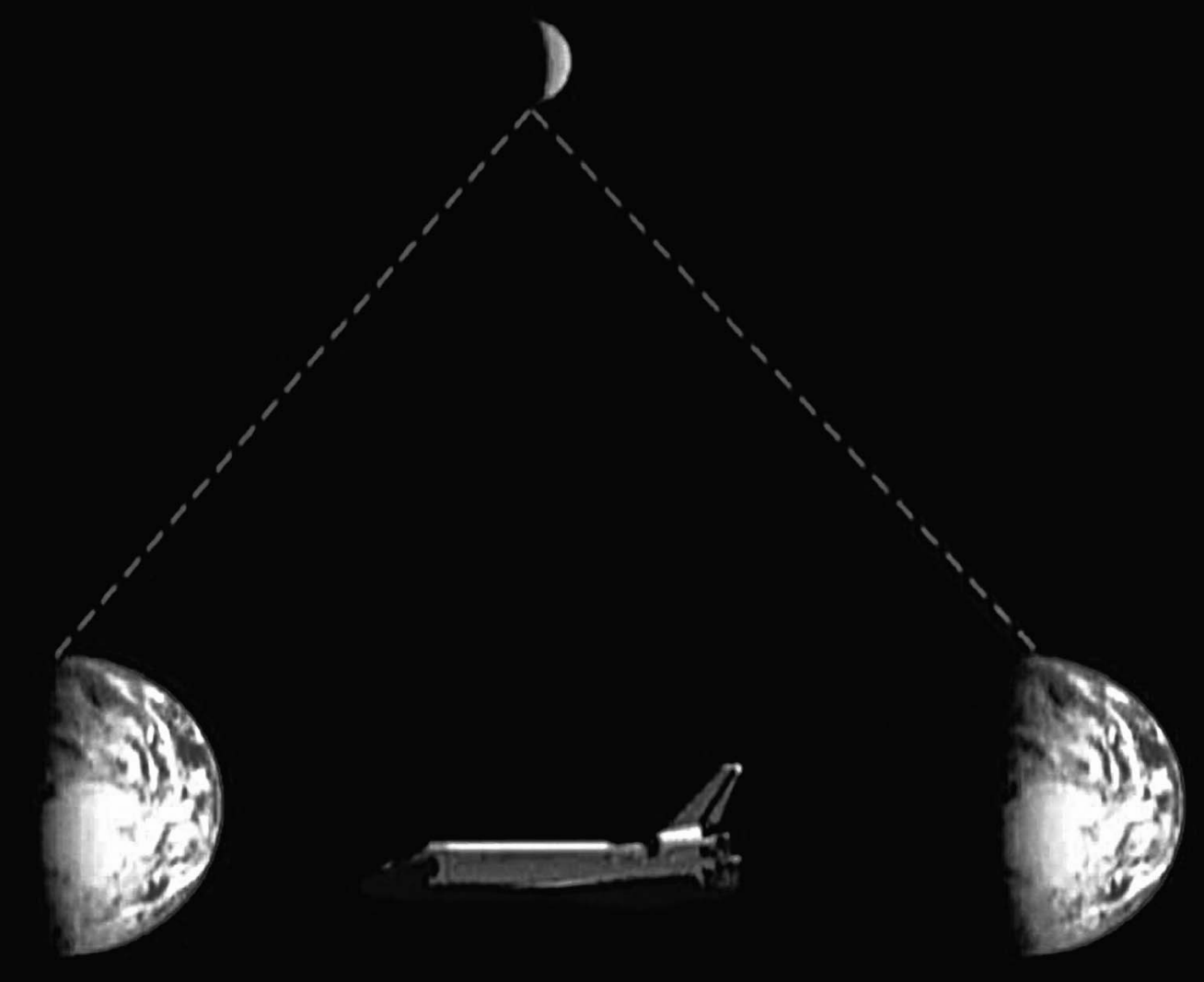


VHS 42 10442 / DVD 46 10442 20 min, Farbe



Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie Teil 1

FWU –
das Medieninstitut
der Länder



Lernziele

Die Schüler erfahren, dass die Lichtgeschwindigkeit eine universelle Konstante darstellt, deren Betrag nicht vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt. Sie können nachvollziehen, warum als Folge der konstanten Lichtgeschwindigkeit die Zeitdilatation und die Längenkontraktion in relativ zueinander bewegten Inertialsystemen auftreten. Außerdem gewinnen sie Einblick, in welcher Form und Stärke die beiden Phänomene in Erscheinung treten. Die anschaulichen Beispiele helfen den Schülern, eine eventuelle Scheu vor der angeblichen Komplexität der Einsteinschen Relativitätstheorie abzubauen.

Vorkenntnisse

Die Zuschauer müssen mit der unterschiedlichen Sichtweise von Bewegungen in verschiedenen Bezugssystemen vertraut sein. Der Begriff Inertialsystem sollte bekannt sein. Hilfreich sind auch Vorkenntnisse über die Äthertheorie und das Experiment von Michelson und Morley.

Zum Inhalt

Der Unterrichtsfilm ist der 1. Teil einer dreiteiligen Reihe über Einsteins Relativitätstheorie. Darin wird speziell auf die Effekte der Zeitdilatation und Längenkontraktion eingegangen.

Im Film wird gezeigt, wie mit Hilfe des Experiments von Michelson und Morley versucht wurde, die Ätherhypothese zu belegen. Doch die Ergebnisse des Experiments widersprachen der Annahme eines Äthers. Der diesem Experiment zugrundeliegende Gedanke der unterschiedlichen Geschwindigkeitswahrnehmung abhängig von der Bewegung des Beobachters wird im Film durch folgendes Beispiel veranschaulicht: Ein vorbeifliegender Jet scheint sich für einen Beobachter in einem parallel dazu fliegenden Flugzeug und

für einen ruhenden Beobachter unterschiedlich schnell zu bewegen. Diese unterschiedliche Wahrnehmung von Geschwindigkeiten gilt jedoch nicht für die Lichtgeschwindigkeit. Aus der Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der jeweiligen Geschwindigkeit des Beobachters wird gefolgert, dass die physikalischen Größen Länge und Zeit nicht konstant bleiben und vom Bewegungszustand des Beobachters abhängen.

Für die Erklärung der Zeitdilatation zeigt der Film eine „astronomische Lichtuhr“, bei der ein Laserlichtsignal zwischen Erde und Mond hin und her läuft. Die Lichtuhr wird von einem bezüglich der Lichtuhr ruhenden und einem dazu bewegten Beobachter betrachtet. Aufgrund der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen ergibt sich für beide Beobachter jeweils eine andere Laufzeit des Lichtsignals.

Zur Veranschaulichung der Längenkontraktion wird in einer Animation das Lichtuhrprinzip auf das System Sonne-Erde übertragen, das sich mit hoher Geschwindigkeit durch das All bewegt. Es werden aus der Sicht eines auf der Sonne ruhenden Beobachters gleichzeitig zwei Photonen senkrecht zur Bewegungsrichtung, zwei weitere parallel dazu ausgesandt und an der Erdumlaufbahn reflektiert. Ein Beobachter, gegenüber dem sich das System Sonne-Erde bewegt, nimmt den Vorgang anders wahr: Neben der auftretenden Zeitdilatation erscheinen ihm auch die Laufstrecken der Photonen in Bewegungsrichtung verkürzt. Der Film dokumentiert ein Experiment zum Nachweis der Zeitdilatation mit Hilfe zweier Atomuhren. Eine davon wird in einem Flugzeug bewegt, die andere bleibt zum Vergleich auf der Erde zurück. Anschließend wird der Gangunterschied gemessen. Die zwei relativistischen Phänomene werden im Trick bei einem schnellen Raumschiffflug

veranschaulicht. Die dabei ablaufenden Vorgänge sind aus dem sogenannten Zwillingsparadoxon bekannt, das als Ausgangspunkt für weitere Diskussionen im Unterricht dienen kann.

Ergänzende Informationen

Die Äthertheorie als historischer Hintergrund der speziellen Relativitätstheorie

Im 19. Jahrhundert herrschte in der Physik die Überzeugung, dass unser gesamter Raum von einer Art Medium - dem sogenannten Äther - erfüllt sei. Die Notwendigkeit des Äthers ergab sich aus dem Versuch, zu erklären, wie sich z. B. das Sternenlicht als elektromagnetische Welle durch den leeren Raum fortpflanzen kann. Alle Himmelskörper im Universum sollten sich durch diesen Äther bewegen, wodurch eine Art „Fahrtwind“ spürbar sein sollte. Es waren der Physiker *Albert A. Michelson* und der Chemiker *Edward Williams Morley*, die sich auf die Suche nach dem Äther machten. Michelson hatte bereits 1873 (im Alter von 21 Jahren) den bislang genauesten Wert der Lichtgeschwindigkeit ermitteln können. Die beiden Wissenschaftler führten im Jahre 1887 an der Case School für angewandte Naturwissenschaften in Cleveland das berühmte nach ihnen benannte Interferenz-Experiment durch. Licht, das sich parallel zur Geschwindigkeitsrichtung der Erde durch den Äther bewegt, sollte wegen des „Gegen- und Rückenwindes“ für die gleiche Strecke eine längere Laufzeit benötigen, als Licht, welches sich senkrecht dazu bewegt. So würde aufgrund der unterschiedlichen Laufzeit ein Phasenunterschied entstehen. Durch die Überlagerung der zwei phasenverschobenen Lichtwellen wird dann ein Interferenzmuster sichtbar. Da die Erde bei ihrem Weg um die Sonne eine Ellipsenbahn beschreibt, stand

nicht fest, aus welcher Richtung der „Ätherwind“ zur jeweiligen Jahreszeit wehen würde. Daher war das gesamte Experiment drehbar gelagert und konnte so in verschiedenen Ausrichtungen durchgeführt werden. Doch trotz allen technischen Aufwands und mehrmaliger Durchführung brachte das Experiment nicht die erhoffte Bestätigung der Äthertheorie. Selbst die Idee Michelsons, dass sich die Geschwindigkeit des Sonnensystems und die momentane Geschwindigkeit der Erde um die Sonne gerade aufheben, konnte durch wiederholte Messungen alle Vierteljahre ausgeschlossen werden. Auch alle anderen Erklärungsversuche, warum keine Ätherbewegung gegenüber der Erde festzustellen war, scheiterten. Das missglückte Experiment bewog den Physiker *George F. Fitzgerald* zu vermuten, dass sich die parallel zur Erdbewegungsrichtung verlaufende Strecke für die Photonen verkürzt. Schließlich entwickelte *Hendrik Antoon Lorentz* die Gleichung, mit der die eintretende Verkürzung berechnet werden konnte. In Folge stellte er auch eine Gleichung auf, die beschrieb, wie sich die Laufzeit für die parallel zur Erdbewegungsrichtung bewegten Photonen ändern müsste. Doch dieses Konzept der „künstlichen Zeit“, die von außen nicht messbar sein sollte, war sogar Lorentz selbst nicht ganz geheuer, weshalb er bereits bei seiner Veröffentlichung Vorbehalte zum Ausdruck brachte.

Die einzige Alternative, sich aus diesem Dilemma zu befreien, war, die Vorstellung des Äthers vollständig abzulegen. Doch was sollte diese Theorie ersetzen? Im Jahre 1905 gelang es dem damals 26-jährigen Angestellten des Schweizer Patentamtes *Albert Einstein*, ein völlig neues, umwälzendes Prinzip zu entwickeln, das die Äthertheorie ablösen sollte.

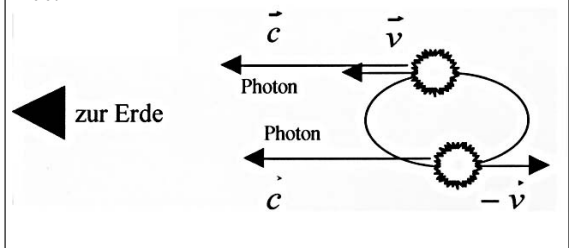
Die Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie und ihre Auswirkungen auf Raum und Zeit

Einstein veröffentlichte 1905 insgesamt fünf Arbeiten in den „Annalen der Physik“. Neben der Deutung des Photoeffekts (für die er u. a. 1921 den Nobelpreis für Physik erhielt) erschien auch die Arbeit mit dem Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. Darin formulierte Einstein die Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie, um damit elektrische und magnetische Felder zu einer einzigen Erscheinung zusammenzufassen. Alle Effekte der speziellen Relativitätstheorie leitete Einstein dabei aus zwei Annahmen ab, die inzwischen als unumstößliche Tatsachen angesehen werden:

1. Es ist unmöglich, die absolute Geschwindigkeit eines Inertialsystems (gegenüber einer Art Äther) festzustellen. Stattdessen sind nur Relativbewegungen zweier Inertialsysteme zueinander messbar.
(Relativitätsprinzip)
2. Die Geschwindigkeit des Lichts bleibt gleich, unabhängig davon, wie sich Lichtquelle und Beobachter zueinander bewegen.

In der ersten Annahme vertrat Einstein also die Ansicht, dass es überhaupt nicht möglich sei, etwas über den Bewegungszustand des eigenen Bezugssystems bezüglich der Umgebung auszusagen, solange keine Beschleunigung und damit Trägheitskräfte auftreten. Daher kann auch niemals festgestellt werden, ob ein Äther existiert oder nicht. Die zweite Annahme verdanken wir Einsteins bemerkenswerter Intuition! Er selbst hatte für diese Hypothese keinerlei experimentelle Belege. 1913 konnten allerdings Astronomen bei der Beobachtung von Doppelsternsystemen die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Lichtquelle bestätigen (siehe Abb. 1). Auf

Abb. 1



diese beiden Annahmen aufbauend führte Einstein Gedankenexperimente durch, die ihn zwangen, die bisherige Vorstellung eines starren Raumes und einer festen Zeit grundlegend zu revidieren.

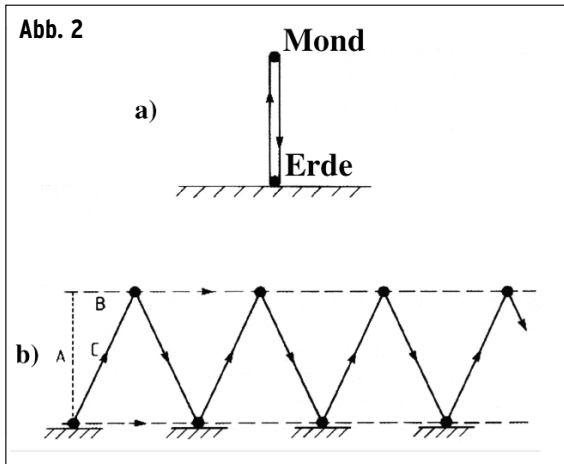
Einsteins zweite Annahme verlangt, dass zueinander bewegte Beobachter stets den gleichen Wert für die Lichtgeschwindigkeit messen. Dies widersprach der bis dahin üblichen Vorstellung von der Geschwindigkeitsaddition gemäß der bekannten Galilei-Transformation. Bewegen sich zwei Beobachter mit der Relativgeschwindigkeit v_0 zueinander, so hätte sich nämlich nach der bisherigen Auffassung für den einen Beobachter die Lichtgeschwindigkeit um v_0 vergrößert bzw. verringert. An die Stelle der Galilei-Transformation trat deshalb die nach dem Physiker *Lorentz* benannte Lorentztransformation.

Bekanntlich können konstante Geschwindigkeiten prinzipiell immer über die Messung von zurückgelegter Strecke und dazu benötigter Zeit aus der Beziehung $c = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ bestimmt werden. Wenn also die Lichtgeschwindigkeit c unveränderlich ist, so folgerte Einstein, müssen sich letztendlich die gemessene Laufstrecke und bzw. oder die hierbei verstrichene Zeit verändern. Die unterschiedliche Zeit- bzw. Längenwahrnehmung wird umso deutlicher, je größer die Relativbewegung der Beobachter zueinander ist. Im Film wird dieser Grundgedanke mit folgendem Satz ausgedrückt: „Die Formel ($c = \frac{\text{Raum}}{\text{Zeit}}$) baut aber gerade darauf auf, dass c , der Wert für die Geschwindigkeit, variabel ist, während

die Maßeinheit für die Weglänge, ein Meter, sich nie ändert, und auch die Zeit immer gleich schnell vergeht...". Mit Hilfe der Lorentztransformation lässt sich schließlich zeigen, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit gemäß $c = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ in allen Inertialsystemen konstant bleibt.

Zeitdilatation, Längenkontraktion und der Begriff der Gleichzeitigkeit

Ein Gedankenexperiment, mit dem in geschickter Weise erklärt werden kann, warum die Zeitdilatation auftritt, ist die im Film vorgestellte Lichtuhr zwischen Erde und Mond mit einer Taktzeit von 1,3s (siehe Abb.2). Ein



Astronaut fliegt in einem Raumschiff an dem System Erde-Mond vorbei. Da seine Bewegungsrichtung senkrecht zu der des Lichtsignals verläuft, muss der Effekt der Längenkontraktion nicht berücksichtigt werden. Wie der Film anschaulich erklärt, misst der Astronaut bei der Lichtuhr eine längere Taktzeit als ein Beobachter auf der Erde, der bezüglich der Lichtuhr ruht. Die Zeit im Lichtuhr-System verstreicht also aus der Sicht des Astronauten langsamer. Etwas allgemeiner ausgedrückt gilt also: Für einen Vorgang, der in einem Inertialsystem stattfindet, das sich relativ zu unserem bewegt, messen wir ein längeres Zeitintervall, als jemand aus dem Inertialsystem, in dem der Vorgang abläuft. Das heißt, dass der Zeit-

fluss in dem relativ zu uns bewegten Inertialsystem verlangsamt erscheint. Dieses Phänomen der Zeitdilatation wird im Film in dem Satz „Bewegte Uhren gehen langsamer als in ihrem Ruhesystem.“ zusammengefasst.

Diese Aussage ist jedoch im Sinne des Relativitätsprinzips immer abhängig von der Sichtweise. Um dies zu verdeutlichen, stelle man sich vor, dass auf dem Raumschiff auch eine Lichtuhr mit 1,3s-Taktzeit installiert ist. Von der Erde aus betrachtet, läuft nun diese bewegte Raumschiff-Uhr genauso langsam wie für den Astronauten die Uhr zwischen Erde und Mond. Die jeweils eigene Uhr dagegen weicht nicht vom üblichen Takt ab. Wegen der Unmöglichkeit der Angabe einer absoluten Geschwindigkeit gegenüber eines Mediums (wie z. B. den Äther) sind beide Inertialsysteme zueinander gleichberechtigt. Jeder Beobachter betrachtet sein eigenes Inertialsystem als ruhend und das des anderen als bewegt und sieht dort deshalb einen langsameren Zeitfluss als bei sich selbst. Die Sichtweise ist also relativ, was auch Einsteins Theorie den Namen verlieh. Erst durch Beschleunigungen und Kräfte wird die relative Sichtweise zugunsten einer absoluten aufgehoben. Dies erklärt auch das berühmte Zwillingsparadoxon. Am Ende der Reise mit dem Raumschiff unterlag tatsächlich nur der raumfahrende Zwillingsbruder der Zeitdilatation und ist dabei weniger gealtert. Der Zwillingsbruder im Raumschiff konnte nämlich nur mit Hilfe von Beschleunigungsvorgängen von der Erde weg und wieder zu ihr zurückfliegen. Die dabei spürbar auftretenden Kräfte zerstören so die Symmetrie, die sonst vorliegt, wenn sich zwei Inertialsysteme zueinander (mit konstanter Geschwindigkeit) bewegen. Auch die Längenkontraktion lässt sich durch ein wie im Film vorgestelltes Gedankenexperiment mit einer Lichtuhr erklären. Von der

Sonne werden gleichzeitig zwei Photonen parallel und zwei senkrecht zur Bewegungsrichtung des Sonnensystems zur Erdumlaufbahn ausgesandt und dort wieder zur Sonne reflektiert. Im Inertialsystem Sonne-Erde treffen alle vier Photonen wieder gleichzeitig auf der Sonne ein. Für einen Astronauten in einem Raumschiff, an dem das Sonnensystem vorbeizieht, wäre nun ähnlich wie beim Michelson-Morley-Experiment zu erwarten, dass die Photonen, die parallel zur Bewegungsrichtung des Sonnensystems laufen, länger für ihre Laufstrecke brauchen als die senkrecht dazu fliegenden. Doch er beobachtet auch das gleichzeitige Eintreffen der vier Photonen, denn es handelt sich, wie im Film erklärt, um einen „Vorgang“, der nicht „unterschiedlich wahrgenommen“ wer-

den kann. Das folgende Gedankenexperiment soll diese Begründung etwas verdeutlichen: Man stelle sich eine technische Apparatur vor, die auf der Sonne installiert ist und so konstruiert wurde, dass sie nur dann ein Signal an das vorbeifliegende Raumschiff sendet, wenn die vier Photonen auf der Sonne gleichzeitig eintreffen. Im Inertialsystem Sonne-Erde erreichen die vier Photonen sicher wieder gleichzeitig die Sonne. Erhält nun das Raumschiff das Signal, obwohl die Photonen aus der Sicht des Astronauten nicht gleichzeitig ankommen, so widerspräche dieser Vorgang dem Prinzip von Ursache und Wirkung. Da die Sendung des Signals also einen von allen unbestreitbaren physikalischen Vorgang an einem Ort darstellt, muss die Gleichzeitigkeit dieses Vor-

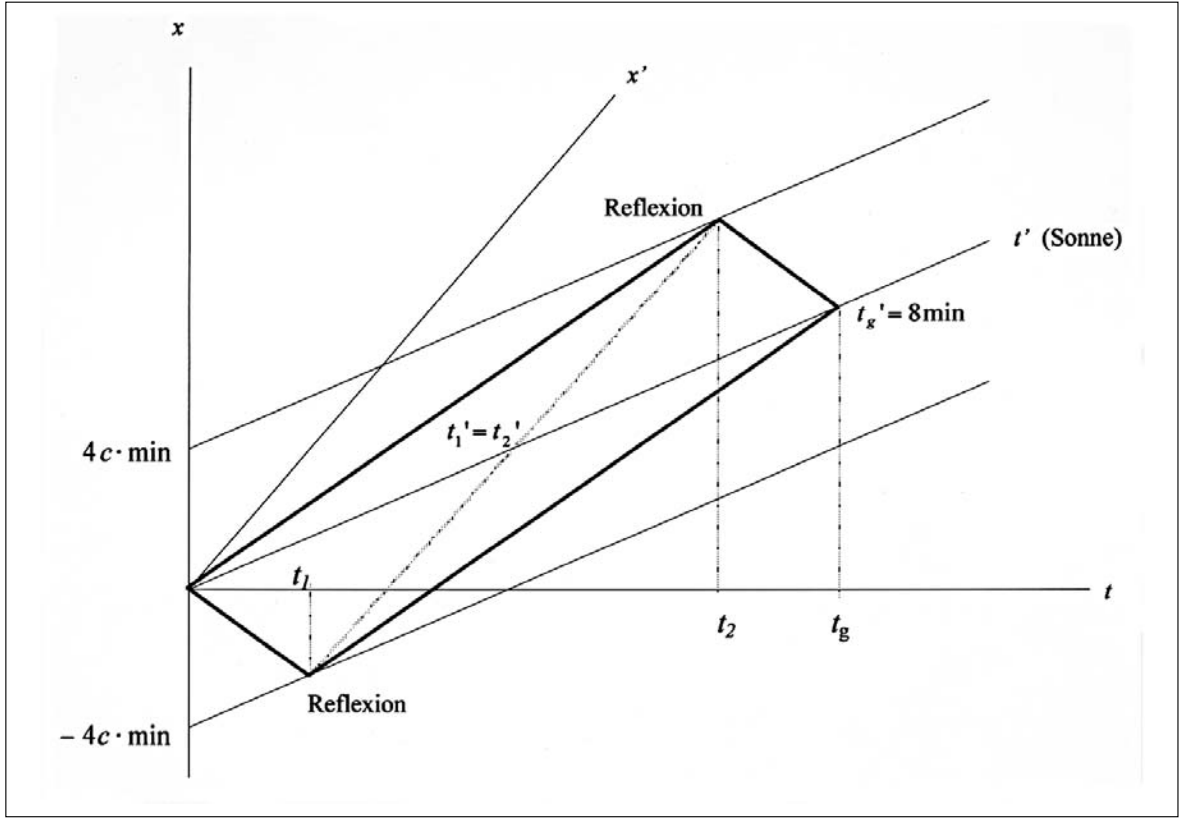


Abb. 3 Gleichzeitigkeit: Die drei Parallelen stellen die Ortslinien der Sonne und die Ränder der Erdumlaufbahn dar, wie sie von der Position eines außerhalb des Sonnensystems befindlichen Beobachters gesehen werden, der sich relativ zum Sonnensystem mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt. Die dunklen Linien stellen den Verlauf der Photonen dar. Die Reflexion der Photonen an der Erdumlaufbahn wird nur vom Inertialsystem Sonne-Erde gleichzeitig beobachtet ($t_1' = t_2'$). Für den Beobachter außerhalb des Sonnensystems dagegen finden die Reflexionen nicht gleichzeitig statt ($t_1 \neq t_2$). In beiden Inertialsystemen aber treffen die Photonen auf der Sonne wieder gleichzeitig ein, jedoch ist $t_g' < t_g$.

gangs für alle Beteiligten gewährleistet sein. In Zusammenhang mit dem Begriff der Gleichzeitigkeit ist jedoch besondere Vorsicht geboten. Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse ist nämlich in unterschiedlichen Bezugssystemen nicht immer gegeben. Zur Verdeutlichung ist dazu der Bewegungsablauf der parallel zur Bewegungsrichtung ausgesandten Photonen in einem Zeit-Raum-Diagramm (Abb. 3) dargestellt. Es zeigt sich, dass trotz des gleichzeitigen Eintreffens der Photonen auf der Sonne, nicht auch die Zeitpunkte ihrer Reflexion an der Erdumlaufbahn für beide Beobachter gleichzeitig eintreten. Das im Film visualisierte Gedankenexperiment ist also zugleich auch ein Beispiel dafür, dass die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse nicht in beiden Bezugssystemen vorliegt.

Zum Einsatz im Unterricht

Der Film eignet sich sehr gut dazu, in die grundlegenden Phänomene der speziellen Relativitätstheorie einzuführen. Mit Hilfe des Films können sich die Schüler in Kleingruppen die Antworten auf nachfolgende Fragen erarbeiten.

Fragen zum Film:

1. Was wollten die Wissenschaftler Michelson und Morley in einem Versuch zeigen?
2. Aus welcher besonderen Eigenschaft des Lichts folgerte Einstein, dass die Zeit und die Länge abhängig vom Bewegungszustand des Beobachters sind?
3. Warum misst der Astronaut im Raumschiff, der im Film mit hoher Geschwindigkeit an Erde und Mond vorbeifliegt, für das Lichtsignal zwischen Erde und Mond eine längere Laufzeit als jemand auf der Erde?
4. Im Film wurde gezeigt, dass sich für einen Beobachter, an dem das Sonnensystem vorbeifliegt, die Laufstrecke derjenigen

Photonen verkürzen muss, die parallel zur Bewegungsrichtung der Sonne laufen. Erkläre die Ursache hierfür!

Zur Vertiefung der geschilderten relativistischen Effekte bieten sich mehrere Möglichkeiten. Das im Film dargestellte Lichtuhrenexperiment kann dazu dienen, ohne großen mathematischen Aufwand die Formel für die Zeitdilatation herzuleiten. Im Anschluss ergibt sich aus dem Atomuhrenexperiment ein kleines Rechenbeispiel zur Anwendung der zuvor hergeleiteten Formel und zur Verdeutlichung der extrem geringen Wirkung der Zeitdilatation im Alltag. Der Zerfall von kosmischen Myonen ist ein Beispiel aus dem Bereich der modernen Teilchenphysik, das die Ergebnisse der Relativitätstheorie eindrucksvoll bestätigt.

1. Ableitung des γ -Faktors als Dehnungsfaktor der Zeit aus dem Lichtuhrenexperiment:

Anhand des Vergleichs der unterschiedlichen Wegstrecken, die das Photon zwischen Erde und Mond aus der Sicht zweier zueinander bewegter Beobachter zurücklegt, kann die Abhängigkeit des Gammafaktors von der Relativgeschwindigkeit v der beiden Inertialsysteme $\gamma = \sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}$ hergeleitet werden.

Aus Abb. 2 lässt sich erkennen, dass gemäß Pythagoras gilt: $C^2 = A^2 + B^2$ (1)

Außerdem gilt: $A = c \cdot \Delta t'$, $B = v \cdot \Delta t'$ und $C = c \cdot \Delta t$

Setzt man die Werte von A, B und C in Formel (1) ein und löst nach $\Delta t'$ auf, so ergibt sich: $\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}$ (2)

Definiert man $\gamma = \frac{\Delta t}{\Delta t'}$ als Maß für die Zeitdehnung, so folgt aus (2) die bekannte Formel für γ .

2. Näherungsweise Berechnung des Gangunterschieds beim Atomuhren-Experiment:

Unter der Annahme einer Flugzeuggeschwindigkeit von $v = 1000 \text{ km/h}$ und einer Flugzeit von 40 h lässt sich die ungefähr zu erwartende Größenordnung der Zeitabweichung der zwei Atomuhren berechnen. Es ergibt sich bei einem γ -Faktor von etwa 1.000000000000043 eine äußerst geringe Gesamtabweichung von ca. 6 Nanosekunden. (Wegen der nötigen Rechengenauigkeit auf 14 Stellen muss zur Berechnung ein CAS wie z.B. Mathcad oder Maple verwendet werden.) In Zusammenhang mit diesem Experiment sollte unbedingt darauf hingewiesen werden, dass hierbei auch Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie auftreten! Das Flugzeug stellt nämlich kein Inertialsystem dar, weil sowohl Trägheitskräfte als auch Gravitationskräfte auftreten. Der tatsächliche Gangunterschied beider Uhren lässt sich deshalb nur unter Berücksichtigung aller Effekte genau bestätigen. Ein ähnlicher Versuch wurde übrigens 1972 von den Physikern *J. Hafele* und *R. Keating* durchgeführt.

3. Der Myonenzerfall:

Falls Kenntnisse aus der Teilchenphysik vorhanden sind, kann auf die Zeitdilatation und Längenkontraktion eingegangen werden, die bei Myonen während ihres Fluges zur Erde auftreten. Myonen sind Leptonen und stellen mit etwa 200-facher Elektronenmasse die schweren Verwandten der Elektronen dar. Die auf der Erde nachweisbaren Myonen entstehen bei Kollisionen hochenergetischer Teilchen aus dem All (Protonen, γ -Quanten) mit Atomkernen in der Erdatmosphäre. Bei der Erforschung dieser kosmischen Strahlung wurden 1937 die Myonen entdeckt. Myonen, die in bis zu 30 km Höhe in der Erdatmosphäre aus der kosmischen Strahlung entstehen, bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit. Die mittlere Lebensdauer eines Myons beträgt $2,2 \mu\text{s}$, bevor es in ein

Elektron und zwei Neutrinos zerfällt. In dieser kurzen Zeitspanne würden sie im Mittel nur 660 m zurücklegen können und deshalb niemals die mehrere Kilometer entfernte Erdoberfläche erreichen. (Einige Myonen leben sicher etwas länger und fliegen daher um $1\text{--}2 \text{ km}$ weiter.) Da aber auf der Erde tatsächlich viele Zerfälle von Myonen kosmischer Herkunft nachgewiesen werden, ist dies ein Beleg dafür, dass die mittlere Lebensdauer bei sehr schnellen Myonen wesentlich länger sein muss als im Ruhezustand. Das heißt, dass von der Erde aus gesehen die Zeit im Bezugssystem der fast mit Lichtgeschwindigkeit fliegenden Myonen langsamer vergeht. Aus der tatsächlich zurückgelegten Strecke der Myonen von etwa 30 km , können die Schüler nun gemäß $\gamma = \frac{\Delta t}{\Delta t_0}$ den γ -Faktor ausrechnen, der die Stärke der Zeitdehnung angibt. Ergebnis: $\gamma \approx 45$.

Aus dem Relativitätsprinzip folgt, dass ein Beobachter, der sich mit den Myonen mitbewegt, wieder eine mittlere Lebensdauer von $2,2 \mu\text{s}$ messen würde. Aus diesem Bezugssystem heraus betrachtet, kann das Myon nicht 30 km weit fliegen. Daher erscheint einem mitfliegenden Beobachter die Strecke bis zur Erdoberfläche um denselben γ -Faktor verkürzt. Den Schülern kann so anschaulich klar gemacht werden, dass sich Zeitdilatation und Längenkontraktion gegenseitig bedingen und immer gemeinsam auftreten.

Infos im Internet

<http://www.ap.univie.ac.at/users/fe/Rel/Effekte/>

Eine interaktive Lerneinheit zur Erklärung der Zeitdilatation und Längenkontraktion vom Institut für Theoretische Physik in Wien. Die dargestellte Animation zeigt das im Film gezeigte Gedankenexperiment zur Längenkontraktion.

<http://physics.syr.edu/courses/modules/LIGHTCONE/java/TwinParadox.html>

Englischsprachige Seite mit Java-Applet. Es zeichnet das Minkowski-Diagramm für das Zwillingsparadoxon für beliebig einstellbare Geschwindigkeit.

<http://www.schulphysik.de/relativ.html>

Eine Seite mit zahlreichen Links zu allen Themen der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie.

<http://www.galaxy.com/galaxy/Science/Physics/Relativity/>

Links zu Seiten über Albert Einstein und Downloads zur speziellen/allgemeinen Relativitätstheorie.

<http://www.roro-seiten.de/physik/lk12/relativitaet/index.html>

Die Seite enthält Versuche, Versuchsauswertungen, Diagramme und kleine Unterrichtseinheiten zu allen Aspekten der speziellen Relativitätstheorie.

Literatur

Goenner Hubert: Einsteins Relativitätstheorien: Raum, Zeit, Masse, Gravitation, C. H. Beck Verlag, München, 1999²

Ein kurzes, wissenschaftliches Buch, in dem nahezu alle Aspekte der Relativitätstheorie zusammengefasst wurden. Mit mathematischem Anhang bestehend aus Formeln zur Relativistik.

Kahan Gerald: Einsteins Relativitätstheorie, DuMont Verlag, Köln, 1989⁴

Ein allgemeinverständliches Buch, das die Entstehung und die Effekte der speziellen sowie allgemeinen Relativitätstheorie anschaulich erklärt. Gut geeignet für Schüler und Laien.

Fritzsche Harald: Eine Formel verändert die Welt, Piper Verlag, München, 1988

Ein unterhaltsames Buch, in dem anhand eines fiktiven Gesprächs zwischen Newton, Einstein und einem Physiker der Neuzeit die Relativitätstheorie und ihre Entstehung erläutert wird. Dazu werden auch zahlreiche Einblicke in die Kern- und Teilchenphysik gegeben. Für physikalisch interessierte Schüler sehr empfehlenswert.

Herausgabe

FWU Institut für Film und Bild, 2004

Produktion

Gerald Kargl GmbH Filmproduktion Wien
im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur

Buch und Regie

Gerald Kargl

Animation

Michael Zlabinger
Christoph Letmaier
Andreas Vrhovsek

Redaktion

Walter Olensky

Begleitkarte

Matthis Reuter

Pädagogische Referentin im FWU

Karin Lohwasser

Verleih durch Landes-, Kreis- und Stadtbildstellen,
Medienzentren und konfessionelle Medienzentren

Verkauf durch FWU Institut für Film und Bild,
Grünwald

Nur Bildstellen/Medienzentren: öV zulässig

© 2004

FWU Institut für Film und Bild
in Wissenschaft und Unterricht
gemeinnützige GmbH
Geiseltalsteig
Bavariafilmplatz 3
D-82031 Grünwald
Telefon (0 89) 64 97-1
Telefax (0 89) 64 97-300
E-Mail info@fwu.de
vertrieb@fwu.de
Internet <http://www.fwu.de>



FWU Institut für Film und Bild
in Wissenschaft und Unterricht
gemeinnützige GmbH
Geiseltasteig
Bavariafilmplatz 3
D-82031 Grünwald
Telefon (0 89) 64 97-1
Telefax (0 89) 64 97-300
E-Mail info@fwu.de
Internet <http://www.fwu.de>

**zentrale Sammelnummern für
unseren Vertrieb:**

Telefon (0 89) 64 97-4 44
Telefax (0 89) 64 97-2 40
E-Mail vertrieb@fwu.de

Laufzeit: 20 min
Kapitelanwahl auf DVD-Video
Sprache: deutsch

**Systemvoraussetzung
bei Nutzung am PC**
DVD-Laufwerk und
DVD-Player-Software,
empfohlen ab WIN 98

GEMA

Alle Urheber- und
Leistungsschutzrechte
vorbehalten.
Nicht erlaubte/ geneh-
migte Nutzungen wer-
den zivil- und/oder
strafrechtlich verfolgt.

**LEHR-
Programm
gemäß
§ 14 JuSchG**

FWU - Schule und Unterricht

- VHS 42 10442
- DVD-VIDEO 46 10442
- ■ Paket 50 10442 (VHS 42 10442 + DVD 46 10442)

20 min, Farbe

Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie

Teil 1

Immer noch ist es für uns schwer vorstellbar, dass Raum, Zeit und Masse nicht jene starren Größen sind, die wir aus dem Alltag kennen. Einsteins Relativitätstheorie revolutionierte damit unser Verständnis von Raum, Zeit, Materie und Gravitation. Der erste Teil der dreiteiligen Serie zur Relativitätstheorie erklärt, insbesondere mit Hilfe von Animationen, die Entstehung von Zeitdilatation und Längenkontraktion in zueinander bewegten Inertialsystemen und ihre Auswirkungen.

Schlagwörter

Äthertheorie, Lichtgeschwindigkeit, Inertialsystem, Zeitdilatation, Längenkontraktion, Zwillingsparadoxon

Physik

Relativitätstheorie - Elementarteilchenphysik - Astronomie - Astrophysik, Geophysik - Weltraumfahrt - Kinematik, Dynamik

Allgemeinbildende Schulen (11-13)
Erwachsenenbildung

Weitere Medien

- 42 02895 Vom Bezugssystem zur speziellen Relativitätstheorie. VHS, 30 min, f
- 42 10443/46 10443/50 10443 Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie Teil 2. VHS/DVD-VIDEO, 17 min, f
- 42 10444/46 10444/50 10444 Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie. VHS/DVD-VIDEO, 24 min, f