

8 Spezielle Relativitätstheorie

Im Jahr 1905 veröffentlichte Albert Einstein seine berühmte spezielle Relativitätstheorie, in der er die Kenntnisse über die Struktur von Raum und Zeit revolutionierte. Elf Jahre später folgte 1916 die allgemeine Relativitätstheorie, die sich mit dem Wesen der Gravitation befasst.



[42] Mileva Maric und Albert Einstein

Auf dem obigen Foto ist Einstein mit seiner ersten Frau Mileva Maric abgebildet, die ebenfalls eine brillante Physikerin und Mathematikerin war. Es ist bis heute umstritten, welchen Anteil sie an der Herleitung der Relativitätstheorie hatte.

Auch wenn sich bis heute der Name Relativitätstheorie gehalten hat, so darf dies nicht zu dem Trugschluss führen, dass es sich bei Einsteins Ideen um reine Spekulation handelt. So gehört die Relativitätstheorie zu den am besten überprüften Theorien in der Physik, gerade weil sie für die Physik so revolutionär war. Zahlreiche Experimente beweisen mittlerweile, dass Einsteins Überlegungen richtig sind. So würden zum Beispiel moderne Navigationssysteme ohne die Gesetzmäßigkeiten der Relativitätstheorie nicht funktionieren.

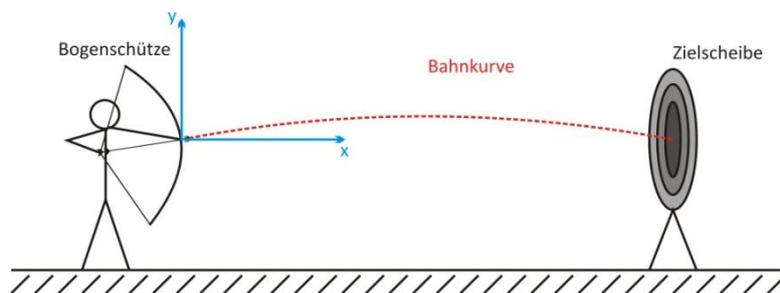
In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie näher erläutert. Auf die allgemeine Relativitätstheorie wird aufgrund ihrer Komplexität hier nicht eingegangen. Für ein Verständnis der Relativitätstheorie sind grundlegende Begriffe und Prinzipien erforderlich, die nun zu Beginn erklärt werden.

8.1 Bezugssysteme

Zur Beschreibung von Ereignissen in der Physik, wie zum Beispiel der Bewegung von Körpern in der Mechanik, ist es notwendig ein sog. Bezugssystem einzuführen. Ein Bezugssystem besteht einerseits aus einem Koordinatensystem, relativ zu dem die Bewegungen der betrachteten Körper beschrieben werden und andererseits über ein System von Uhren mit denen die Zeitpunkte von bestimmten Ereignissen bestimmt werden können.

Bezugssystem = Koordinatensystem (räumliche Messung) + Uhr (zeitliche Messung)

Möchte man beispielsweise den Schuss mit einem Bogen durch Bewegungsgleichungen beschreiben, so muss zunächst ein geeignetes zwei- oder dreidimensionales Koordinatensystem gewählt werden. Es bietet sich dabei oft an, den Nullpunkt des Koordinatensystems in den Anfangspunkt der Bewegung zu legen. Zusätzlich wird der Pfeil gedanklich auf einen Massepunkt reduziert. Hierdurch werden die Bewegungsgleichungen stark vereinfacht. Die Zeit, die der Pfeil benötigt um die Zielscheibe zu treffen wird mit einer genauen Stoppuhr gemessen.



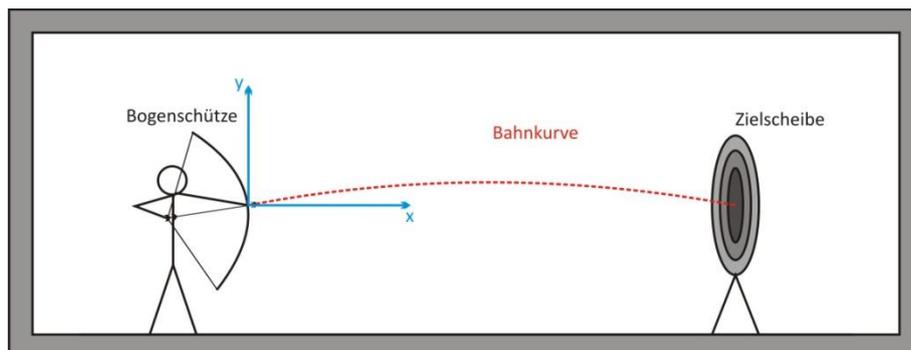
Für den parabelförmigen Flug eines Pfeils gelten die aus der Mechanik bekannten Gleichungen:

$$s_x(t) = v_{0x} \cdot t \quad \text{und} \quad s_y(t) = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

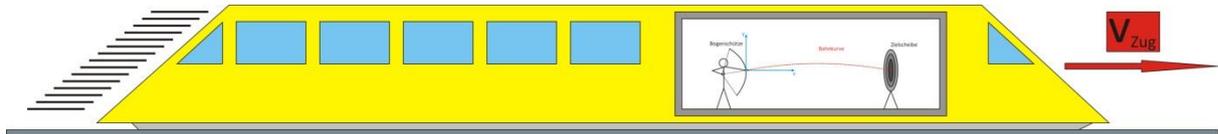
Dabei sind v_{0x} und v_{0y} die Anfangsgeschwindigkeiten des Pfeils in x- bzw. y-Richtung. Da sich das Bezugssystem (Koordinatensystem & Uhr) in diesem Beispiel nicht bewegt, spricht man hier von einem sog. Ruhsystem bzw. einem Laborsystem.

Eine der grundlegendsten Überlegungen von Albert Einstein basiert nun auf einem kleinen Gedankenexperiment zu Bezugssystemen:

„Der Bogenschütze wird in diesem Gedankenexperiment auf dem Übungsplatz mit einem Narkosemittel betäubt. Als er das Bewusstsein wiedererlangt befindet er sich in einem sehr großen länglichen rechteckigen Raum ohne jegliche Fenster. In diesem Raum befindet sich nichts außer seinem Bogen, ein paar Pfeilen und einer Zielscheibe.



Auf einem Zettel wird ihm mitgeteilt, dass er nur aus diesem Raum freigelassen wird, wenn er mit den Pfeilen ins Schwarze trifft. Etwas verwirrt nimmt der Bogenschütze die Herausforderung an und trifft tatsächlich ohne große Schwierigkeiten ins Schwarze. Dabei bemerkt er keinerlei Unterschied zu den Bogenschüssen auf dem Übungsplatz. Als schließlich der dritte Pfeil ins Schwarze trifft, öffnet sich eine Luke und der Bogenschütze wird befreit. Erstaunt muss er feststellen, dass er sich die ganze Zeit über in einem schalldicht isolierten Container auf einem völlig vibrationsfrei, mit gleich bleibender Geschwindigkeit fahrenden Zug befindet (Transrapid-Technik ☺)...



Auch wenn dieses Gedankenexperiment etwas konstruiert erscheint, zeigt es doch einen ganz wesentlichen physikalischen Zusammenhang. Für den Bogenschützen im Zug spielt es keine Rolle, ob der Zug still steht oder sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Das Bezugssystem, in dem er seinen Pfeil abgeschossen hat, befand sich von seinem Standpunkt aus in Ruhe. Auch wenn dem Bogenschützen im Container beliebige physikalische Messgeräte zur Verfügung gestanden hätten, hätte er nicht herausfinden können, ob sich der Container bewegt oder ob sich dieser in Ruhe befindet. Ein derartiges Bezugssystem wird mit „Inertialsystem“ bezeichnet (lat. „iners“ – untätig, träge)

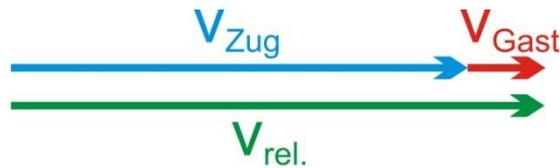
Hieraus ergibt sich Einsteins erstes Postulat:

„Es gibt kein physikalisch bevorzugtes Inertialsystem. Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen dieselbe Form an.“

8.2 Relativbewegungen

In einem mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Zug $v_{Zug} = const.$ bewege sich ein Fahrgast in Fahrtrichtung entlang des Gangs. Die Geschwindigkeit des Fahrgasts sei dabei ebenfalls näherungsweise konstant ($v_{Gast} = konst.$). Die Bewegung des Fahrgasts wird von der Geschwindigkeit des Zuges nicht beeinflusst, solange sich diese nicht ändert, der Zug also nicht bremst oder beschleunigt.

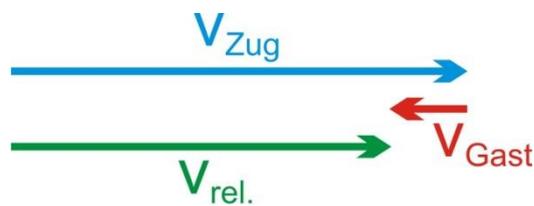
Ein im Zug sitzender Beobachter B_1 soll nun mit Hilfe einer genauen Stoppuhr die Geschwindigkeit des Fahrgastes bestimmen. Diese soll in diesem Beispiel $v_{Gast} = 5km/h$ betragen. Ein zweiter Beobachter B_2 steht neben dem Bahndamm und bestimmt sowohl die Geschwindigkeit des Zuges, als auch des Fahrgasts relativ zum Bahndamm. Die Geschwindigkeit des Zuges soll beispielsweise $v_{Zug} = 30km/h$ betragen.



Für Beobachter B_2 bewegt sich der Fahrgast dann relativ zum Bahndamm mit der resultierenden Geschwindigkeit $v_{Res} = 35\text{km/h}$, da sich die Geschwindigkeit von Fahrgast und Zug addieren:

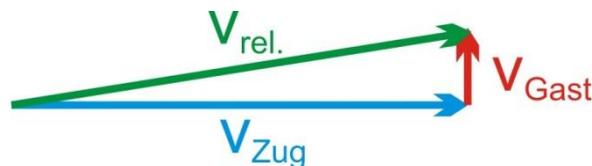
$$v_{rel.} = v_{Zug} + v_{Gast}$$

Bewegt sich der Fahrgast im Zug in die andere Richtung, also entgegen der Fahrtrichtung, so beträgt die Geschwindigkeit relativ zum Bahndamm $v_{Res} = 25\text{km/h}$, da die Geschwindigkeit des Fahrgastes von der des Zuges subtrahiert werden kann:



$$v_{rel.} = v_{Zug} - v_{Gast}$$

In einem dritten Fall bewegt sich der Fahrgast nun senkrecht zur Bewegungsrichtung des Zuges.



Die Relativgeschwindigkeit des Fahrgastes, die der Beobachter am Bahndamm bestimmt, kann in diesem Fall mit dem Satz des Pythagoras berechnet werden.

$$v_{rel.}^2 = v_{Zug}^2 + v_{Gast}^2$$

$$v_{rel.} = \sqrt{v_{Zug}^2 + v_{Gast}^2} = \sqrt{(30\text{km/h})^2 + (5\text{km/h})^2} \approx 30,4\text{km/h}$$

8.3 Lichtgeschwindigkeit

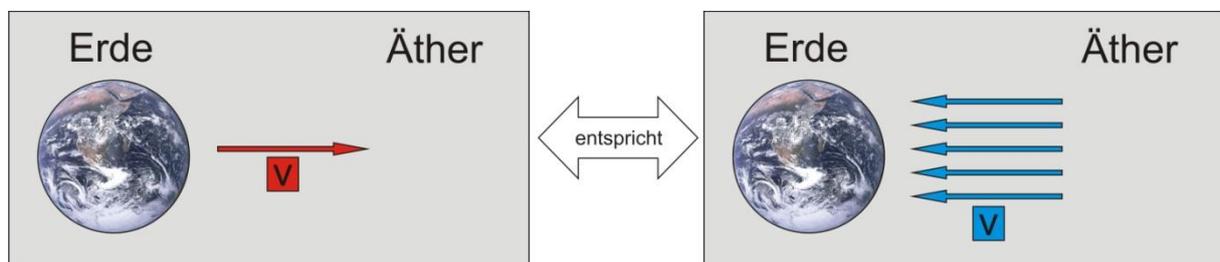
„Licht besitzt die Eigenschaft einer elektromagnetischen Welle.“

Diese Erkenntnis setzte sich gegen Ende des 19. Jahrhunderts in der Wissenschaft durch, nachdem durch Experimente in der Wellenoptik, wie dem Doppelspaltversuch, die Analogie zwischen Licht und mechanischen Wellen gezeigt werden konnte. Ein Problem dieser Modellvorstellung ist die Tatsache,

dass mechanische Wellen ein Medium (z.B. Wasser oder Luft) benötigen in dem sie sich ausbreiten können. Im Gegensatz dazu können sich Lichtwellen auch im Vakuum, also zum Beispiel im luftleeren Raum zwischen Sonne und Erde problemlos ausbreiten. Aus diesem Grund postulierten (forderten) viele Physiker zur damaligen Zeit die Existenz eines sog. „Äthers“, einer nicht stofflichen Substanz, die das gesamte Universum ausfüllen soll. Dieser Äther sollte das Medium sein, in dem sich die Lichtwellen auch im Vakuum ausbreiten.

8.3.1 Wiederlegung der Äthertheorie

Auf dem Weg um die Sonne bewegt sich die Erde mit der Bahngeschwindigkeit $v = 29,8\text{km/s}$. Nach der obigen Theorie fliegt die Erde dabei durch den Äther. In diesem Fall würde die Erde auf ihrer Bahn ständig von einem Ätherwind durchströmt. Diese Vorstellung ist vergleichbar mit dem Fahrtwind, den ein Autofahrer spürt, wenn er bei hohem Tempo die Hand aus dem Fenster hält. Dabei bewegt sich die Hand durch die Luft und die Finger werden vom Fahrtwind durchströmt.



Die linke Abbildung zeigt die Bewegung der Erde durch den Äther. Die rechte Abbildung zeigt den Ätherwind, der in Richtung Erde strömt. Im linken Bild befindet sich der Beobachter im Äther, wohingegen im rechten Bild sich der Beobachter auf der Erde befindet. Beide Bilder beschreiben denselben Vorgang von unterschiedlichen Beobachtungsstandorten aus betrachtet.

Die zwei Physiker Michelson und Morley versuchten 1887 in einem berühmten Experiment die Existenz des Äthers und den hieraus resultierenden Ätherwind nachzuweisen. Hierzu stellten sie folgende Überlegungen auf:

Wenn sich ein Lichtstrahl in Flugrichtung der Erde ausbreitet, muss auf ihn der Ätherwind wirken, der den Lichtstrahl um den Betrag der Bahngeschwindigkeit der Erde abbremst.

$$c_{rel.} = c - v$$

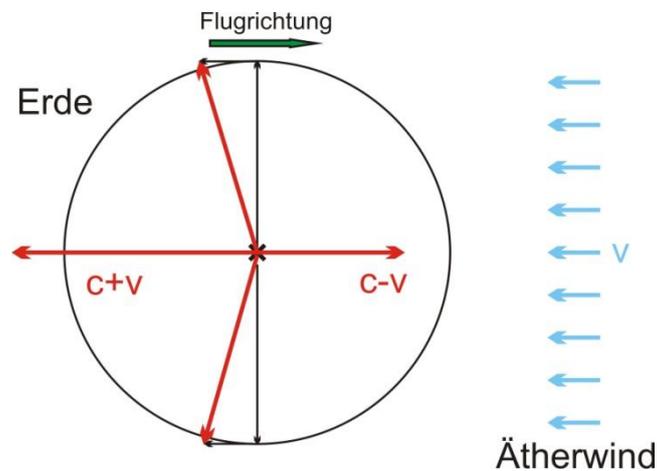
Ein Lichtstrahl entgegen der Flugrichtung der Erde bekommt gewissermaßen „Rückenwind“ und wird durch den Ätherwind beschleunigt.

$$c_{rel.} = c + v$$

Auch ein Lichtstrahl, der sich senkrecht zur Flugrichtung der Erde ausbreitet, muss nach den Vorüberlegungen der Relativbewegungen (Kapitel 8.2) seine Geschwindigkeit ändern.

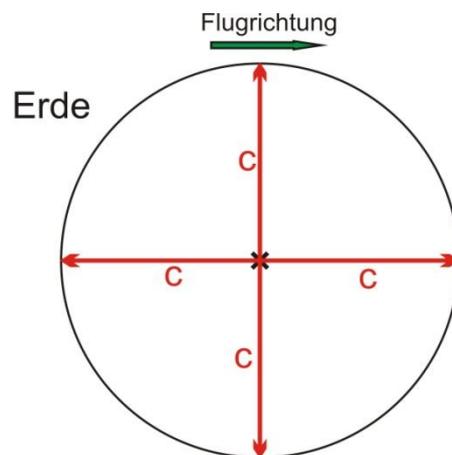
$$c_{rel.} = \sqrt{c^2 + v^2}$$

In der folgenden Abbildung sind die von Michelson und Morley vorausgesagten Unterschiede der Lichtgeschwindigkeit je nach Blickrichtung aufgetragen.



Das von Michelson und Morley entwickelte Experiment zeigt jedoch ein völlig anderes Ergebnis:

Die gemessene Lichtgeschwindigkeit war in alle Richtungen gleich groß. Auch mit steigender Messgenauigkeit zeigte sich kein Unterschied zwischen der Lichtgeschwindigkeit in Flugrichtung und der entgegen der Flugrichtung.



Das Experiment von Michelson und Morley widerlegt somit die Existenz eines Äthers in dem sich elektromagnetische Wellen ausbreiten.

Um die Tatsache zu erklären, dass sich Licht auch im Vakuum ausbreitet, musste deshalb eine neue Theorie entwickelt werden, die ohne einen Äther als Medium auskommt. Diese Theorie wird im Rahmen der Quantenmechanik im nächsten Kapitel erläutert. Auf weitere Ausführungen wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Anmerkung:

Das Michelson-Morley Experiment ist nicht der Beweis von Einsteins „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum“. Das Experiment widerlegt lediglich die Existenz eines Äthers als Medium für Lichtwellen. Dass die Lichtgeschwindigkeit im Experiment von Michelson und Morley ohne den

Ätherwind in alle Richtungen gleich groß sein muss, folgt direkt aus Einsteins erstem Postulat, nachdem es kein bevorzugtes Inertialsystem gibt. So könnte das Experiment auch in einem abgeschlossenen Raum auf einem Raumschiff mitten im Weltall durchgeführt werden und würde trotzdem das gleiche Ergebnis liefern.

8.3.2 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Physik im Wesentlichen durch die Ideen von zwei berühmten Physikern dominiert:

Auf der einen Seite lieferte Sir Isaac Newton im 17. Jahrhundert die Grundlage für die klassische Mechanik, mit der zum Beispiel die Bewegung von Himmelskörpern oder die Bewegung von Kanonenkugeln, etc. hinreichend genau beschrieben und vorausgesagt werden konnten. Nach den Prinzipien Newtons können Geschwindigkeiten, wie im Kapitel Relativbewegungen erklärt, addiert werden. Diese Geschwindigkeitsaddition sollte auch für die Lichtgeschwindigkeit möglich sein, sodass diese je nach Geschwindigkeit der Lichtquelle unterschiedliche Werte annehmen könnte. Ein experimenteller Nachweis hierfür konnte jedoch nicht erbracht werden.

Auf der anderen Seite entwickelte der schottische Physiker James Clerk Maxwell auf der Grundlage der Experimente des berühmten Naturforschers Michael Faraday im 19. Jahrhundert die Theorie des Elektromagnetismus. Maxwell legte damit die Grundlage für die heutige Informationsgesellschaft mit sämtlichen technischen Anwendungen im Bereich der Elektronik und der elektromagnetischen Datenübertragung (Radio, WLAN, etc.). Nach Maxwells Ansicht war Licht nichts anderes als eine elektromagnetische Welle, die sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Die Geschwindigkeit des Lichts hängt dabei, gemäß den berühmten Maxwellgleichungen, nicht vom Bewegungszustand bzw. der Geschwindigkeit der Lichtquelle ab, sondern lediglich von den Eigenschaften des elektrischen und magnetischen Feldes. So lässt sich die Lichtgeschwindigkeit direkt aus der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der magnetischen Feldkonstante μ_0 berechnen:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Die Gültigkeit der Maxwellgleichungen und die daraus resultierenden Konstanz der Lichtgeschwindigkeit konnte im Gegensatz zur von Newton geforderten variablen Lichtgeschwindigkeit durch zahlreiche Experimente nachgewiesen werden. Der Elektromagnetismus stellt deshalb bis heute einen der am besten verstandenen Teilbereiche der Physik dar.

Das Konzept einer von äußeren Einflüssen unabhängigen konstanten Lichtgeschwindigkeit war den Physiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts also bereits bekannt, auch wenn dies für den gesunden Menschenverstand paradox wirken mag und der Alltagserfahrung widerspricht. Erst Albert Einstein gelang es, diesen Widerspruch zu klären, indem er die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zur Grundlage seiner gesamten Relativitätstheorie machte und Newtons klassische Mechanik auf elegante Art und Weise widerlegte.

Albert Einstein formulierte im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie sein bis heute gültiges zweites Postulat:

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist in jedem beliebigen Inertialsystem unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle oder des Beobachters gleich groß.

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = const.$$

Dies bedeutet, dass es keine Rolle spielt, ob sich ein Beobachter bewegt oder ob dieser in Ruhe ist. Er wird immer den gleichen Wert für die Lichtgeschwindigkeit messen. Hierzu ein weiteres Gedankenexperiment:

„Der Fahrgast eines schnell fahrenden Zuges schaltet während der Fahrt eine Taschenlampe ein. Von der Taschenlampe aus breitet sich das Licht im Zug mit Lichtgeschwindigkeit ($c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) aus. Ein Beobachter der außerhalb des Zuges am Bahndamm steht, bestimmt simultan die Geschwindigkeit des Lichts der Taschenlampe relativ zum ruhenden Bahndamm. Gemäß den Gesetzen der klassischen Relativbewegung erwartet der Beobachter am Bahndamm, dass sich die Geschwindigkeit des Lichts und die Geschwindigkeit des Zuges aufaddieren:

$$v_{rel.} = v_{Zug} + c$$

Nach der klassischen Theorie müsste es somit auch Geschwindigkeiten größer als Lichtgeschwindigkeit geben.“

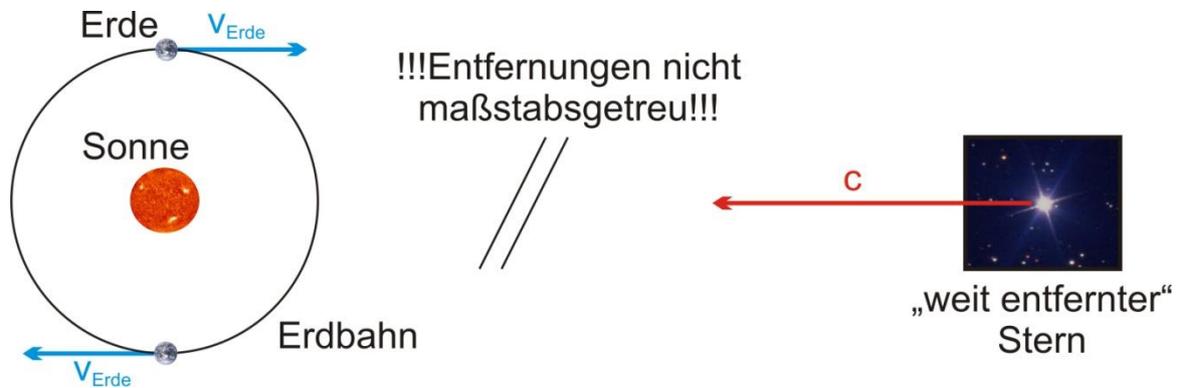
Einstein behauptete jedoch, dass diese Annahme falsch sei und dass der Beobachter am Bahndamm die gleiche Geschwindigkeit misst, wie der Beobachter im Zug. In beiden Fällen beträgt diese Geschwindigkeit $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Diese Behauptung widerspricht den Gesetzen der klassischen Mechanik, wonach sich Geschwindigkeiten vektoriell addieren bzw. subtrahieren lassen. Einstein erklärte seine Behauptung damit, dass sich bei sehr hohen Geschwindigkeiten nicht die Lichtgeschwindigkeit verändert, sondern sowohl der Raum als auch die Zeit, die in der klassischen Mechanik unveränderlich sind. Gemäß dem Weg-Zeit-Gesetz ergibt sich, wie für jede andere Geschwindigkeit die Formel:

$$c = \frac{s}{t}$$

Wenn, wie Einstein fordert, die Lichtgeschwindigkeit c im obigen Experiment, sowohl für den ruhenden als auch für den bewegten Beobachter gleich sind, müssen sich sowohl der Raum als auch die Zeit für beide Beobachter unterscheiden. Ziel der nachfolgenden Überlegungen ist es, zu beschreiben wie sich Raum und Zeit bei hohen Geschwindigkeiten verändern und die Ursachen für diese Veränderung zu erklären.

Ergänzung: Experimenteller Beweis des zweiten Postulats:

Obwohl Einsteins zweites Postulat auf den ersten Blick unlogisch erscheint, konnte es durch mehrere Experimente bewiesen werden. Hierzu beobachteten Astrophysiker im Verlauf eines Jahres mit Teleskopen das Licht eines weit entfernten Sterns.



Auf der annähernd kreisförmigen Bahn um die Sonne bewegt sich die Erde dabei an einer Stelle der Umlaufbahn genau auf den ausgewählten Stern zu und ein halbes Jahr später auf der anderen Seite der Sonne genau vom Stern weg. Nach der klassischen Vorstellung wurde erwartet, dass die Lichtgeschwindigkeit höher sein muss, wenn sich die Erde auf den Stern zubewegt und dass sie einen niedrigeren Wert annimmt, wenn sich die Erde vom Stern wegbewegt. Tatsächlich jedoch wurde an beiden Positionen exakt die gleiche Geschwindigkeit des Lichts gemessen. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit ergibt also unabhängig von der Bewegung des Beobachters relativ zur Lichtquelle immer den gleichen Wert. Auf diese Weise konnte Einsteins zweites Postulat experimentell bewiesen werden.

Ein weiterer Nachweis der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gelang Physikern im Jahr 1964 am Kernforschungszentrum CERN in der Schweiz. In einem Teilchenbeschleuniger des CERN wurden Protonen auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und auf einen soliden Metallkörper geschossen. Bei der Kollision mit dem Metallkörper zerbersten die Protonen und es entstehen unterschiedlichen Elementarteilchen, darunter auch sog. „instabile Pionen“, die sich, durch die beim Aufprall freiwerdende Energie, auch mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen. Da die Pionen sehr instabil sind, zerfallen diese schon nach wenigen Femtosekunden in Röntgenquanten, also sehr hochenergetische Lichtteilchen. Im Experiment gelang es nun die Geschwindigkeit der Röntgenquanten zu messen. Obwohl sich die Pionen, die in diesem Fall die Lichtquelle darstellen, vor ihrem Zerfall mit sehr hoher Geschwindigkeit bewegten, betrug die Geschwindigkeit der Röntgenquanten genau $2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ und entsprach damit dem exakten Wert der Lichtgeschwindigkeit. Die ursprüngliche Geschwindigkeit der Pionen hatte also keinerlei Einfluss auf die Geschwindigkeit der Röntgenquanten. Es konnte somit nachgewiesen werden, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle konstant ist.