

3. Die Relativität von Zeit und Raum

"Was ist Zeit? Wenn mich niemand danach fragt, weiß ich es; will ich es einem Fragenden erklären, weiß ich es nicht mehr."

Augustinus: "Confessiones"

Alle physikalischen Prozesse laufen in Raum und Zeit ab. Man betrachte als Beispiel einen Ball, der durch die Luft fliegt. Er ist zu jedem Zeitpunkt an einem anderen Raumpunkt zu finden. Für Newton waren Raum und Zeit keine Objekte physikalischer Forschung, für ihn waren beide als absolute Bestandteile des Kosmos einfach da. So sprach er von absoluter Zeit und absolutem Raum. Für Kant waren Raum und Zeit a priori existierende Anschauungsformen, die aller Erfahrung zugrunde liegen und deshalb nicht hinterfragt werden. Erst bei Einstein, z.B. in seinen Überlegungen zu der Frage "Was ist Zeit?", über die wir in der letzten Vorlesung gesprochen haben, werden Zeit und Raum Objekte physikalischer Forschung und damit Teil der Physik. Auf die Frage "Was ist Zeit?" würde Einstein antworten: "Was mir die Uhr anzeigt". Damit verloren Raum und Zeit den Rang "absoluter" Größen und wurden "relativ". Im Alltagsdenken sind wir immer noch stark der Newtonschen Vorstellung verhaftet, für uns sind Raum und Zeit immer noch absolut. Deshalb werden Sie in dieser Vorlesung mit einigen sehr merkwürdigen Dingen konfrontiert, aber sehen Sie sie nicht als kurios an, sondern als "merk"würdig in dem Sinne, dass man sie sich merken sollte.

3.1 Addition von Geschwindigkeiten

Alle Phänomene, die uns in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie so unverständlich erscheinen, lassen sich auf einen Grund zurückführen: Die Lichtgeschwindigkeit ist absolut, sie ist eine Naturkonstante, d.h. sie hat in allen Systemen den gleichen Wert. Diese Tatsache wäre eigentlich nicht verwunderlich, wenn sie nicht der Alltagserfahrung von der "Addition der Geschwindigkeiten" widersprechen würde. Was darunter zu verstehen ist, soll kurz an folgendem Beispiel erklärt werden: Im Heidelberger Bahnhof führen zwei nebeneinanderliegende Treppen vom Bahnsteig nach oben, eine Festtreppe und eine Rolltreppe. Zwei Reisende kommen gleichzeitig am Fuß der beiden Treppen an und steigen mit gleicher Geschwindigkeit die Stufen hinauf, der eine auf der feststehenden, der andere auf der Rolltreppe. Wer kommt als erster oben an? Natürlich der auf der Rolltreppe, denn zu seiner eigenen Laufgeschwindigkeit addiert sich die Geschwindigkeit der Stufen. Für Licht wäre das anders. Würden die beiden Reisenden die Treppe mit Lichtgeschwindigkeit hochsteigen – das ginge natürlich nur, wenn sie aus Licht bestünden - so kämen sie gleichzeitig oben an, denn Licht kann nie schneller als mit Lichtgeschwindigkeit fliegen.

Beschreibt man die Bewegung auf der Rolltreppe mathematisch, so gilt für die Geschwindigkeiten der Reisenden eine Additivität. Damit ist folgendes gemeint: Wenn der Reisende mit der Geschwindigkeit v_R auf der Rolltreppe geht und diese selbst sich mit der Geschwindigkeit v_T bewegt, kommt er mit einer Gesamtgeschwindigkeit v_g

$$v_g = v_R + v_T$$

voran. Wenn jedoch die Reisenden Lichtstrahlen mit der Geschwindigkeit $v_R = c$ wären, dann wäre auch die Gesamtgeschwindigkeit $v_g = c$. Mit der obigen Formel der Additivität hätte man das paradoxe Ergebnis $c = c + v_T$. Also kann die einfache Additivitätsformel für $v_R = c$ nicht gelten. Einstein leitete eine neue Formel ab, die auch für hohe Geschwindigkeiten gilt:

$$v_g = (v_R + v_T) / (1 + v_R \cdot v_T / c^2)$$

Wenn beide Geschwindigkeiten, die der Treppenstufen und die des Reisenden, klein gegen c sind, kann man die Korrektur im Nenner vernachlässigen, und man erhält das Alltagsergebnis. Wenn aber $v_R = c$, dann liefert die obige Formel $v_g = c$. Übrigens schien Einstein schon in seiner Jugend von der Frage besessen gewesen zu sein, was denn passiere, wenn man auf einem Lichtstrahl reite.

3.2 Zeitdilatation, Lichtuhr

Mit der Diskussion der Zeitdilatation kann man sich sehr gut den Grundgedanken der Relativitätstheorie nähern. Hierzu betrachten wir einen Stationsvorsteher auf dem Bahnsteig und eine Schaffnerin im Zug. Vor der Abfahrt des Zuges vergleicht sie ihre Uhr mit der Bahnhofsuhr und findet, dass beide exakt gleich gehen. Auch der Bahnhofsvorsteher bestätigt das. Bei der Ausfahrt aus dem Bahnhof vergleicht die Schaffnerin noch einmal die Uhren und findet jetzt, dass die Bahnhofsuhr langsamer als ihre Uhr geht. Noch kurioser: Der Bahnhofsvorsteher beobachtet auch, dass die beiden Uhren verschieden schnell gehen, aber er stellt fest, dass die Uhr im fahrenden Zug langsamer als die Bahnhofsuhr geht. Es gibt also zwei schwer in Einklang zu bringende Beobachtungen:

1. Uhren, die synchron laufen, wenn sie relativ zueinander ruhen, laufen verschieden schnell, wenn sich die eine gegenüber der anderen bewegt. Das jedenfalls stellt ein Beobachter fest, und wer sonst könnte dazu eine Aussage machen?
2. Für die Beobachter in den beiden Systemen – der eine im bewegten, der andere im ruhenden – führt die Frage, welche Uhr schneller und welche langsamer läuft, zu entgegengesetzten Antworten. Aussagen über die Zeit hängen also vom Bezugssystem ab und sind damit offensichtlich relativ. Eine absolute Zeit, die in allen Systemen gleichermaßen gilt, gibt es also nicht.

Gegen dieses Beispiel können häufige Bahnfahrer sofort ihre eigenen Erfahrungen einbringen, die klar gegen die geschilderten Phänomene mit den Uhren sprechen. Wir wollen diese Beobachtungen nicht bestreiten. Trotz aller Alltagserfahrung gibt es diese Phänomene, nur haben wir ihre Größe maßlos übertrieben. Sie wurden experimentell nachgewiesen, allerdings mit äußerst empfindlichen Uhren.

Bevor wir diese Experimente vorstellen, wollen wir an einem Gedankenexperiment mit zwei "Lichtuhren" erklären, was mit der Zeitanzeige passiert, wenn sich zwei Uhren relativ zueinander bewegen. Die Lichtuhr kann man mit einer Pendeluhr vergleichen, bei der das Pendelgewicht an einer Feder hängt und von unten nach oben schwingt. In der Lichtuhr ist das auf- und abschwingende Pendelgewicht durch einen Lichtimpuls ersetzt. Eine Lichtuhr besteht aus zwei Spiegeln, die im Abstand L parallel übereinander angeordnet sind (also nicht in Fahrtrichtung des Zuges, das wird später wichtig). Von einer im unteren Spiegel eingebauten Lampe wird ein Lichtblitz ausgesandt, der am oberen Spiegel reflektiert wird und zum unteren Spiegel

zurückkehrt, von wo er dann wieder nach oben reflektiert wird usw.. Immer, wenn das Licht am unteren Spiegel reflektiert wird, "tickt" die Uhr. Es ist dann genau eine Zeiteinheit T , nämlich $T = 2L/c$, vergangen.

Die Bahnhofsuhr und die Uhr der Schaffnerin im Zug seien beide genau nach diesem Prinzip gebaut, und zwar mit demselben Abstand L der beiden Spiegel. Die Lichtuhr im

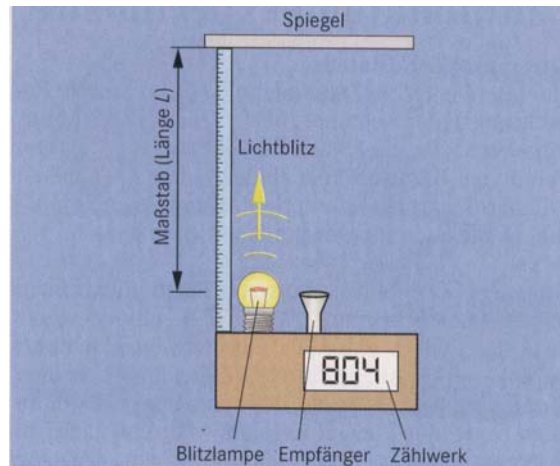


Abb. 3.1: Schema einer Lichtuhr

Zug tickt gleichmäßig in konstanten Abständen T , unabhängig, ob der Zug steht oder sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Für die Schaffnerin ist diese Zeit ihre **Eigenzeit**. Auch die Bahnhofsuhr tickt im gleichen Rhythmus; solange der Zug steht, laufen beide Uhren synchron. Anders ist die Situation, wenn der Zug sich bewegt. Dann

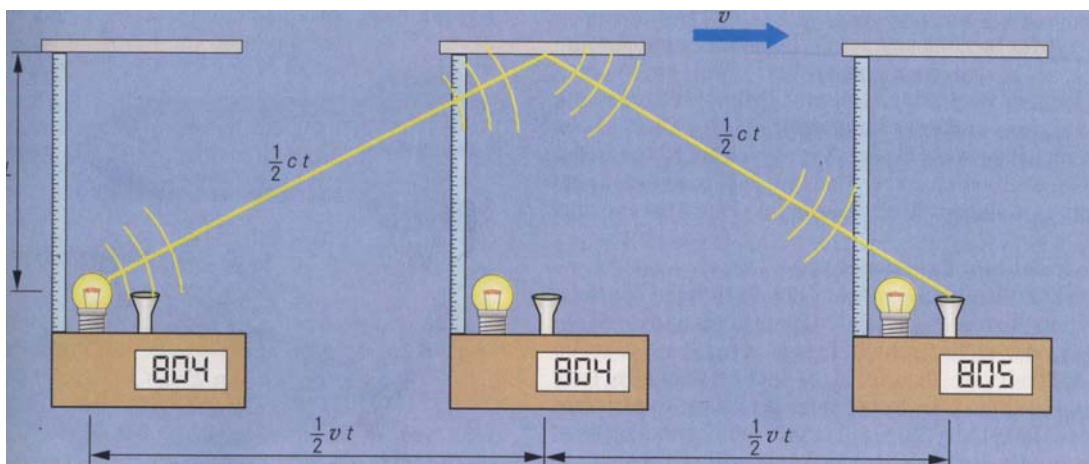


Abb. 3.2: Strahlengang in einer bewegten Lichtuhr, vom ruhenden Beobachter aus gesehen

sieht der Stationsvorsteher, dass die Lichtuhr im Zug mit ihren beiden Spiegeln sich mit der Zuggeschwindigkeit v bewegt, so dass für ihn der Lichtstrahl "schräg" läuft. (siehe Abb. 3.2). Für den Stationsvorsteher legt der Strahl in der Lichtuhr im Zug zwischen zwei ihrer Tickimpulse eine längere Strecke zurück, nämlich $2 L'$ mit

$$L' = \sqrt{L^2 + (0,5 \cdot v \cdot T)^2} > L$$

zurück. Für den Stationsvorsteher vergeht auf seiner Uhr die Zeit $T' = 2 \cdot L/c > T$, bis das Licht in der Uhr im fahrenden Zug wieder unten angekommen ist. Zwischen den beiden Zeitintervallen besteht folgender Zusammenhang:

$$T' = \frac{T}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} > T$$

Der Stationsvorsteher stellt z.B. fest, dass, wenn auf der Uhr im Zug 5 Minuten vergangen sind, auf seiner gleich gebauten Uhr schon 10 Minuten vergangen sind. Für ihn ist also die Zeit für die Vorgänge im Zug verlängert (dilatiert).

Übrigens, wenn die Schaffnerin die Bahnhofsuhr ansieht, die sich relativ zu ihr mit der Geschwindigkeit $-v$, d.h. mit der gleichen Geschwindigkeit, jedoch in die entgegengesetzte Richtung bewegt, kann sie dasselbe Argument von oben durchspielen mit $-v$ anstelle von v . Da in dem Ausdruck für L' nur v^2 vorkommt, spielt das Vorzeichen keine Rolle. **Schaffnerin und Stationsvorsteher kommen zu genau entgegengesetzten Schlüssen.** Die Schaffnerin findet, dass ihre Uhr im Zug schneller läuft als die im Bahnhof, der Stationsvorsteher findet, dass die Bahnhofsuhr schneller läuft als die Uhr im fahrenden Zug. Und beide haben Recht. Das bedeutet: die Zeit ist eine relative Größe. Eine Aussage über die Zeit ist nicht absolut, gilt also nicht für alle gleich, sondern hängt davon ab, in welchem System sich der jeweilige Beobachter befindet. Das ist mit dem Wort "Relativität" in der Bezeichnung Relativitätstheorie gemeint.

Während vor Einstein die Zeit als absolut, d.h. unabhängig von der Bewegung des Beobachters angenommen wurde, ist heute die einzig absolute Größe die Lichtgeschwindigkeit. Das widerspricht der täglichen Erfahrung, ist aber durch die Experimente, die im nächsten Abschnitt besprochen werden, belegt.

3.3 Nachweis der Zeitdilatation

Wir haben bereits oben festgestellt, dass der Effekt der Zeitdilatation so klein ist, dass ihn ein Reisender in der Bahn mit seiner Armbanduhr nicht beobachten kann. Zu seinem Nachweis sind äußerst empfindliche Geräte notwendig. Der Effekt fällt deshalb so winzig aus, da die üblichen Zuggeschwindigkeiten von 10 bis 100 **m/s** sehr, sehr klein sind verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit von $c = 300\,000$ **km/s**. Der erwartete Effekt ist somit von der Größenordnung $(v/c)^2 \approx 10^{-14}$, so dass zu seinem Nachweis sehr genau gehende Uhren benötigt werden..

Als solche verfügbar waren, nahmen Haefele und Keating zwei gleichartig gebaute Atomuhren, luden sie in zwei Linienflugzeuge, die mit Zwischenstops in entgegen-gesetzter Richtung die Erde umflogen. Für die eine Uhr addierte sich die Flugzeuggeschwindigkeit zu der Erdumdrehung, für die andere subtrahierten sich beide Geschwindigkeiten. Bei der Ankunft verglich man beide Uhren und siehe, eine Uhr war um (332 ± 30) Nanosekunden (ns) langsamer gelaufen. Die Vorhersage der Relativitätstheorie war (315 ± 40) ns. Die Unsicherheit in der Voraussage erklärt sich



Abb. 3.3: Verschieden schnell gealterte Zwillinge

dadurch, dass in die Berechnung die Flugdaten, die jeweiligen Höhen und Geschwindigkeiten der Flugzeuge eingehen. Den Trick mit den zwei Flugzeugen, die in verschiedene Richtungen flogen, wandte man an, damit sich einige Effekte, für die man sich nicht interessierte, herausfielen.

Das Phänomen der Zeitdilatation, das mit Hilfe der beiden Uhren bestätigt wurde, wird oft in der Form des **Zwillingsparadoxon** diskutiert. In diesem viel eindrucksvolleren Beispiel (das sich aber bisher noch nicht verwirklichen ließ) setzt man anstelle der beiden Uhren ein menschliches Zwillingpaar. Die Zwillinge verabschieden sich vor einer großen Reise. Einer der Zwillinge steigt in eine Rakete, die in den Weltraum abfliegt und auf ihrer Reise fast mit Lichtgeschwindigkeit fliegt, der andere bleibt zurück. Als die Rakete nach vielen Jahren zur Erde zurückkehrt, stellt man folgendes fest: Der auf der Erde zurückgebliebene Zwilling ist kräftig gealtert, während der aus der Rakete steigende kaum älter geworden ist. Das ist unglaublich, dennoch müsste es wohl so sein, denn das Experiment ist ganz ähnlich wie das von den beiden Uhren in den Flugzeugen, bei denen man auch eine auf dem Flugplatz hätte zurücklassen können.

Es soll abschließend ein weiteres Phänomen angesprochen werden, das man auf der Erde nachweisen kann und das sich nur auf Grund der relativistischen Zeitdilatation verstehen lässt: Am oberen Rand der Erdatmosphäre, in etwa 30 km Höhe, werden andauernd durch die Strahlung, die aus dem Weltall einfällt, Müonen erzeugt. Das sind Teilchen, die mit einer Halbwertszeit von $1,5 \mu\text{s}$, zerfallen. Selbst, wenn diese Teilchen sich mit Lichtgeschwindigkeit auf die Erdoberfläche zu bewegen würden, könnten sie höchstens eine Strecke von 450 m zurücklegen, ehe sie zerfallen. Man sollte sie also auf der Erde nicht nachweisen können. Aber man tut es. Warum können diese Müonen so weit fliegen? Von uns als Beobachter aus gesehen geht die "innere Uhr" in den fliegenden Teilchen so langsam, dass sie in der Tat die Erde erreichen können, ehe sie zerfallen.

Eine Nebenbemerkung: Das Müon selbst "merkt" natürlich nicht, dass seine innere Uhr langsamer läuft, wenn es fast mit Lichtgeschwindigkeit fliegt. Da es "weiß", dass es selbst höchstens mit Lichtgeschwindigkeit fliegen kann, ist es für das Müon "unvorstellbar", dass es weiter als 450 m fliegt. Dennoch legt es ja 30 km zurück. Wir müssen schließen, dass die 30 km dem Müon nur wie 450 m "erscheinen". Für das sich sehr schnell bewegende Müon ist also die zurückgelegte Strecke stark verkürzt bzw. kontrahiert. Diese sog. Längenkontraktion ist das analoge Phänomen zur Zeitdilatation. In der Relativitätstheorie verändern sich also **Zeit und Raum**.

Wenn sich Objekte mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen könnten, würden wir sie auf Grund der endlichen Lichtgeschwindigkeit merkwürdig verzerrt wahrnehmen. Abbildung 3.4 zeigt die mit einem Computer erzeugten Bilder eines Rades in verschiedenen Bewegungszuständen. Man wird dabei an Dalis Bild "Die zerrinnende Zeit" bzw. "Die weichen Uhren" erinnert, das von den Erkenntnissen der Relativitätstheorie inspiriert sein soll (siehe Abb. 3.5).

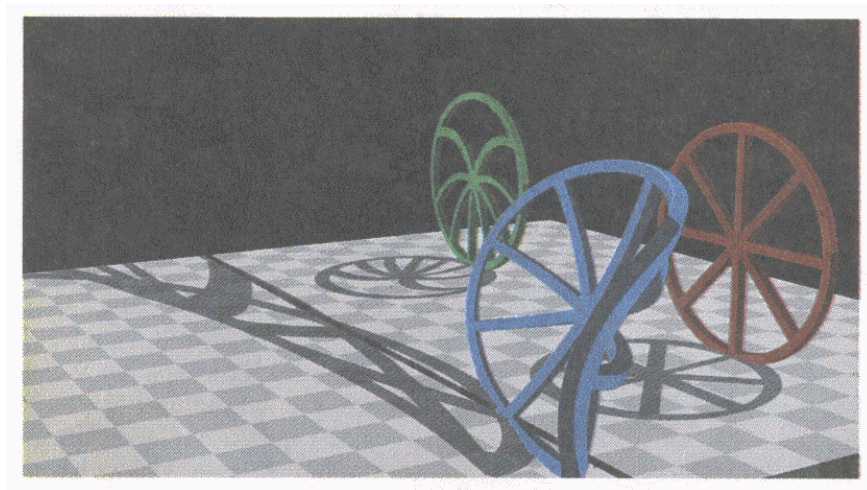


Abb. 3.4: Mit verschiedenen Geschwindigkeiten rotierende Räder. Das rechte Rad ruht; das linke rotiert um seine Nabe und das vordere wie eine aufrecht kreisende Münze mit Geschwindigkeiten in der Nähe von c . Wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit entspricht das von uns wahrgenommene Bild der verschieden weit entfernten Speichen ihrer Stellung zu verschiedenen Zeitpunkten.



Abb. 3.5: Das Bild „Die zerrinnende Zeit“ von Salvador Dalí. Es heißt, dass Dalí zu diesem Bild durch Einsteins Ideen zur Speziellen Relativitätstheorie angeregt wurde.

3.4 Lichtgeschwindigkeit als Grenzggeschwindigkeit, relativistische Massenzunahme

Da Licht sich in allen Systemen immer mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitet, können wir es nicht auf Überlichtgeschwindigkeit bringen. Einen Wagen hingegen können wir durch Schieben, also indem wir eine Kraft auf ihn ausüben, kontinuierlich beschleunigen, wobei die Beschleunigung $a = F/m$ (Kraft durch Masse) ist. Auch wenn es lange dauern würde und wir viel Kraft aufwenden müssten, sollten wir also nach den Gesetzen der klassischen Physik einen Wagen auf eine Geschwindigkeit bringen können, die größer als die des Lichtes ist. Die Relativitätstheorie sagt dazu nein. Was ist nun – nach der Relativitätstheorie – falsch an dem klassischen Ansatz? Es ist die Konstanz der Masse, die wir stillschweigend vorausgesetzt haben und die in der Relativitätstheorie nicht mehr gilt. Stattdessen fordert die Relativitätstheorie eine Massenzunahme mit der Geschwindigkeit: Je schneller ein Objekt sich bewegt, desto größer wird seine Masse, und je größer die Masse, desto schwieriger ist es, dieses Objekt weiter zu beschleunigen.

Für die relativistische Abhängigkeit der Masse m' von der Ruhemasse m und der Geschwindigkeit v hat Einstein folgende Formel abgeleitet:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} > m$$

Hat man z.B. einen Kinderwagen auf eine Geschwindigkeit gebracht, die nur um ein Zehntausendstel Prozent unterhalb der Lichtgeschwindigkeit liegt, dann ist die Masse des Kinderwagens schon auf die eines Möbelwagens angestiegen. Und da muss man natürlich ganz schön viel Kraft aufwenden, um diesen weiter zu beschleunigen. In der Tat verhindert die relativistische Massenzunahme, dass ein Teilchen mit einer endlichen Ruhemasse je auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden kann. Dieses Gesetz ist sehr genau in Beschleunigerexperimenten zur Kern- und Hochenergiephysik nachgeprüft worden. Die Lichtgeschwindigkeit ist die nie erreichte obere Grenzggeschwindigkeit für alle Teilchen mit endlicher Ruhemasse. Nur Teilchen mit der Ruhemasse Null, wie das "Lichtteilchen", das sog. Photon, fliegen immer mit Lichtgeschwindigkeit, niemals schneller und niemals langsamer. Nach unserem heutigen Wissen haben nur das Photon und vermutlich das Graviton, das aber noch nicht nachgewiesen ist, die Ruhemasse Null. Aus diesem Grunde spielt das Licht eine solch ausgezeichnete Rolle in der ganzen Diskussion der Relativitätstheorie.

3.5 Das Wesentliche der Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie ist ein revolutionärer Schritt in der Entwicklung der Physik, ein sogenannter Paradigmenwechsel. Aber nach den Gedankenexperimenten mit Uhren und Lichtsignalen in fahrenden Zügen und den verschiedenen Beobachtern auf dem Bahnsteig und im Zug, hat mancher vielleicht doch noch nicht verstanden, warum die Relativitätstheorie ein solcher Durchbruch ist. Wir wollen deshalb hier die wichtigsten Ideen noch einmal zusammenfassen:

1. Zu der Jahrhunderte dauernden Diskussion in Philosophie und Dichtung über Raum und Zeit fügt Einstein einen neuen Aspekt hinzu: die physikalische Zeit und den physikalischen Raum. Beide werden durch Messungen definiert: Zeit ist, was die Uhr anzeigt, und Länge, was mit dem Maßstab gemessen wird. Wenn man die

Eigenschaften der physikalischen Größen Zeit und Raum studieren will, muss man also das Verhalten von Uhren und Maßstäben untersuchen.

2. Einstein erkannte die zentrale und besondere Rolle des Lichtes für die Zeit- und Längenmessung. Da das Licht in allen Systemen die gleiche Geschwindigkeit hat, eignet es sich vorzüglich zum Bau von Uhren und Maßstäben. Ein Beispiel ist das Lichtpendel oder die Lichtuhr, in der das Licht zwischen zwei parallelen Spiegeln hin und herläuft. Ein Lichtmaßstab wäre eine Anordnung, bei der man mit einer Uhr misst, wie lange ein Lichtstrahl eine vorgegebene Strecke durchläuft.
3. Durch die Untersuchung des Verhaltens solcher Uhren und Maßstäbe, die sich in zueinander bewegten Systemen befinden, wurden die paradox erscheinenden Phänomene der Zeitdilatation und Längenkontraktion abgeleitet. Prominentestes Beispiel ist das Zwillingsparadoxon: Ein Astronaut in einer schnell fliegenden Rakete altert langsamer als sein Zwillingsbruder auf der Erde. Zeit ist also "relativ". Mit präzisen Uhren in Flugzeugen und mit sehr schnell bewegten Teilchen hat man diese Voraussagen bestätigt.
4. Da die Geschwindigkeiten, mit denen wir es im täglichen Leben zu tun haben, sehr klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit sind, müssen wir nicht die Relativitätstheorie kennen, um uns in der täglichen Raum-Zeit zurecht zu finden.
5. Einstein wird manchmal als Zeuge dafür angerufen, dass alles "relativ" , also beliebig sei. Das ist falsch, denn bei der physikalischen Raum-Zeit ist alles genau festgelegt. Das Wort "relativ" bezieht sich auf Beobachter, die sich in verschiedenen, relativ zu einander bewegten Systemen befinden.

3.6 Biographie: Albert Einstein (1879 –1955)

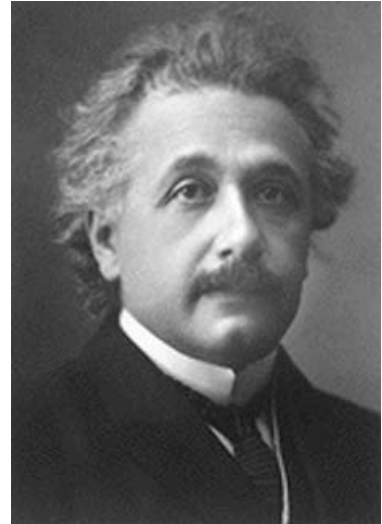
Einstein charakterisiert sich selbst wie folgt:

"Mein leidenschaftliches Interesse an sozialer Gerechtigkeit und an gesellschaftlicher Verantwortung steht in kuriosem Gegensatz zu einem ausgeprägten Mangel an Verlangen für eine enge Beziehung mit Menschen und Frauen. Ich bin ein Pferd für einen Einspanner, gar nicht geeignet für Tandem- oder Teamarbeit. Ich habe nie mit vollem Herzen zu irgendeinem Land oder Staat, zu meinem Freundeskreis oder nicht einmal zu meiner eigenen Familie gehört. Die Bande waren immer von einer trüben Zurückhaltung begleitet, und das Verlangen, mich in mich ganz zurückzuziehen, wuchs allmählich mit den Jahren."

Einstein wurde 1879 in Ulm als Sohn jüdischer Eltern geboren; sein Vater war ein nicht allzu erfolgreicher Kaufmann und Unternehmer. Als Albert nur 6 Wochen alt war, zog die Familie nach München, wo Einstein später das Luitpold-Gymnasium besuchte. Als die Firma des Vaters nach Italien verlegt wurde, folgte er 1895 seinen Eltern ohne einen Schulabschluss. Da er jedoch kein Italienisch konnte, war ein Abitur in Italien Utopie, so dass sich Einstein entschloss, den Zugang zum Züricher Polytechnikum – der heutigen ETH – durch eine Aufnahmeprüfung zu erwerben. Da er diese Prüfung nicht bestand, ging er auf die Kantonsschule in Aarau und schaffte dort 1896 die Matura als bester der 9 Kandidaten.

Im gleichen Jahr gab er die deutsche oder besser württembergische Staatsbürgerschaft auf und war für einige Jahre staatenlos. Wollte er auf diese Weise dem Wehrdienst entgehen?

Während des Studiums konzentrierte er sich auf die Physik, während er die mathematischen Vorlesungen nicht regelmäßig besuchte. Nach seinem Examen, dem Diplomabschluss für das Lehramt in Mathematik und Physik, im Jahre 1900 hoffte er, eine Stellung als wissenschaftlicher Assistent in Zürich oder an einer anderen Universität zu bekommen. Obwohl sein Examen nicht schlecht ausgefallen war – 4,91 von 6 möglichen Punkten – waren alle Versuche erfolglos, so dass er sich für kürzere Zeit als Lehrer an einem Technikum in Winterthur und an einer Privatschule in Schaffhausen über Wasser hielt.



Im Jahre 1901 wurde Albert Einstein Schweizer Staatsbürger und blieb es bis zu seinem Lebensende. Vom Militärdienst wurde er aus gesundheitlichen Gründen (u.a. wegen seiner Plattfüße) befreit.

Auf die Fürsprache durch den Vater seines Freundes Grossmann erhielt er 1902 eine Anstellung im Amt für geistiges Eigentum (Patentamt) in Bern. Dort war er bis 1909 als technischer Experte tätig, zunächst als Experte 3. Klasse mit einem Zeitvertrag, ab 1904 in Dauerstellung. Die Arbeit im Patentamt, die Einstein souverän erledigte, war sein Brotberuf, den er in einem Brief an einen Freund folgendermaßen beschrieb: *"Ich bin hier ein wehrwürdiger eidgenössischer Tintenscheißer mit einem ordentlichen Gehalt."* Das Geld brauchte er allerdings auch, denn 1902 bekam seine Lebensgefährtin Mileva Maric, die er ein Jahr später heiratete, ihr erstes Kind. Die Tochter Liesl wurde – aus welchen Gründen ist unbekannt – zur Adoption freigegeben und ist nie wieder aufgetaucht. Zwei Jahre später wurde Hans Albert (1904 – 1973, Professor der Hydraulik in Berkeley) geboren und 1910 der später schizophrene Eduard (1910 – 1965). Die Ehe mit Mileva wurde 1919 geschieden, kurze Zeit darauf heiratete Einstein seine Cousine Elsa Löwenthal.

1905 war Einsteins Wunderjahr, sein Annus mirabilis. Er veröffentlichte in der anerkannten Fachzeitschrift "Annalen der Physik" gleich 5 wesentliche Arbeiten, die unter den Physikern einiges Aufsehen verursachten:

17. März: Die Lichtquantenhypothese

30. April: Dissertation: Über eine neue Methode, Molekülgrößen zu messen

11. Mai: Arbeit zur Brownschen Bewegung

30. Juni: "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", worin er die Spezielle Relativitätstheorie entwickelte.

27. Sept: Zur Äquivalenz von Masse und Energie.

Anfang 1906 erhielt er sein Doktordiplom von der Universität Zürich und wurde bald darauf zum technischen Experten 2. Klasse befördert. 1907 war er bei den theoretischen Physikern kein Unbekannter mehr, obwohl er bis dahin an keinem Kongress teilgenommen hatte und ihn kaum einer der gestandenen Kollegen persönlich kannte.

Zu dieser Zeit gingen Einsteins Gedanken bereits weiter, zu einem neuen Konzept der Schwerkraft. Der entscheidende Gedanke kam ihm im Herbst 1907: *"Ich saß auf meinem Stuhl im Patentamt in Bern. Plötzlich hatte ich einen Einfall: Wenn sich eine*

Person im freien Fall befindet, wird sie ihr eigenes Gewicht nicht spüren. Ich war verblüfft. Dieses einfache Gedankenexperiment machte auf mich einen tiefen Eindruck. Es führte mich zu einer Theorie der Gravitation." Doch es mussten noch 8 Jahre vergehen, bevor er nach zahlreichen Fehlversuchen am Ziel angekommen war.

Trotz seiner herausragenden Leistungen schlug sein erster Habilitationsversuch im Jahre 1907 an der Universität Bern fehl. Erst eine neue Habilitationsschrift mit dem Titel "Konsequenzen für die Zusammensetzung von Strahlung, die aus dem Gesetz der Energieverteilung für schwarze Körper folgen" brachte ihm dann im Februar 1908 die *venia legendi*. Anderthalb Jahre später wurde er außerordentlicher Professor an der Universität Zürich und gab seine Stellung am Patentamt und seine Dozentur in Bern auf. In dieser Zeit war Einstein zum führenden wissenschaftlichen Denker aufgestiegen. 1911 ging er als Ordinarius an die Karl-Ferdinand-Universität nach Prag und ein Jahr später nahm er einen Ruf an die ETH Zürich an. In der Lehrtätigkeit an der Universität sah er damals nicht seine Hauptaufgabe, denn sie nahm ihm die Zeit, die er lieber bei der Erstellung der Gravitationstheorie verbracht hätte. Dennoch war er damals schon so weit, dass er erstmals experimentell prüfbare Voraussagen über die Ablenkung des Sternlichts beim Vorbeigang am Sonnenrand machen konnte.

1914 kam Albert Einstein zurück nach Deutschland, bewarb sich jedoch nicht wieder um die deutsche Staatsbürgerschaft. Er hatte ein sehr verlockendes Angebot erhalten, das er nicht ausschlug: Er wurde Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften und Professor ohne Lehrverpflichtungen an der Universität Berlin. Damit konnte er sich ganz seiner Forschungstätigkeit widmen und bereits gegen Ende des folgenden Jahres am 25.11.1915 den Schlussstrich unter die Allgemeine Relativitätstheorie ziehen. Bis dahin war es kein einfacher und geradliniger Weg gewesen und Einstein hatte erkennen müssen, dass seine Mathematikkenntnisse für dieses schwierige Feld oft nicht ausreichten und er die Hilfe seiner Freunde in Anspruch nehmen musste.

Damit endete seine Zeit, in der er Geniales geschaffen hat, was Max Planck einmal als kopernikanische Tat bezeichnete. Die Beobachtung der vorausgesagten Lichtablenkung im Feld der Sonne durch eine britische Expedition bei einer totalen Sonnenfinsternis im Jahre 1919 machte Einstein mit einem Schlage weltberühmt. Die Londoner Times titelte am 7.11.1919: "Revolution in Science – New theory of the Universe – Newtonian ideas overthrown".

Doch die Freude wurde schon bald getrübt durch die ersten antisemitischen Anwürfe im Jahre 1920, an denen u.a. Philip Lenard beteiligt war. In der Folgezeit unternahm Einstein mehrere längere Auslandsreisen, u.a. seine erste Reise in die USA, wo er Gelder für die neu zu gründende Hebräische Universität in Jerusalem sammeln wollte. Als er im Dezember 1922 den Nobelpreis für Physik des Jahres 1921 "für seine Beiträge zur theoretischen Physik und speziell für die Entdeckung des Gesetzes zum photoelektrischen Effekt" entgegennehmen sollte, hielt er sich gerade in Kioto in Japan auf. Nach dem Protokoll nimmt bei Verhinderung eines Laureaten der Botschafter seines Landes den Preis entgegen. Doch wessen Staatsbürger war er? Dies war eine nicht einfach zu beantwortende Frage, die einer längeren juristischen Klärung bedurfte. Auf jeden Fall wurde Einstein durch den deutschen und nicht den schweizer Botschafter vertreten. Er war durch seinen Eintritt in die preußische Akademie automatisch preußischer Staatsbürger geworden, da er nicht ausdrücklich schriftlich

darauf verzichtet hatte. So besaß er bis zum Jahre 1933 zwei Staatsangehörigkeiten, die deutsche und die schweizerische.

Einsteins erste Arbeit zur einheitlichen Feldtheorie erschien im Jahre 1922. Dieses Thema, bei dem ihm nie ein wirklicher Durchbruch gelang, ließ ihn bis zu seinem Lebensende nicht mehr los. Mit der Quantentheorie, über die er ab 1927 mit Bohr viele Diskussionen führte, konnte er sich nie wirklich anfreunden, so dass er in seinen späteren Jahren über den Status eines kritischen Begleiters nicht hinauskam.

Nach der Machtergreifung der Nationalsozialisten gab Einstein seine Mitgliedschaft in der Berliner Akademie auf, händigte der deutschen Botschaft in Brüssel seinen Pass aus und kehrte nie wieder nach Deutschland zurück. Seine neue Heimat wurden die USA, im besonderen das Institute for Advanced Studies in Princeton.

1939 unterschrieb Einstein den von Szilard entworfenen Brief an Roosevelt über die Möglichkeit einer Atombombe. Die Bombe wurde gebaut; Einstein, der 1940 die amerikanische Staatsbürgerschaft erhalten hatte, wurde nicht daran beteiligt, da er u.a. auf Grund seines teilweise kommunistischen Freundeskreises ein Sicherheitsrisiko bedeutete.

1952 erhielt Einstein eine Anfrage von Ben Gurion, ob er die Nachfolge von Chaim Weizmann als Präsident des Staates Israel antreten würde. Obwohl dies eine große Ehre war, lehnte Einstein ab.

Wenige Tage vor seinem Tod unterzeichnete er das Russel Manifest für totale nukleare Abrüstung und arbeitete bis zuletzt an der einheitlichen Feldtheorie. Er starb am 18.04.1955 im Alter von 76 Jahren. Sein Leichnam wurde verbrannt und die Asche an einem unbekanntem Ort verstreut. Sein wissenschaftlicher Nachlass ging an die Hebräische Universität in Jerusalem.

Weitere Aspekte:

Politik: Er war überzeugter Pazifist und allem Nationalen abhold, vertrat einen humanen Sozialismus und äußerte seine Meinung Zeit seines Lebens (vom 1. Weltkrieg bis zum Russel Manifest kurz vor seinem Tod) öffentlich.

Judentum: Einsteins Gott war eher der von Spinoza, ein Gott, der sich in der Weltordnung offenbart, aber nicht der personifizierte Gott des Judentums, auch wenn Einstein ihn oft persönlich ansprach ("Gott würfelt nicht."). Einsteins Beziehung zum Judentum war eher geistig-kulturell, er wurde sich seines Judentums besonders durch die antisemitischen Angriffe seit 1914 immer stärker bewusst und bekannte sich dazu, er war jedoch kein überzeugter Zionist. Er unterstützte die Gründung der Hebräischen Universität, der er auch seinen Nachlass vermachte.