durch den Äther bewegt, muss die Geschwindigkeit des Lichtes von der Bahnrichtung der Erde abhängen. Das Michelson-Morley-Experiment sollte nun genau bestimmen, mit welcher Relativgeschwindigkeit sich die Erde durch den Äther bewegt. Mit Hilfe dieser sehr empfindlichen Interferenzversuche hätten Geschwindigkeitsunterschiede des Lichtes festgestellt werden sollen – es wurde jedoch nachgewiesen, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Konstante ist.

Man nutzte für das Experiment die Bewegung der Erde aus, indem man das Licht einmal in Bewegungsrichtung der Erde und einmal entgegengesetzt laufen ließ. Die Erde bewegt sich mit etwa 30 km/s um die Sonne. Diese Bewegung hätte zur Folge, dass die Lichtgeschwindigkeit, gemessen einmal zur Bahnrichtung und ein anderes Mal gegen die Bahnrichtung, um den Betrag von 30 km/s variieren müsste. Die von einer Lichtquelle ausgesandten Strahlen werden von einer halb verspiegelten Glasplatte in zwei Teilbündel aufgespalten. Jedes Teilbündel durchläuft einen Strahlengang, wobei ein Strahlengang parallel und der andere senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde steht. Diese Arme des Interferometers sind beide gleich lang. Am Ende des jeweiligen Strahlenganges werden die Teilbündel durch Spiegel reflektiert und gelangen über die halb verspiegelte Platte zur Überlagerung. Das dabei entstehende Interferenzmuster lässt sich über ein Fernrohr beobachten. Nach den Vorstellungen der beiden Physiker Michelson und Morley sollten dabei unterschiedliche Laufzeiten der reflektierten Strahlenbündel auftreten, die Interferenzmuster sollten zueinander verschoben sein. Im ersten Fall müsste die Lichtgeschwindigkeit um die Geschwindigkeit der Erde erhöht sein, im zweiten erniedrigt. Das Versuchsergebnis war negativ; eine Bewegung der Erde durch den Äther war nicht nachzuweisen. Das Ergebnis ließ den Schluss zu, dass es einen ruhenden Äther, wie ihn die Hypothese von Newton forderte, überhaupt nicht gibt. Zumindest aber war damit bewiesen, dass sich Licht auf der Erde in allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitet.



**Das Michelson-Morley-Experiment**

Dieses Experiment diente als historische Grundlage der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Er postulierte 1905: Die Naturgesetze der Wissenschaft müssen für alle Beobachter in gleicher Weise gelten, unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegen. Er nahm in seiner Theorie an, dass es im gesamten Universum nur konstante Geschwindigkeiten relativ zueinander gibt. Das traf schon auf Newtons Gesetze der Mechanik zu, doch Einstein dehnte das Prinzip auch auf Maxwells Theorie und die Lichtgeschwindigkeit aus: Alle Beobachter müssen die konstante Lichtgeschwindigkeit messen, wie schnell auch immer sie sich bewegen.

Für das obige Lampenbeispiel bedeutet dies: Egal aus welchem Bewegungszustand das Licht „abgefeuert“ wird, es bewegt sich immer mit derselben Lichtgeschwindigkeit  $c$  durchs Vakuum.

Die Lichtgeschwindigkeit wird heute mit  $c = 299\,792\,458$  m/s im Vakuum angegeben. Sie ist eine Konstante, unabhängig vom Bewegungszustand des Beobachters, d.h. jeder Beobachter, egal wie schnell er sich bewegt, wird die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen. Dies klingt paradox und entspricht nicht unserer alltäglichen, mechanischen Vorstellung von Geschwindigkeiten. Die Messung der konstanten Lichtgeschwindigkeit zieht einige logische Konsequenzen mit sich, die das Weltbild damaliger Physiker stark erschütterte und der newtonschen Zeit- und Raumvorstellung ein Ende machte.

Geschwindigkeit ist ein Bewegungszustand, der einen zurückgelegten Weg in einer bestimmten Zeit darstellt. Wir haben also den Maßstab Zeit und den Maßstab Weg. Kombiniert man die beiden Maßstäbe mit einer konstanten Lichtgeschwindigkeit, kommt man zu der Erkenntnis, dass die Zeit und der Raum für jeden Beobachter eine eigene Skala besitzt, je nach Bewegungszustand des Beobachters.

Der Raum und die Zeit verlieren damit ihre Absolutheit. Raum und Zeit müssen in der Vorstellung gedehnt und gestaucht werden, so dass die Lichtgeschwindigkeit in der Rechnung immer gleich ist. Raum und Zeit sind nicht mehr voneinander getrennt zu betrachten, sie werden kombiniert zur vierdimensionalen Raumzeit.

Bezogen auf das obige Lampenbeispiel: Wenn man bei der ruhenden Lampe  $L = c$  misst, bei der bewegten Lampe  $L'$  aber auch die Konstante  $c$ , muss die vierdimensionale Raumzeit modifiziert werden, damit das Gesamtsystem stimmig bleibt. Die Zeit der bewegten Lampe läuft langsamer, als die der ruhenden.

Diese ungewohnte Vorstellung von Einstein traf natürlich zuerst auf Widerstand. Er stellte mit der Theorie ein komplettes Weltbild in Frage, indem er sagte, Raum und Zeit sind für jeden Beobachter ausschließlich relativ zu betrachten, je nach Bewegungszustand.

Alltäglich zu empfinden ist diese Relativität jedoch nicht, da die relativistischen Effekte der Zeitverlangsamung ("Zeitdilatation") und Streckenverkürzung ("Längenkontraktion") erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten für uns messbar werden, also in Maßstäben auftreten, die wir mit unseren eingeschränkten Sinnen nicht spüren können. Selbst wenn sich die Lampe aus dem obigen Beispiel mit  $30\,000$  km/s bewegen würde (also  $10\%$  der Lichtgeschwindigkeit), würde die Zeit nur unmerklich langsamer laufen: Würde die ruhende Lampe  $60$  Minuten stehen, wäre die bewegte nur Lampe  $59$  Minuten und  $42$  Sekunden gealtert.

$$\Delta t = t / \sqrt{1 - (v/c)^2}, \text{ wobei } \Delta t \text{ und } t \text{ die Zeit, } v \text{ die Reisegeschwindigkeit}$$
$$\text{und } c \text{ die Lichtgeschwindigkeit sind.}$$
$$= 60 \text{ min} / \sqrt{1 - (30000 \text{ km/s} / 299792,5 \text{ km/s})^2}$$
$$= 59,69 \text{ min das entspricht } 59 \text{ min und } 42 \text{ sek}$$

Einstein bringt in der speziellen Relativitätstheorie nun noch eine weitere Größe mit ins Spiel: die Masse. Masse ist wie Raum und Zeit ebenfalls keine absolute Größe, sondern relativ.

Hierzu ein weiteres Beispiel einer Gewehrkegel, die auf ein Stück Holz geschossen wird. Die Kugel trifft mit einer hohen Geschwindigkeit auf. Die Verformung des Holzes hängt von der Bewegungsenergie der Kugel ab.

Nach der newtonschen Mechanik ist die Energie der Kugel  $= 0,5 \cdot m \cdot v^2$ . Die Energie der Kugel steigt proportional mit ihrer Masse und im Quadrat ihrer Geschwindigkeit. Dieses Gesetz ist für niedrige Alltagsgeschwindigkeiten haltbar. Bewegt sich die Kugel jedoch mit einer Geschwindigkeit, die der Lichtgeschwindigkeit nahe kommt, verhält es sich anders: Die Masse der Kugel muss mit zunehmender Geschwindigkeit größer angenommen werden, da die Lichtgeschwindigkeit ja konstant ist. Als ruhender Beobachter sähen wir wegen der Zeitdilatation die Kugel langsamer einschlagen, als ein Beobachter, der sich mit hoher Geschwindigkeit auf das Brett zu bewegen würde. Die Kugel wird für beide Beobachter gleich tief in das Brett eindringen, obwohl die Kugel unterschiedlich schnell zu sein scheint. Der ruhende Beobachter muss von einer höheren Masse der Kugel ausgehen, um die gleiche Bewegungsenergie zu erhalten, die das Brett durchbohrt.

Die Massenzunahme bei hoher Geschwindigkeit verhindert zusätzlich, dass irgendein Gegenstand die Lichtgeschwindigkeit erreicht, oder sie übertrifft. Mit zunehmender Masse muss für jede weitere Beschleunigung mehr Energie aufgewandt werden. Die zugeführte Energie bewirkt eine weitere Massenzunahme. Je näher man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert, desto höher sind die eingesetzten Energien und Massenzunahmen, so dass man rechnerisch für das Erreichen der Lichtgeschwindigkeit eine unendlich hohe Energie und eine unendlich hohe Masse erhält. Objekte mit einer Ruhemasse werden die Lichtgeschwindigkeit nicht erreichen.

Einstein hat mit seiner Theorie nicht nur Raum und Zeit miteinander verknüpft, sondern gleichzeitig die Masse mit der Energie. Die Äquivalenz von Masse und Energie kommt in Einsteins berühmter Formel zum Ausdruck:  $E = m \cdot c^2$ . Diese Formel ist also nichts anderes als die Umrechnung von Masse in Energie. Masse ist nach Einstein "gefrorene" Energie.

Die Annahme einer konstanten Lichtgeschwindigkeit  $c$  hat also enorme Konsequenzen für die Vorstellungen von Raum, Zeit und Masse bzw. Energie. Für unser Alltagsempfinden erscheinen diese Konsequenzen ungewöhnlich. Da die relativistischen Effekte jedoch erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten messbar auftreten, baut unsere Mechanik noch immer weitgehend auf Newtons Gravitationslehre. Ein Architekt wird schließlich auch nicht die Erdkrümmung bei der Planung eines Hauses berücksichtigen, obwohl schon lange bekannt ist, dass die Erde kugelförmig ist. Und obwohl wir alle wissen, dass die Erde um die Sonne kreist, sprechen wir noch immer vom „Sonnenaufgang“.

Alles ist relativ.

Wenn nun aber alles relativ ist, wie kann man überhaupt noch eine zutreffende Aussage über irgend etwas machen? Einsteins Lösung klingt einfach: Es ist immer möglich ein lokales Inertialsystem zu schaffen (also einen „freien Fall“), das eine Vergleichsmöglichkeit zu einem Nicht-Inertialsystem bietet. Der Begriff einer absoluten Raum-Zeit-Angabe ist sinnlos.

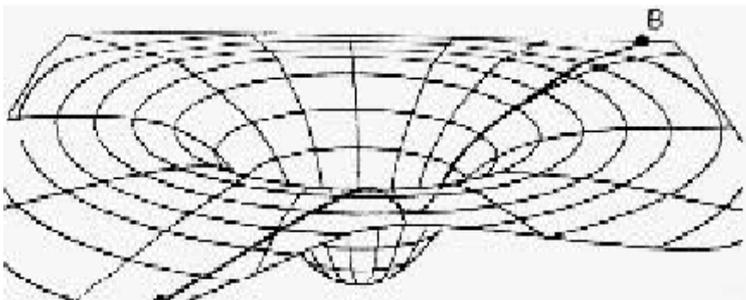
## 2.2 Die allgemeine Relativitätstheorie

Die für den Alltagsverstand teilweise unfassbaren Effekte seiner Theorie bewegten Einstein dazu, die Eigenschaften der Gravitation hinsichtlich seines neuen Weltbildes zu untersuchen. Er brauchte mehrere Jahre, um zu erkennen, wie die Raumzeitgeometrie „seines“ Universums vorzustellen ist. Nachdem Einstein Raum, Zeit, Masse und Energie neu definiert hatte, musste er Raumzeit nicht als völlig eben und geradlinig annehmen. Er erfand den Begriff der Raumkrümmung.

Newtons Theorie besagte, dass ein Körper, der in Bewegung ist, sich immer und ewig in diesem Zustand befinden wird, solange keine neue Kraft auf ihn einwirkt. Einstein erweiterte diesen Gedanken und postulierte, dass jeder Körper sich auf immer und ewig durch die vierdimensionale Raumzeit bewegen wird. Ein Körper, der nicht beschleunigt wird, schlägt automatisch den längsten Eigenweg mit der längsten Eigenzeit durch die Raumzeit ein. Eine Beschleunigung durch Antrieb oder Gravitation wird die Raumzeit verbiegen, und somit eine Zeitdilatation und eine Längenkontraktion hervorrufen.

Ein Körper bewegt sich auf dem kürzesten Weg, der sogenannten Geodäte, durch die Raumzeit. Einstein definiert die Raumzeit als ein vierdimensionales Gebilde, das durch Masse gekrümmt wird.

Die Sonne ist eine Masse, die die Raumzeit um sich krümmt und so die Planeten um sich hält. Wird also ein Lichtquant im Schwerfeld der Sonne abgelenkt, so muss man nach Einstein diesen Effekt nicht als Wirkung einer Kraft verstehen. Das Lichtquant folgt nur dem durch die Masse der Sonne gekrümmten Raumverlauf.



Eine Masse krümmt die vierdimensionale Raumzeit. Der Weg eines Objektes B ist bestimmt durch die Geodäte auf dem Weg durch die gekrümmte Raumzeit.

Die Geodäte der Erde durch die Raumzeit entspricht also der Bahn um die Sonne. Somit wird die Gravitation durch Einsteins Theorie eine geometrische Eigenschaft des Universums.

Es fällt dem Menschen deshalb so schwer, Raum und Zeit als gleichberechtigte, miteinander verknüpfte Größen zu betrachten, weil wir kein Sinnesorgan für die Zeit besitzen und weil wir keine technischen Möglichkeiten haben, uns auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen.

Albert Einstein war ein theoretischer Physiker. Die Relativitätstheorie entstand in seinen Ideen. Die Konsequenzen seiner Grundüberlegungen brachte er zu Papier und stützte sie mit mathematischen Berechnungen. Das Ergebnis der Berechnungen stimmte mit der Wirklichkeit überein – die Relativitätstheorie sagte Naturerscheinungen voraus, die inzwischen durch Experimente bestätigt wurden.

Die wichtigsten Konsequenzen noch einmal zusammengefasst:

- Das Gesetz nach dem sich nichts schneller fortbewegen kann als das Licht
- Die Äquivalenz von Masse und Energie, Einsteins berühmte Formel:  $E = m \cdot c^2$
- Zeitdilatation: Bewegte Uhren gehen langsamer (relativ zu der ruhenden)
- Zeitdilatation 2: Eine Uhr im Schwerfeld (z.B. dem der Sonne) geht relativ zu einer baugleichen Uhr in der Schwerelosigkeit langsamer
- Längenkontraktion: Vergleicht ein Beobachter z.B. ein vorbeifliegendes Lineal mit seinem ruhenden (gleichlangen) Lineal, so erscheint das bewegte verkürzt
- Längenkontraktion 2: Längeneinheiten im Schwerfeld (z.B. dem der Sonne) sind relativ zu denen in der Schwerelosigkeit verkürzt
- Lichtablenkung: Licht wird im unmittelbaren Schwerfeld (z.B. dem der Sonne) abgelenkt. Eine große Masse krümmt die Raumzeitmetrik. Diese Voraussage wurde 1919 bei einer totalen Sonnenfinsternis in Afrika experimentell bestätigt: Sterne, die sich räumlich betrachtet hinter der Sonne befinden sollten, wurden sichtbar.
- Rot-Grün-Verschiebung: Bewegt sich ein Stern z.B. von der Erde weg, so erscheint sein Licht in den roten Bereich des Spektrums verschoben.

Astronomische Beobachtungen und die Erforschung des Verhaltens von Elementarteilchen am Rande der Lichtgeschwindigkeit in Teilchenbeschleunigern konnten Einsteins Relativitätstheorie wiederholt bestätigen.

Es gibt allerdings Konflikte mit einer anderen großen Theorie des 20. Jahrhunderts: der Quantentheorie. Einige Konsequenzen der Quantentheorie sind mit der Relativitätstheorie nicht vereinbar. Eine Überwindung dieser Konflikte und die Vereinigung dieser beiden großen physikalischen Theorien könnte theoretisch zur „Weltformel“ führen. Ein Ansatz zur Vereinigung ist die Superstringtheorie, die Elementarteilchen als kleine Fäden beschreibt und zudem nicht bloß vier, sondern mindestens elf Dimensionen postuliert.

Eine Darstellung der Grundzüge der Quanten- und der Superstringtheorie kann hier nicht mehr geleistet werden. Die Quantenmechanik bezieht sich heute auf die Mikroebenen der Welt, während die Relativitätstheorie die makroskopischen Eigenschaften beschreibt. Eine Vereinigung dieser beiden Theorien würde das Große und das Kleine erklären können.

### 3. Literaturverzeichnis

- Einstein, Albert: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Jerusalem 1956
- *Relativitätstheorie*, Microsoft Encarta Enzyklopädie, 1998
- Hawking, Stephen: *Eine kurze Geschichte der Zeit*, 1995
- Overhaus, Christian: *Die Relativitätstheorie*, 1999  
([home.t-online.de/home/ch.ov/Relativitat.PDF](http://home.t-online.de/home/ch.ov/Relativitat.PDF) , 02.06.02)
- Unrau, Boris *Relativitätstheorie für alle*,  
([http://www.einsteins-erben.de/relativitaetsstheorie\\_fuer\\_alle.htm](http://www.einsteins-erben.de/relativitaetsstheorie_fuer_alle.htm) , 01.06.02)
- Kassner, Klaus: *Schnellkurs Relativitätstheorie*, Magdeburg 1999  
(<http://www.hjp.at/science/rt/> , 01.06.02)
- Biographische Informationen: Küpper, Hans-Josef: *Einstein*  
(<http://www.einstein-website.de/> , 31.05.02)

---

<http://www.feliz.de/html/einstein1.htm>